

## 第9章

# 放射光とX線レーザーで見る新世界

### 《放射光科学総合研究センター》

高エネルギー電子の軌道を曲げると発生する放射光は、ナノメートル (nm) 以下の波長を持つ非常に明るい光である。これまで見ることはできなかったさまざまなものを分析し、未知のものを発見できるこの光は、原子レベルでの物質の観察に活用され、材料科学、地球科学、生命科学、環境科学、医学利用などに革新をもたらしている。理化学研究所は1997 (平成9) 年3月、世界最高性能を持つ大型放射光施設SPring-8を旧日本原子力研究所と共に完成させ、同年10月から多くの研究者に開かれた共同利用施設として供用してきた。SPring-8は、Super Photon ringが名前の由来であり、電子の加速エネルギー8GeV (ギガ電子ボルト)、蓄積リングの周長が1436mと、欧州のESRF、アメリカのAPSをしのぐ世界最大の第3世代大型放射光施設で、完成後長らくX線領域では世界最高輝度の光源だった。

そのSPring-8で培われた技術は、世界初のコンパクトX線自由電子レーザーSACLA (SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser) へと結実した。硬X線自由電子レーザーとしても、アメリカのLCLSに続く世界で2例目の装置であるSACLAは、各界の支援を得て2006年に国家基幹技術として整備を開始した。建設は理研が財団法人高輝度光科学研究センター (JASRI) の助力を得て、400社を超える参画企業を統括する形で進められた。SACLAは2011年3月に完成し、2012年2月から共同利用施設として供用されている (図1)。LCLSの約半分の0.063nmというX線自由電子レーザーとしては短波長世界記録を持ち、SPring-8と共に、わが国のみならず世界の高エネルギーフォトンサイエンスをけん引する基盤施設となっている。

理研百年の歴史の中で、放射光科学は準備期間を含めても30年足らずであり、前半部分の歴史は**88年史**にも詳述されている。ここでは、それらをまとめて第1節-第3節に記載し、それ以降の発展を第4節から述べる。



図1 放射光科学総合研究センターの全景  
SPring-8蓄積リング棟とSACLA (左の直線部分)

## 第1節 理研の独自計画から大型放射光施設計画へ

円形加速器で光速近くまで加速された電子が接線方向に発する光（放射光）は「魔法の光」ともよばれ、21世紀の科学技術に革新をもたらすと期待された。本格的に研究が始まったのは20世紀後半で、わが国でも、欧米ソに遅れることなく進められた。1960年代後半の東京大学原子核研究所の電子シンクロトロン、1974（昭和49）年に完成した東京大学物性研究所のSOR-RING、81年の高エネルギー物理学研究所（KEK）のKEK-PFなどで展開された研究開発は、むしろ世界の放射光研究をリードした面が強かった。そのような流れの中で、83年には関西SOR計画世話人会が発足し、関西6 GeV-SR計画を提案した。かたや欧米では88年にESRF（欧州）の起工式が行われ、86年からはAPS（アメリカ）の研究開発が始まっていた。

理研独自の計画としては、76年の「ラジエーション総合研究施設」構想に上坪宏道主任研究員らが盛り込んだ1 GeV放射光施設までさかのぼることができる。86年度概算要求には、1.5 GeV放射光施設を含む「国際フロンティア研究計画」を掲げた。これに対して関西経済連合会は、同計画の関西での実施を科学技術庁（現文部科学省）に働きかけたのである。上坪は難波進主任研究員、企画室の木田光春らと話し合い、関西6 GeV-SR計画の推進に同意した。

同じころ、科学技術庁の航空・電子等技術審議会の第9号答申（86年3月）で、先端計測技術分野での高輝度放射光源の必要性が記載された。上坪は86年から87年にかけて放射光源加速器設計・研究開発グループを結成した。同時期、理研内に「大型放射光施設準備室」、「放射光施設計画推進準備室（永井榮室長）」、「放射光研究施設計画委員会（中根良平副理事長ら）」、「利用部会（岩崎準主任研究員ら）」が設置され、行政、研究機関、研究者、産業界との折衝・調整を始めた。

理研内の動きに対して関西世話人会は、小田稔理事長に科学技術庁と文部省間、そして理研とKEK間の協力体制を要望し（86年9月）、10月には科学技術庁長官宛てに「超高輝度X線用シンクロトロン放射源（6 GeV-SR）の関西設置に関する要望」を提出した。同月、大型放射光施設誘致を政策に揚げた貝原俊民兵庫県知事が誕生した。

理研は86年春に「光・電子総合研究所構想」などを含む87年度予算要求書を、科学技術庁原子力局技術振興課と同科学技術振興局管理課に持ち込んだ。科学技術庁幹部は「理研・原研の役割分担を検討し、協力して建設する」とし、87年度予算要求に調査費を計上した。そして科学技術振興局に「大型放射光施設整備対策室」を設置した（11月）。一方で、大型加速器計画を所轄とする文部省は、KEKの「AR利用計画」を提案した。当初、大蔵省（現財務省）は慎重な立場をとった。

科学技術庁と文部省の対立が続いたが、86年末の自民党政務調査会科学技術部会の後、両担当課長は大蔵省主計局主査宛てに「大型放射光施設整備連絡協議会（仮称）」設置・運営の協力を確約した。こうして87年度に理研と科学技術庁

内局（上記協議会の開催）の予算計上が内示された。87年7月には航空・電子等技術審議会が「大型放射光施設の必要性とその推進方策」として第11号答申を出した。原子力委員会の方も「原子力の研究、開発および利用に関する長期計画」で大型放射光施設建設を認めた。こうして、計画推進に必要な行政手続きがほぼ完了したのである。

87年6月には大型放射光施設整備連絡協議会が科学技術庁と文部省の共同主催で発足し、さまざまな検討が行われた。また、科学技術庁は8月に「大型放射光施設立地選定指針検討会」を設置し、翌年8月に播磨科学公園都市（兵庫県）、鈴鹿山麓研究学園都市桜地区（三重県）、仙台北部中核工業団地（宮城県）、岩手中部工業団地（岩手県）の4候補から播磨に決定した。研究者側の動きも活発になり、日本学術会議物理学研究連絡委員会は「放射光将来計画シンポジウム」（11月）を主催した。翌5月に発足した「次世代X線光源研究会」は利用計画の検討と要望の取りまとめを目指した。

87年4月に科学技術庁、理研（加藤泰丸理事、上坪、永井ら）、原研の間で共同推進方策について検討が始まり、研究開発段階（87-88年度）、建設段階（89-94年度）の対応と88年度予算要求の大枠が決められた。10月に科学技術庁立ち会いの下で理研-原研運営委員会が開催され、理研-原研共同チームの組織・運営が検討された。翌年1月に両者は「大型放射光施設の研究開発に関する協力協定」を締結し、研究開発チーム（ディレクター：上坪）の設置や利用者の組織化（ユーザー懇談会）を決めた。紛糾した89年度予算要求は、科学技術庁参加の下、入射器は原研、蓄積リングは理研で決着した。

## 第2節 理研-原研共同チームの発足とJASRI設立

数カ月にわたる話し合いの後、1988（昭和63）年10月に理研-原研大型放射光施設研究開発共同チームが、当時の理研駒込支所（理研発祥の地）で発足した。チームは事務グループと技術グループからなり、構成員は理研38名、原研30名であった。原研は、理研の上坪技術グループ総括リーダーを原研特別研究員に任命し、実質的なプロジェクトリーダーとして遇した。これにより、計画を統一的に進めるリーダーシップが確立された。

理研と原研の仕事の進め方にはかなりの違いがあり、例えば建設費についても、構造仕様方式の理研と性能仕様方式の原研の間でなかなか収束しなかった。それでも科学技術庁から上限の指示を受けて、ほぼ理研が試算した総額1089億円の予算要求で合意したのであった。90年度政府予算が認められて建設開始となった。90年9月に共同チームは「大型放射光施設播磨管理事務所」を開設した。翌年9月に蓄積リング棟の建設工事に着手した。そして、93年4月の加速器グループ第1陣から始まって、94年に駒込の事務職員、共同チームリーダーが移転し、本拠地が播磨になった。播磨への移転は96年の利用系チームで終了した。途中2回の大規模補正予算によって当初計画より2年近く早く完成した。

建設に先立つ89年5月に、原研・理研両理事長の諮問委員会として、放射光および加速器関連の学識経験者による「大型放射光施設計画検討委員会」を設置した。下部委員会の「加速器小委員会」は4カ所の長直線部を提案した。「利用小委員会」では施設の一体的運営を求める意見が強く出された。92年3月に「大型放射光施設の建設等に対する検討評価に関する意見」を最終答申として提出した。

また、同様の諮問委員会として「大型放射光施設安全性検討委員会」も設置された。89年6月に科学技術庁は「大型放射光施設整備懇談会」を設置し、懇談会は90年6月に「高輝度光科学研究センター（仮称）のあり方について」の中間報告を行った。これに基づいて12月に「財団法人高輝度光科学研究センター」が設立された。この年、公募によってSPring-8の愛称と現在のロゴマークが決められた。

科学技術庁傘下の研究所は自らの研究を推進する組織なので、共同利用施設としての運営には馴染まない。そこで93年12月に科学技術庁長官は、航空・電子等技術審議会に「大型放射光施設SPring-8の効果的な利用・運用のあり方について」（第20号諮問）を諮問した。一方で「特定放射光施設の共用の促進に関する法律（6月29日交付法律第78号、94年10月1日施行）」が、第129回国会に上程された。これを受けてSPring-8の共用業務および支援業務を行う放射光利用研究促進機構として、10月1日に財団法人高輝度光科学研究センター（JASRI）が指定された。また、理研・原研・JASRIは円滑な運営のために「特定放射光施設の運営に関する協力協定」を締結し、「運営調整会議」を設置した。さらに理研と原研はそれぞれ播磨研究所と関西研究所放射光研究センターを設置した。

建設と並行して、世界に開かれた施設を建設するために91年9月に第1回国際助言委員会IAC（International Advisory Committee）を開き、96年4月まで計5回開催した。IACを通してさまざまなアドバイスを受けるだけでなく、SPring-8を広く世界に知らしめることもできた。そして92年に神戸で開かれたシンポジウムで、アメリカのAPS所長と上坪は、欧州のESRFを含めた3極協力を進めることに合意した。94年1月にはグルノーブルで第1回3極ワークショップが開かれ、3所長が協定書に署名した。3者は協力と競争の関係を維持して、高輝度X線利用研究の発展に大きく貢献してきた。

### 第3節 世界最高性能への挑戦から供用開始へ

SPring-8は、世界最高のX線輝度の実現のみならず、広い科学技術分野の研究に必要な光源特性においても最高レベルの性能を長期にわたって維持し、優れた成果を上げ続けることを使命として建設された。建設チームが立ち上げられたのは、理研が大型放射光施設計画推進を決めた1986（昭和61）年度後半。若い研究者・技術者が集められ、R&Dが始まった。87年度から放射光研究が予算化され、翌年度から開発研究を開始。大型放射光施設準備室内に利用系グループを設置し、高輝度X線の利用計画を策定し、そのための光学素子、検出器、測定装置

の開発を進めることになった。

89年にビームライン (BL)・光学素子の研究開発を開始した。ビームラインとは、リングの接線方向に放射光を取り出して実験を行う一連の設備・施設のことである。SPring-8には2016年現在、57本のビームラインがある。また89年には、大型放射光施設計画検討委員会で8GeVリング案が承認され、北村英男がSPring-8用の挿入光源として、30m長尺アンジュレータ（電子ビームを蛇行させて放射光を発生させる装置）を含む各種のアンジュレータデザインを提案した。

理研内部では建設体制へ向けて、上坪が大型放射光施設計画推進室開発グループ総括主幹に、植木龍夫が利用研究の主幹として生物物理研究室の主任研究員に、熊谷孝孝が加速器責任者としてプラズマ物理研究室主任研究員にそれぞれ就任し、90年に建設が始まった。93年には、北村と石川哲也がそれぞれ推進部長と客員主任研究員に就任して、挿入光源と光学素子などビームライン要素技術開発の指揮を執ることになった。軌道解析やビーム診断などの各構成要素に関しては、グループに分けてR&Dを進めた。

1994年度から、理研で基礎科学研究の一環としての放射光研究がスタートした。先行BLの設計・製作とともに挿入光源開発と基幹チャンネル部の設計・光学系開発を行う利用系研究開発と、構造生物学のための特定利用BL（理研BL）の開発研究が開始された。このころ、石川がX線BLの標準構成案を提案し、ほとんどの利用者からの要求が満足されることが明らかになった。同じく94年に、タンパク質構造解析用の垂直アンジュレータや、放射光パワーが抑制されて光学機器の損傷を低減できる「8の字」アンジュレータの開発が始まった。

95年1月、阪神・淡路大震災の翌日から開催された第4回国際アドバイザー委員会において、北村がSPring-8アンジュレータの基本戦略を発表した。ここで「真空封止アンジュレータ」が、委員であるJerry Hastings（当時BNL、現SLAC）、ミュールハウプト（当時ESRF、後にSLS）に強い感銘を与え、ミニポールアンジュレータをBNLの放射光施設に設置するきっかけとなった。7月には石川がマイクロ波物理研究室主任研究員に就任。この年から理研の放射光研究は、理研BLの建設（代表：植木）と構造生物学研究（代表：岩崎）の2本立てとなり、全部で10本の共用BLの詳細設計作業が開始された。特に、共同チームが分担して全BLを詳細に設計して標準化を行ったことが、後の多くのBL建設に大きな効果を発揮した。

このころ、すでに運転を開始していたESRFから共同研究の提案があり、ESRFは理研が製作した真空封止アンジュレータを組み込んで試運転を実施している。また、BNLに設置した周期長11mmの理研製真空封止ミニギャップアンジュレータの定常運転にも成功している。これらが契機となって、後にスイスのポール・シェラー研究所（PSI）との研究協力協定により、Swiss Light Sourceへの真空封止アンジュレータの設置につながった。さらに真空封止アンジュレータは、PLS（韓国）、DIAMOND（英国）、PETRA（ドイツ）、SOLEIL（フランス）、上海放射光施設（中国）などの中型規模放射光施設においても基本構成要素となるなど、世界の放射光技術に多大な影響を与えたのである。

また、蓄積リングに低エミッタンスの（つまり空間的な広がり小さな）電子ビームと多数の挿入光源を設置するにあたり、高い精度で磁石を並べる方法を考案し、一周1436mのリングを精密機械並みの精度で完成させた。この方法では、装置による熱発生や機械的振動や温度変動だけでなく、潮汐力によって周長が数10 $\mu\text{m}$ ほど伸縮しても、その微小変化を補正してビームを安定化させることができる。逆に言えば、数千kmも離れた場所からの地震波も検出できる。

96年8月に線形加速器の立ち上げ運転を開始、翌年3月には蓄積リングへビームを輸送。単体試験・総合試験を経て、電子ビームの蓄積に成功、偏向磁石からの放射光発生を確認した。10月の施設供用に向けてBLの試験運転も始まった。これらの要素技術と概念設計の進行に合わせて、SPring-8の光源戦略の再設定を行い、挿入光源は原則としてアンジュレータとした。

97年2月の放射線使用施設使用前検査に向けて、アンジュレータ（BL47XU）、偏向電磁石（BL02B1）の2本のBLで、設置、通線、インターロック試験の作業を実施。特にアンジュレータBLの設置は、その後の基礎となった。3月にはリングへ電子ビームが蓄積され、同時に偏向電磁石BL（BL02B1）で放射光発生を確認した。8月に姫路で放射光関連では最大の国際会議である「SRI97」が開催され、ホストを務めたSPring-8には300名を超す見学者が訪れた。

10月1日に理研自らが放射光施設を利用する研究を実施するために播磨研究所を開所し、6日に10本のビームラインで供用を開始した。この時選定されていた利用研究課題は134件である。それまで専ら共用BLの建設に従事してきた物理系でも、SPring-8の最先端能力を引き出すためのBLが必要との議論があり、将来の長尺化をにらんだアンジュレータBL（BL29XU）の建設に着手した。

98年度にはBL建設ラッシュを迎え、理研BLとしては、30m長直線部を用いたアンジュレータBL（BL19LXU）の建設、BL29XUの1km化、共用赤外BL43IRの建設が認められた。短期間の建設で共用運転と並行していたため困難が予想されたが、最初に行った標準化・規格化が功を奏して、全ての建設を予定どおり完了した。世界最高の光源からの光を処理するビームライン光学系にも、さまざまな世界最高技術が駆使されている。

SPring-8にしか存在しないもののうち、特に1kmのBLでの硬X線のコヒーレンス度や、27mアンジュレータBLでの光束密度の高さは、世界中の研究者を驚嘆させ、さまざまな希望が世界各地から舞い込んできた。欧米施設と比較してSPring-8を利用している海外研究者が口をそろえて指摘することは、ビームの安定性と光学機器の再現性の高さである。これらは、加速器運転とBL機器の両方が密接な協力により高度に安定化されて初めて達成されるものであり、放射光供給システムの性能の高さを物語っている。

ビームラインの増加とともに課題数も増加し、大学、国立研究機関、公益法人、特殊法人、民間、海外大学・研究機関など多くの人々に利用されている。また、特定の機関が自らの研究活動等のための専用ビームラインも設置しており、兵庫県、産業界、大学、メーカーなどが利用している。研究分野で言えば、物理学、地球科学、化学、生物学の基礎科学から、電子工学、材料工学、生命科学、環境

科学など幅広い科学技術分野の研究開発において、重要な役割を果たしてきている。さらに、産業利用の成果の中には、すでにSPring-8の利用により技術的なブレイクスルーが成しとげられたものも多い。また、犯罪捜査あるいは刑事事件の事実関係の解明にも使われ、社会的な貢献もしている。

初期の成果で特に輝かしい例は、眼の網膜で感じた光の情報を視神経に伝達するタンパク質「ロドプシン」の分子構造を世界で初めて明らかにしたこと、また、地球マントル内物質の構造の解明、あるいは自動車排気ガス触媒に革命をもたらすインテリジェント触媒の機能解明などが挙げられる。このように、SPring-8は、新しい展開を図るわが国の科学技術研究開発にとって、最も重要な研究基盤施設となっている。

## 第4節 2005年以降の発展

**88年史**に記述されて以降、2005（平成17）年から2016年現在までに注目すれば、播磨におけるハイライトは、X線自由電子レーザーSACLAの整備と供用開始である。これはわが国の科学史上のみならず、世界のレーザー開発史においても燦然と輝く成果である。ここでは、SACLA整備開始の1999年からの流れを中心に、2005年以降のSPring-8の発展についても触れる。

理研は2003年にそれまでの特殊法人から独立行政法人に転換された。SPring-8の共同運営相手である原研は、核燃料サイクル機構と合体して日本原子力研究開発機構として独立法人化され、SPring-8の運営から手を引くことが決定された。これにより、理研がSPring-8全体の施設者としての責任を持つことになった。

翌2006年には、「特定先端大型研究施設の共用の促進に関する法律」（以下「共用法」）が改正された。それまでSPring-8運営のほとんどを指定機関として委託してきた高輝度光科学研究センター（JASRI）が登録機関となり、SPring-8運営は基本的に理研の責任で行うこととなった。理研内部では、独立行政法人となってからの第二期中期計画期間の2012年までは、播磨研究所を置いてそこがSPring-8運営に関する業務を担い、一方で放射光科学総合研究センターは、研究組織として、先端光源開発、先端利用研究開発、利用システム開発を行ってきた。

第三期中期計画期間が始まる2013年の事務機構改革において、播磨研究所が廃止になって播磨事業所に転換されたことに伴い、SPring-8施設運営は放射光科学総合研究センターが責任を持つこととし、また播磨では施設が研究に直結していることから、施設部門も実務のほとんどをセンターで行うこととなった。その組織図を図2に示す。

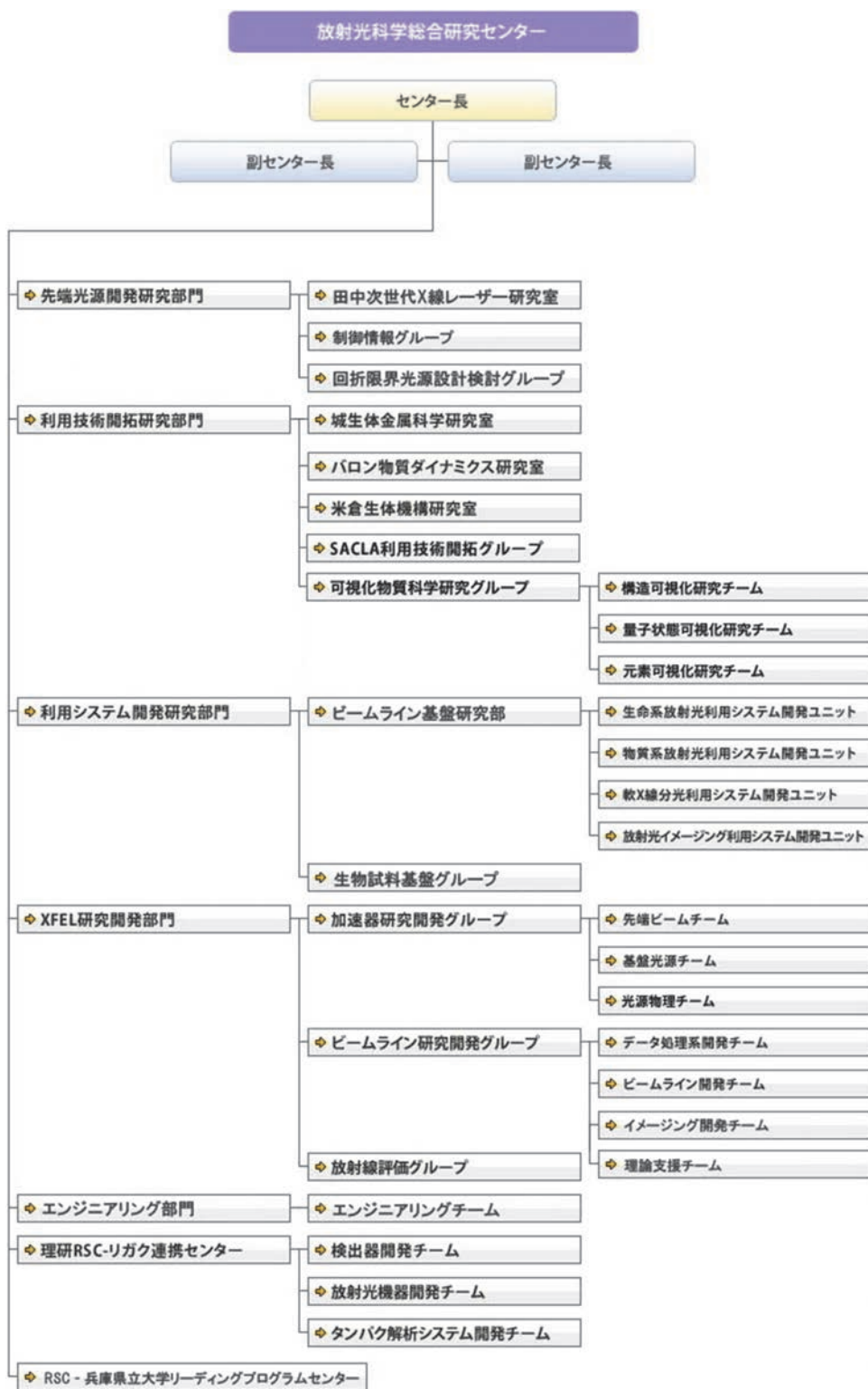


図2 放射光科学総合研究センターの組織図 2016年度



## 第5節 X線自由電子レーザー施設SACLAの建設

### 開発の端緒から完成までの概略

SPring-8には将来的に自由電子レーザー（FEL）を設置する可能性を考え、4カ所の長直線部が準備されていた。1998（平成10）年の補正予算で、そのうちの一つに長尺アンジュレータを設置することとなり、また普通尺のアンジュレータを光源とする1kmのビームラインを建設することになった。これらは、それぞれ2001年、2000年に完成したが、それを待たずして世界中の興味をひきつけ、アンジュレータの建設を担当した北村やビームラインの建設を担当した石川には、当時ドイツで計画されていたX線自由電子レーザー（XFEL）計画推進のためのワークショップへの招待状が舞い込んだ。

これはドイツの高エネルギー物理学研究の中心であるハンブルクのDESYで、電子陽電子リニアコライダー（線形衝突型加速器）を建設する計画があり、それに付属する形で、SASE（Self-Amplified Spontaneous Emission：自己増幅自発放射）型XFELを建設するというものであった。FELは1970年にメイデイ（John Madey）によって提案されたもので、原理的にはどのような波長の光でもレーザーを構成できる。しかし現実には、高反射直入射鏡が利用できない高エネルギー領域ではこの方式のFELは実現できない。

それに対し80年代半ばに、光共振器の代わりに非常に長いアンジュレータの中を光と電子を一緒に走らせると、コヒーレントX線を発生させることができるというSASE原理が提案された。これを用いてXFELを建設する計画がアメリカのスタンフォード線形加速器センター（SLAC）で策定されたが、DESYではアメリカに対抗する形での建設計画を始めた。

このワークショップはSPring-8にとって二つの歴史的意義があった。一つは、後にSACLAと名付けられることになるコンパクトX線自由電子レーザーを考え始めるきっかけを与えたこと、もう一つは、この会議によばれていたJianwei Miao（当時SLAC、現UCLA）と硬X線領域でのコヒーレントX線回折イメージングをSPring-8で展開するきっかけを作ったことである。DESYでのワークショップを契機として、真空封止型アンジュレータをXFELに使える、大幅な小型化が図れるのではないかという議論が始まり、SACLA開発の端緒となった。

すぐにコンセプトを作成し、翌2000年にベルリンで開催された国際会議SRI2000で公表すると、大反響をよんだ。2001年に理研内部でプロジェクトを立ち上げ、2005年までの間に1GeV線形加速器をベースとした軟X線FELを建設することをターゲットとした研究開発を開始した。ただし、当時の文部科学省内では「自由電子レーザー」という用語に対するマイナスイメージが強かったため、「線型放射光研究開発グループ」と名付けて研究開発を進めた。

2001年から要素技術開発を始める中で、線形加速器をさらに小型化するため、高エネルギー加速器研究機構（KEK）で、リニアコライダー用にCバンド（4-8GHz帯）加速管の開発を進めていた新竹積に応援を頼んだ。リニアコライダー

には、最終的に積分ルミノシティを得る点で有利な超伝導のLバンド（1-2GHz）加速管が採用された。従来のSバンド（2-4GHz）加速管の倍程度の加速勾配が期待できるCバンド加速管は、リニアコライダーには採用されなかったものの、X線自由電子レーザーのコンパクト化の重要な要素となるものと期待された。

その後、2002年に新竹は理研の主任研究員に就任した。2003年度末ごろまでには、主要な要素技術開発を終了し、実機製作が可能な段階に入っていた。そのような状況下で2004年に第三期科学技術基本計画での「国家基幹技術」の議論が始まった。このころには「自由電子レーザー」という言葉に対する文部科学省内のアレルギーも大方収まり、大手を振ってX線自由電子レーザーを名乗れるようになっていた。並行して、小型X線自由電子レーザーの原理実証を行うためのプロトタイプ機の建設を開始し、250MeV線形加速器による波長60nm領域のSASE型FELの詳細設計研究を実施した。

国家基幹技術の候補として、X線自由電子レーザー建設を提案することが決まり、6GeVの線形加速器と真空封止型アンジュレータの組み合わせで、波長0.1nmでのX線自由電子レーザーを目指すこととして概念設計書を作成した。国際レビューアの支持を得て、線形加速器のエネルギーを6GeVから8GeVにしてSPring-8へ入射することになった。一方で、プロトタイプの周期長15mmのアンジュレータには数々の問題点があったため、実機のアンジュレータは周期長18mmとすることになった。これらのパラメータ変更によって、最短波長は計算上0.06nmまで届くこととなり、先行していたアメリカのSLACのLCLSをはるかにしのぐこととなった。

#### サイト内のどこに設置するか

XFELをSPring-8サイトのどこに設置するかに関しては、さまざまな議論があった。700m以上の直線状の土地が確保可能なのは、西側の中尺ビームラインの脇か、南側の長尺台地のどちらかであった。西側の土地は、全体に切り土で地盤としては申し分なかったが、若干短いという問題点があった。それに対して南側の長尺台地はずっと盛土で、かなりの地盤補強が必要であったが、将来的な拡張性には富んでいた。また、長尺台地には、あと2本の1kmビームラインが建設可能であったが、XFEL建設によりその可能性を消すという問題があった。

最終的には拡張性を最優先し、長尺台地に建設することとなった。技術的に最も厳しい安定性が要求されるアンジュレータはしっかりと地盤上に乗せることを優先させ、台地先端側からSPring-8側に向かって電子を走らせることとし、アンジュレータホールは人工岩盤により基礎を補強することによって安定性を確保することとした。この一方で、線形加速器は地盤が必ずしも良くない盛土上に建設されることになったが、200本近いパイルを地下深くの岩盤まで到達させて建物を支えることで安定性を確保した。

当初の設計案では、線形加速器からの電子ビームを扇状に広げて実験ホールに入れる案が検討された。SASE原理に基づくXFELでは、100m程度の長尺アンジュレータの中を高エネルギー電子とアンジュレータ光が一緒に走る精度は数 $\mu\text{m}$

以内に収まっている必要がある。電子は磁場で軌道を調整することができるが、光は直進するので、そのため電子も長尺アンジュレータ内でほとんど直線運動させて光と重ねる必要がある。この調整を長期間安定に保つためにはアンジュレータを設置する建物に高度の安定性が要求されるのである。

### 国家基幹技術に選定される

2005年1月の日本放射光学会年会の最中に、国家基幹技術の候補に「コヒーレントX線光源」が含まれているという新聞報道があった。2月初旬に国際レビュー委員会を開催し、以下の3点の評価と勧告を受けた。委員はMarie-Emmanuelle Couprie (LURE)、John Galayda (SLAC)、Jerry Hastings (SLAC)、Kwang-Je Kim (APS)、Shin-ichi Kurokawa (KEK)、Won Namkung (POSTECH)、Jochen Schneider (DESY) の7名であった。

- (1)理研の計画は、大強度かつコヒーレントな短パルスX線の発生とその利用研究のための革新的なプロジェクトである。目指しているゴールは欧米のX線自由電子レーザープロジェクトと同様であるが、本計画はコンパクトな設計思想に加えて、世界をリードするX線放射光源SPring-8と同じ敷地で展開する点でユニークである。
- (2)このプロジェクトは、建設スケジュールとその技術的難度において野心的であるが、チームのメンバーには困難な課題に対して革新的な解決策を生み出してきたという実績がある。SPring-8において培われた加速器技術とX線科学の蓄積も重要な資産である。
- (3)委員会は本計画が提案されているスケジュールで建設可能であることを支持するとともに本計画の早期建設開始を勧告する。

日本放射光学会では4月に「次世代光源の将来像」と題する公開シンポジウムを開催し、KEK-PF、東大物性研、原研、理研からそれぞれ将来計画案が提案された。議論の結果、国家基幹技術としては理研の提案するX線自由電子レーザーが推されることとなり、議論の結果は最終的に同年9月に日本放射光学会から「次世代放射光源に関する考え方」と題するレポートとして公刊された。

2005年は2006年度の国家基幹技術としての概算要求に向けてさまざまな動きがあった。放射光学会シンポジウムの直後の5月に「X線自由電子レーザーシンポジウム」を開催し、計画全体のスキームを説明した。また、文部科学省に設置された「次世代放射光源計画評価作業部会」においても、概算要求に向けたさまざまな議論が行われた。8月にSLACで開催されたFEL2005国際会議で計画を紹介し、大きな注目を集めた。この結果、8月末に文部科学省から財務省に提出された概算要求の中に生き残ることができた。9月には科学技術総合会議での大型予算要求に関するヒアリングが実施され、11月のSPring-8シンポジウムでは、SPring-8ユーザーに向けてX線自由電子レーザーの紹介を行った。そして12月の財務省予算案に載った。

### 予算要求作業とプロトタイプ機的设计

2005年には、硬X線自由電子レーザーの予算要求作業と並行して、プロトタイプ機の建設を進めた。これは、研究開発開始時には1 GeV線形加速器による軟X線自由電子レーザーとして構想されたものであったが、硬X線マシンの建設が見えてきたこともあって、より簡単に原理実証試験を行うことを目的とする250 MeVマシンに変更された。2004年までにさまざまな準備は進んでいたものの、2005年に最終的な予算措置がされることとなり、建設が開始。新竹の設計に基づくプロトタイプ機は大竹雄二をリーダーとする建設チームによって組み上げられ、ハードウェアとしては2005年8月末にいったん完成した。

その段階で試験調整運転を開始し、電子ビームは11月25日に開通したが、レージング（レーザー発振）は構成要素トラブル等によって遅れ、2006年度に入ってから田中均をリーダーとする運転チームの努力によって波長49 nmでのレージングに成功した。これより、各構成要素および全体の設計思想の正しさが証明され、硬X線の実機建設に進むこととなった。このプロトタイプ機はSCSS試験加速器とよばれ、極端真空紫外領域のユーザーに開放され、原子分子の物理化学研究を中心に多くの成果を上げた（SCSSはSPring-8 Compact SASE-FEL Sourceの略）。

### 建設の正式スタートは2006年度

2006年度に8 GeV硬X線自由電子レーザー建設が正式にスタートした。予算要求段階でかなり切り込まれたことと、6 GeVから8 GeVにエネルギー増強するための経費が満額では認められなかったために、大型施設建設時によく行われるプライム・コントラクター（元請け業者）と契約して細かいエンジニアリング（技術設計）を任せて下請けにおろす、というやり方ができず、理研で全てのエンジニアリングを取り仕切るようになった。

このため、プロジェクト全体の統括を石川が担当した上で、SPring-8加速器建設を取り仕切った熊谷を加速器建設の総責任者に任じ、加速器要素開発（新竹）、アンジュレータ開発（北村）、ビームライン開発（石川）、事務統括（木田）の体制で建設プロジェクトを進めることとなった。プロジェクト初年度である2006年度は、ほとんどが設計作業と契約準備作業に追われた。加速器の詳細検討の結果、電子ビームを扇状に広げるとその品質が劣化しレーザー発振が困難になることが分かり、曲げた電子を曲げ戻し、平行な5本のアンジュレータライン設置を可能とする設計案に変更され、それに伴って建屋の設計も当初案とは変更された。

国家基幹技術としてのプロジェクトの進行では、定期的に一般向けの進捗報告を行うことが要請されたので、2006年11月に「第1回X線自由電子レーザーシンポジウム」と題してシンポジウムを東京で開催、以後も定期的に報告会を行った。

2007年3月に加速器建屋関係の契約が締結され、2009年3月完成予定で、加速器棟とアンジュレータ棟の建築工事が進められた。一方で、加速器コンポーネ

ント（構成要素）の発注作業が進行し、全コンポーネントを2010年中にそろえ、2011年初頭から調整運転に入るスケジュールが立案された。この年は新光源計画が立ち上がったということで、加速器科学研究会、分子科学フォーラム、原子衝突研究会、茅コンファレンス、強光子場懇談会などの国内学会で、プロジェクト概要説明を求められたのと同時に、幾つかの国際会議でもプロジェクト紹介を要請された。

### SPRING-8供用開始10周年と日米欧のXFEL協力

2007年度当初にも国内外の多くの会議で、プロジェクト紹介を求められたが、6月には国家基幹技術として、経団連でのプロジェクト概要説明を要請された。7月には、長尺台地での杭打ち工事が開始。地下深くの岩盤層まで届く穴を掘削し、その中に穴の深さに合わせた鉄筋を挿入した上で、コンクリートを流し込むことによって、加速器棟を岩盤から支えるピラーが作られた。

2007年10月には、プロジェクトの進行状況を広報するための「X線自由電子レーザーニュース」第1号を発行し、プロジェクト完成直前の2010年12月に発行された第11号まで、時々刻々の状況を伝え続けた。

このころ、Sバンド、Cバンド加速管は電源部を除いて製作工程に入り、量産が始まった。電源部も、試作機での試験検討を進め、量産機に向けての仕様確認作業が続けられた。

同年同月、大型放射光施設SPRING-8供用開始10周年を祝うシンポジウムが播磨で開催され、その第2部として「第2回X線自由電子レーザーシンポジウム」が開催された。当時X線自由電子レーザー施設整備を進めていたSPRING-8、アメリカのLCLS、ドイツのEuropean XFELの3施設間で、情報交換と研究協力を促進するための「X線自由電子レーザー3極ワークショップ」を立ち上げ、その第1回を播磨で開催した。このワークショップは、その後スイス、韓国を加え「X線自由電子レーザー5施設協力ワークショップ」に変貌したが、2016年時点でもなお引き続き開催されている。

2008年1月に発行された「X線自由電子レーザーニュース」第2号には、マシン収納部床部の配筋工事の様子や光源収納部での基礎地盤改良工事の様子が紹介されている。本プロジェクト中で最も高い安定性が要求されるアンジュレータが収納される光源収納部は、地下深くの岩盤まで表土を取り除き、碎石層で置換することによって地盤改良を行った。このころCバンド用のクライストロン（マイクロ波用真空管増幅器）一体型モジュレータ（変調器）の試作機や、アンジュレータの試作機が納入され、量産に向けての試験研究が進められた。

### 温度の急激な変化を避ける工夫

2008年1月に「第3回X線自由電子レーザーシンポジウム」を東京で開催し、石川と熊谷がプロジェクトの進行状況を説明した。また、3月には「X線自由電子レーザー利用ワークショップ」が開催され、利用研究を考えているユーザーから要求性能を聞いた上で意見交換を行い、ビームライン整備の方向性を定めた。

また、利用を開始したSCSS試験加速器での成果に関する報告も行われた。

2008年に入ると建屋建設工事は着々と進行し、マシン収納部では、トンネル部の壁と天井の躯体工事が実施された。また、光源収納部の地盤改良工事がほぼ終了し、建物建設が開始された。

XFEL用線形加速器では、可能な限り温度変化を小さくして電子ビームの性質を安定化させることが要請された。特に、温度の速い変動に加速器パラメータの変化を追従させることは困難であったため、加速器トンネル内に熱源を持ち込むことをできるだけ避け、加速管等の熱発生箇所は可能な限り局所的に水冷することによって環境温度変化を抑え込むことにした。また、コンクリート製加速器トンネル内には空調を入れることをせず、外側を覆った鞘堂さやどうの中に入れることによってトンネル内の温度を一定に保つ方式を採用した。トンネル内の蛍光灯照明も熱源として電子ビームに影響を与える可能性があるため、運転時には消灯することを決めた。

2008年度にはマシン収納建屋と光源収納建屋の建設工事を完了した。一方で、この年に実験・研究棟とSPring-8へSACLAの線形加速器からの入射を行うための、電子ビーム輸送系トンネルの建設工事を開始し、それぞれ2010年、2009年に竣工した。

### 機器の製作

建物関連の工事が順調に進む一方で、機器製作も着実に進められた。2006-2007年で入射器機器を製作し、試験運転を始めた。線形加速器機器は員数が膨大であり、2006-2010年のプロジェクト期間全体にわたって製作が行われたが、2010年秋にはほぼ全体がそろい、組み立て調整工程に入った。一方で、アンジュレータを含む光源・ビームライン機器（図3）は2008年に整備を開始し、2010年度までの3年間で全ての整備を終えることとした。

この段階で、X線二結晶分光器が配備されたX線ビームラインの設置を決定し、その準備を進めたことと、運用開始時にすぐに稼働できるX線画像検出器として、マルチポート読み出しCCD検出器を選定した。この開発が、後に驚異的なスピードでのレーザー・コミッショニング（動作立ち上げ調整作業）へとつながった。



図3 SACLAの電子銃（左）と加速器（右）  
電子銃から放出された電子が、加速器で光速近くまで加速される。

また、2008-2009年には電子ビーム輸送系と電子ビーム制御系の機器整備が行われた。アンジュレータ機器やビームダンプ（電子ビームの向きを変えて廃棄する装置）などの光源収納建屋に入る機器も、2010年末ごろまでには設置を完了し、ビーム試験を待つことになった。

2009年の初めには英国リバプール大学とドイツ・マックスプランク研究所でXFELの紹介セミナーが開催された。またアジア・オセアニア地域での利用を促進するために、アジア・オセアニアXFEL利用セミナーを企画し、第1回を韓国・済州島で開催した。このセミナーは韓国のコミュニティに大きな感銘を与え、韓国が浦項にXFELを建設する計画を作るきっかけを与えた。

年末には、台湾からの強い要望によって第2回アジア・オセアニアXFEL利用セミナーを南部の壟丁で開催した。その後、第3回を北海道、第4回をオーストラリア・ケアンズ、第5回を韓国・慶州と引き継がれ、日台韓豪から多数の参加者を得てXFELサイエンスの普及に貢献している。また、中国本土からの参加者もあり、上海での軟X線自由電子レーザー建設計画にも影響を与えている。

2009年には、当初の計画案からは落ちていたSPring-8とSACLAのビームを、同じ試料に照射するための建屋建設が始まった。これは後に大阪大学と協力してハイパワー（高出力）レーザーの整備を行い、ハイパワーレーザーとXFELを組み合わせた高エネルギー密度サイエンスを展開していくための拠点となった。2011年に入ると高周波系のエージング（ならし運転）作業等、線形加速器の立ち上げ作業が始まった。

## 第6節 SACLAの加速器調整、レーザー発振、高度化

### ビームコミッショニング

試験加速器による実証試験により、当初想定された課題のかなりの部分が検証され、未解決の問題として残ったのは次の四つであった。

- (1)調整を積み上げる加速器の再現性と精密調整を可能とする加速器の安定性の確保。
- (2)電子集団のバンチ（かたまり）を3000倍に圧縮できるスキームの開発と圧縮後の電流分布計測システムの開発。
- (3)調整を効率的に進めるためのビーム制御系の構築。
- (4)100mを超えて設置された多数のアンジュレータ装置が、一つの長尺アンジュレータとして機能する精密調整法の確立。

結論を言えば、これら4項目もSACLAのビーム調整開始までには全て解決されたのであった。

SACLAのビームコミッショニングは、約4カ月にわたるRF（無線周波数）機器の高出力コンディショニング（高出力状態に対処する条件整備・調整）を経て、2011（平成23）年2月21日から開始された。ビーム調整は、電子ビームを最終

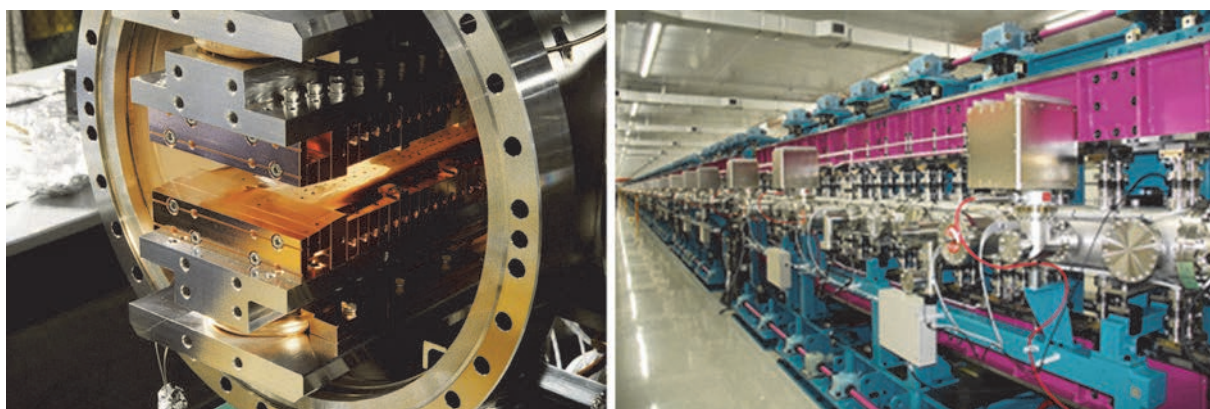


図4 SACLAの真空封止アンジュレータ（左）と、それが並んだアンジュレータホール（右）  
加速された電子がアンジュレータ内で曲げられ、光を放出する。

ビームダンプまで加速し、システムの基本性能の確認を行う「初期調整」と、レーザー増幅を目指した「精密調整」の二つの段階に分けられた。

初期調整は、3月中のフルエネルギー加速達成とアンジュレータからの自発放射の確認とを目標にして進められた。電子銃（図3に加速器と共に示す）の健全性を確認する引き出し電子ビームの規格化エミッタンス計測からスタートし、試験加速器で確立した手順に従って、第一圧縮器までの加速器パラメータを設定した。そして3月23日に、7.8GeVまで加速した電子ビームをBL1の最終ビームダンプまで導いた。同日、電子ビームの出射をBL3ビームダンプに切り替え、アンジュレータ（図4）のギャップ（間隔）を閉めて0.8AのX線自発放射光を確認したが、この段階ではレーザー増幅は得られなかった。

#### レーザー増幅初観測までの調整作業

次の「精密調整」の第1ステップとして、ビーム位置モニター等のビーム診断系を立ち上げ、レーザー増幅可能な高輝度電子ビーム生成に向け調整を進めた。ここで最初の試練として、SCSS試験加速器の運転では経験しなかったコヒーレント遷移放射光（COTR）に遭遇したのである。COTRは電子ビームのパンチ内に生じる密度変動によって生まれる可視光放射で、第3パンチ圧縮器以降、極めて強いCOTRが発生し、ビームプロファイルが計測できない状況となり、電子ビームの精密調整を進められなくなった。

すぐに実施できる対策としてビーム特性診断エリア内のOTRスクリーンをCe:YAGスクリーンに交換し、蛍光とOTRの角度発散の違いを利用して空間マスクでCOTRを取り除く改造を行った。これにより、圧縮後のビームサイズ、電子ビームの電流分布、射影エミッタンス計測が可能になり、3段のパンチ圧縮システムのビーム調整を、5月初旬までになんとか終わることができた。

第2のステップはアンジュレータビームラインの精密調整であるが、予定していたアライメントアンジュレータ（調整のためのアンジュレータ）のX線を用いるアンジュレータラインのプレアライメント、さらに電子ビームを用いたアンジュレータラインのBeam-Based Alignment（BBA）は、共に失敗に終わった。



これが二つ目の試練である。現場で議論を重ね、「アンジュレータの自発光をプローブとしてアンジュレータラインのBBAを行う」という代替案で調整を進める決断をした。

K値（加速器の加速能力を表す数値）の精密調整ならびに高さ調整を順次行った後、各アンジュレータの自発光を、上流から1台ずつ、100m以上も下流に置かれた2次元検出器上の目標点に、入り口のステアリングで導く操作を繰り返し、アンジュレータラインの軌道設定とアライメントを実施した。アンジュレータ間に置かれた位相器の設定は、計測ベンチでの磁場測定の結果から決められた。最後に、狭ギャップアンジュレータのインピーダンスによる電子ビームのエネルギーロスを、自発光の波長シフトにより計測するなどして、SASEによるレーザー増幅の初観測へ向けた加速器の調整は全工程が終了した。

当初予定より2日遅れの6月7日に、レーザー増幅の初観測に再び挑戦することになった。電子ビームのエネルギーを7GeV、ピーク電流を約3kAに設定し、上流から1台ずつアンジュレータギャップを約4mm（K値で1.8）まで閉めていった。7、8台のアンジュレータギャップを閉めたあたりから自発光の中にボヤッとした構造が見え始め、さらに閉めていくとレーザーの輝点が常時見えるようになった。さまざまな困難を乗り越えて、ビームコミッション開始からわずか100日でレーザー増幅達成に至るといふ快挙を成し遂げた瞬間であった。

### レーザー強度を高める努力

このSASEによるレーザー増幅の初観測以降は、レーザーの強度を高めるようパラメータの調整を進め、レーザー強度は夏前には30-40 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ まで上がったものの、夏期停止前にはレーザー出力飽和に至らなかった。

レーザー強度を広い波長範囲で増大させる計画として、多段のバンチ圧縮システムにわたり、エネルギーチャープ（電子ビームの先頭から後方にかけてエネルギーが徐々に変わっていくこと）と、電子ビームエンベロープ（包絡線）の最適化を進めた。まず、正しいビームエミッタンスが評価できる測定手法の確立を目指して誤差低減に取り組んだ結果、精度の高い射影エミッタンス（この値が小さいほど電子ビームの性質が良い）計測が、2011年の秋に初めて可能になった。

バンチ圧縮器BC1から順次BC3に向かって、RF加速位相をビーム誘起法（空洞に入ってくる電子ビームの誘起電磁波の位相を検出し、入力RFの位相をビーム基準で設定する手法）で設計値に合わせ込み、収束パラメータと軌道補正を各段バンチ圧縮後の電子ビームの射影規格化エミッタンス（射影エミッタンスに対して電子ビームのエネルギー変化による補正を入れたもの）が、 $1\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$ 前後となるように調整を重ねた。これを3段のバンチ圧縮を経て維持し、ピーク電流を3kA以上に引き上げることに初めて成功した。

これにより、アンジュレータラインのBBAを実施する基準エネルギーにおいてレーザー強度が格段に向上し、100 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ を超え、レーザーパルスのエネルギーがサブミリジュールの領域に突入した。ところが、電子ビームエネルギーを変化させるとレーザー強度が減少するという不可解な事態に直面した。調査を重

ねた結果、アンジュレータビームラインの軌道補正のプロトコルに問題があることが分かったため、ギャップ駆動用補正以外はアンジュレータビームラインのステアリングを一切使用しないことにした。これにより、ようやく広い波長範囲でレーザー強度を上げられるようになった。

2011年の10月にはレーザー出力の飽和を達成し、パルスエネルギーとして、波長0.12nmにおいて0.15mJ、0.23nmで0.5mJを得た。2012年3月からのユーザー運転に向け、長期的なレーザー運転を可能とする安定化やアンジュレータラインのBBAなど、定期的に行う各種調整の合理化と自動化等を進めていった。ユーザー運転開始時点でのSACLAの性能は、レーザー利用波長範囲は0.08-0.3nm、空間干渉性はほぼ100%、レーザー強度がsub-mJ/pulse (0.12nmの波長で約0.2mJ/pulse)、ピーク強度は10GW以上、レーザー繰り返し周期は10Hzであった。

### 早めに立てた高度化計画

ユーザー運転開始以降の加速器高度化については、SPring-8建設時の反省を生かし、ユーザー運転開始直後に加速器システムの短・中・長期の高度化計画を策定した。主要な項目は以下の六つである。

#### (1)レーザーの安定化：

比較的早い強度や位置の比較的速い変動と、長期の加速器パラメータのドリフト（時間に伴ってずれていくこと）、加速器RF機器のトリップ（過電流による遮断）の三つが課題であった。

2014年に干渉計とストレッチャー（パルス幅を伸ばす装置）で構成されるファイバー長制御システムを導入し、温湿度変化が極力小さくなるよう空調制御や温湿度安定化対策を実施した結果、レーザーの安定性は格段に向上した。

パラメータのドリフトは依然として残ったが、2016年春に、電子銃から電子を放出させるための電流（エミッション電流）を一定に制御するフィードバックを導入して、電子ビームの時間分布の維持を図ったところ、長時間ドリフトが大幅に改善された。

加速器のトリップの低減や停止時間の短縮は、サイラトロン（大電流の開閉器）の不安定性の除去とその制御方式の最適化、長寿命化、交換時間の短縮化などの改善により、2015年には、平均停止間隔はレーザー繰り返し30Hzにおいて1時間以上まで長くなった。

#### (2)レーザーの再現化：

ユーザー運転当初は、長期停止期間の際に実施する電子銃カソード交換後のレーザーの再現が難しく、レーザー強度をピーク性能の70%程度まで引き上げるまでに、数カ月を要することもあった。

短期間にカソードのみを交換してレーザーの再現化を実施した後、長期停止期間に加速器システム各部に手を入れるという分離方式を採用することによって、パラメータの不整合を単純化でき、長期停止後のレーザーの再現化がスムーズに行えることが分かった。2014年度冬からこの方式でカソードを交換するように

なり、長期停止期間後のレーザーの立ち上げ、レーザー性能の再現がスムーズに行えるようになった。

(3)レーザー強度の増大：

レーザーの安定化が進むにつれて、パラメータとレーザー強度の相関が明確になり、加速器パラメータの最適化が進んだ。

レーザーのパルスエネルギーは0.12nmの波長において、2012年3月に0.2mJ、2012年10月に0.3mJ、2013年9月に0.48mJ、2014年5月に0.63mJ、2016年4月に0.67mJと順次引き上げられていった。他の波長範囲でも同様の割合でレーザー強度の増大が達成された。

(4)定格60Hzレーザーの繰り返しの実現：

ユーザー運転の開始時は10Hzであったが、加速管のコンディショニングの進展に伴い、2013年5月に20Hzに、11月に30Hzに引き上げられた。

しかし、60Hzの定格まで安定なレーザー運転を実現するには、クライストロン変調電源の熱対策と熱電子銃カソードの長寿命化が必要になった。このため2013年ごろから冷却強化に取り組み、2015年から順次改修を進め、2016年の秋には全数のインバーター方式の高電圧充電器（インバーターチャージャー）の改修の完了を迎える。

カソードの寿命は、エミッション電流を低減することで60Hz運転において必要とされる半年の寿命を当面確保した。ユーザー運転開始時に1.2Aあったエミッション電流は、レーザー強度を引き上げながらパラメータを最適化することで、最終的には0.47Aまで低減された。並行して、カソードの長寿命化に向けた恒久対策を実施するため、電子銃のテストベンチ（設計が妥当かどうかを検証する環境）の構築を進めた。テストベンチは2015年度に完成し、2016年春からカソードの改良に向けたビーム試験がスタートしている。

(5)レーザービームラインの拡充：

2012年3月から中央のBL3硬X線ビームラインではXFELを、BL1広帯域自発放射ビームラインでは短パルス自発放射光の提供を始めた。

増大する実験ニーズに応えるため、2本目の硬X線レーザービームラインとしてBL2の整備を2013年度から開始し、2014年の夏期停止期間で加速器終端から実験ハッチまでのシステム全てを完成させ、秋からビーム調整を開始、10月21日にレーザー増幅の初観測に成功した。その後も順調に調整を進め、2015年4月からBL2のユーザー利用が開始された。

当初は、BL2とBL3の一方を選択する切り替え運転として運用がスタートしたが、加速器終端に設置されたビーム振り分け電磁石をDCから高精度パターン駆動に改修し、2015年7月にはパルスごとの複数ビームライン（BL2・BL3）レーザー振り分け運転を世界で初めて達成、以降はこの運転モードが利用実験に提供可能となった。

一方で短パルス自発放射光を提供していたBL1を、短波長のレーザーを提供するBL2・BL3と独立に運転可能な軟X線FELとするための改造を、2014年度から開始した。シャットダウンしていたSCSS試験加速器の一部をSACLAの光源棟

内のBL1上流部に移設し、エネルギーを500MeVまで引き上げる改造を行い、2015年夏にその工事を完了した。同年秋からSACLAの運転と並行してビーム調整を始め、10月には波長30nm付近においてレーザー発振を確認、その後の調整運転も順調に進展している。

改修後のBL1における最初のユーザー実験が2016年7月に実施された。夏期停止期間には、エネルギーを750MeVまで増強するための加速システムの追加工事が行われ、10月には10nm領域までのレーザー波長の短波長化が実現された。

(6)レーザー性能の高度化：

BL3のレーザーをより安定かつシャープなスペクトルを持つ高輝度レーザーとするため、シード化という改良が2012年から検討された。

同年夏に透過型の自己シードシステム（上流で生成した光を単色化して種光として下流で増幅させる）を構築するため、BL3の上流から9番目のアンジュレータセグメントを撤去し、そのスペースに小さな電子ビームの遅延回路となるシケイン（電子を迂回させる装置）を設置した。このシケインを有効活用し、2012年秋には、上流のアンジュレータ群（最大8台）と下流のアンジュレータ群（最大11台、現在は13台）のK値を変え、遅延部で最大40fsの遅延を付けた2色（二つの異なる波長）のXFELを安定的に生成することに成功した。波長は電子ビームエネルギーにより任意に設定でき、二つの波長差はK値の違いにより最大30%程度変えることが可能である。この2色XFELは2013年秋以降ユーザー実験に利用されている。

一方、自己シードシステムは2013年の夏に設置され、その後、安定な自己シードXFELの生成を目指し、ビーム実験が継続されている。

## 第7節 SACLA利用研究の推進

### SCSS試験加速器の整備

SACLAの成果は、2012（平成24）年3月に利用運転を開始して以来、目覚ましいものがある。ここでは、まずその前史として、SACLAのプロトタイプ機として建設されたSCSS試験加速器のビームライン整備と、利用研究のあゆみから振り返ってみたい。

SCSSは、加速器トンネルの整備、機器の据え付け、RFコンディショニングを経て、電子ビーム調整を2005年11月に開始した。11月末には、約70MeVのビームエネルギーにおいて、最初のアンジュレータ放射を確認した。翌年5月から、レーザー増幅に向けた本格的なビームコミッショニングを開始し、さまざまな試行錯誤を経て、6月20日にレーザー増幅の初観測に成功した。さらに、システムの安定化に取り組み、2007年9月には極紫外（EUV）の50-60nmの波長領域において、FEL光の出力の飽和状態を初めて実現した。これらの結果は、2008年の*Nature Photonics*誌に報告された。

このビームコミッショニングにあたり、加速器の最下流に光診断ビームライン

を設置し、自発光やFEL光の6次元位相空間における特性診断を行った。この試みを通して、光診断は、光を利用するという目的にとどまらず、電子ビームの状態を精密に観測するプローブとしても極めて有効であり、加速器運転条件の最適化に大きく貢献することが新知識として得られた。この知見は、XFELでは加速器とビームラインの密接な関連が重要であることを意味し、後のSACLAのビームライン設計やコミッショニング戦略の策定においても、極めて重要な指針を与えたのである。

一方で、SCSSの運転の成功によって、利用においてもXFELの先行研究を実施する可能性が開かれた。実際に、2007年の10月には、文科省XFEL利用推進研究課題（XFEL推進課題、2006-2010年度）の下、東京大学の山内薫らが、SCSSトンネル内で試行実験を実施し、初めての利用成果を得た。本格的に利用研究を行うために、2007年に独立の建屋としてEUV実験棟の建設を開始し、2008年度からSCSSの利用運転を開始した。原子分子光学（AMO）分野を中心に多くの成果が生み出されると同時に、光学レーザーとのポンプ・プローブ手法など、SACLAにつながる基盤的な利用技術開発が進められた。

また、フルコヒーレントのFEL光を得るために、高次高調波（HHG）をFELのシード光として利用するシードFELのR&Dが行われた。2008年には、フランスのCoupric博士のグループと共に160nmのシードFELを実現した。その後も、内外のグループと協力しながら整備を継続し、2010年には、シードFELとして当時世界最短波長となる61.2nmにおける発振を達成した。

このように、SCSSは、その使命を十二分に達成し、2013年5月にはいったん運転を停止したが、2014年度の補正予算にて、SACLAアンジュレータホールへ移設し軟X線FEL専用の加速器として再利用されることが決まった。このプロジェクトも、ビームライン拡充の際に述べたように、計画どおり実施され、2016年度から利用運転に供されている。

### SACLAビームラインのデザイン

このSCSSの建設・利用と並行して、SACLAのビームラインシステムの設計・建設が進められた。2000年代初頭の、SPring-8の1kmビームライン（BL29XU）および25mアンジュレータビームライン（BL19LXU）における先行研究により、SACLAのようなコヒーレントX線の照明下では、スペckル（粗面での散乱による斑点模様）を抑制するために、X線光学素子に極めて高い品質が求められることが判明していた。

このため、さまざまな技術開発が行われた。特に、大阪大学の山内和人らは、XFEL推進課題の下で、超精密表面加工技術のElastic Emission Machining（EEM）プロセスならびに計測システムの高度化を推進し、長さ40cm以上という大型のミラーに対しても超高精度加工を実現した。

これらの要素技術に基づき、矢橋牧名、大橋治彦、後藤俊治を中心に、SACLAビームラインの基本構想が策定された。諸外国のXFEL施設と異なり、基幹光学系を光学ハッチに集約し、効率の良い運用と高度化を可能とすること、また、

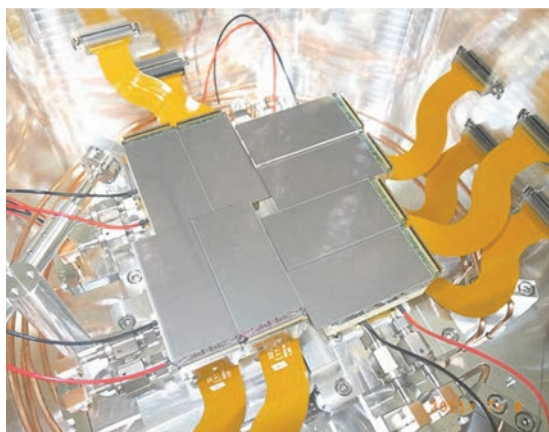


図5 マルチポートCCD検出器

ショットごとの光診断系を要所に配置し、利用実験への情報提供とともに、加速器運転へのフィードバックを図ることが盛り込まれた。検討結果は、2008年6月にビームラインデザインレポートとしてまとめられた。また、成果創出のために極めて重要となる高性能のX線検出器のために、初井宇記を中心に、SACLAの繰り返し周波数である60Hzでの高速読み出しが可能なマルチポート（MP）CCD検出器（X線2次元検出器）の開発が進められた（図5）。

### ビームライン調整作業

SACLA加速器と同様に、実験研究棟やビームラインの建設も順調に推移し、当初の計画どおり2010年度に完成した。この結果、2011年4月から開始されたSACLAの本格的なビームコミッショニング、特にアンジュレータの精密アライメントにおいて、ビームラインを十二分に活用することが可能となった。このことは、第5節・第6節でも述べたように、わずか2カ月後の同年6月に達成されたファーストレージング（図6）、およびその後の加速器運転の最適化において、決定的な貢献を果たすことになった。

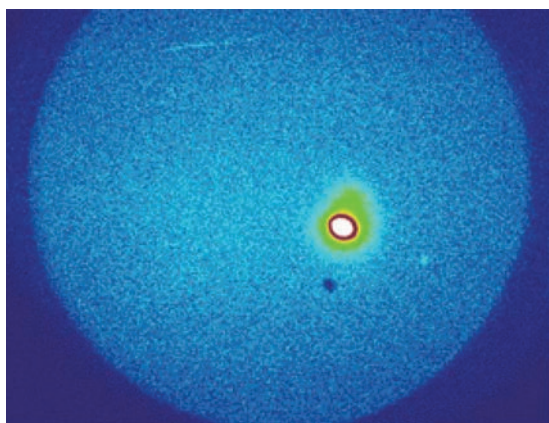


図6 SACLAでの初めてのレーザー発振

加速器のコミッショニング（調整作業）と並行して、2011年度には、ビームライン・実験ステーションの

コミッショニングも実施された。特に、XFEL推進課題等で構築された利用装置コンポーネントの実機化とコミッショニングを行うため、「SACLA利用装置提案課題」を実施し、国内の大学・研究機関を中心にした先進的な利用者の協力を得ながら、利用環境の整備を進めた。また、SPring-8とSACLAを、同時に使うため、2009年から建設が開始された相互利用実験施設の整備も急ピッチで行われ、2012年初めには利用の準備が整った。

### 世界初、硬X線原子レーザーを実現

このようにさまざまな積み上げを経て、計画どおり2012年3月より、SACLAの利用運転が開始された。XFEL光の特徴は頭では理解していても、いざ本物を見るとやはり従来とはまったく別物の光であり、さまざまな試行錯誤があったが、一つ一つ問題を解決していくことで、その能力を引き出した実験が実現されていった。

さらに、当初の想定を超えた性能も明らかになってきた。一つは、先行する世界のマシンには見られない高い安定性である。ドイツにある真空紫外光の自由電子レーザーFLASH（Free-electron LASer in Hamburg）や、スタンフォード線形加速器センターにあるX線自由電子レーザーLCLS（Linac Coherent Light

Source) よりずっと安定していたのである。これは、コンパクトXFELの設計思想が有効に機能したことを意味している。

また、SACLAのXFELパルスの時間幅を評価すると、10フェムト秒を切るという見積もりが得られたが、これは先行するLCLSと比べても数分の1以下という極めて小さな値であり、サブミリジュールというパルスエネルギーを当てはめると、ピークパワーは数十GW以上という世界最高の値であることが分かった。

このような高性能のXFEL光に、大阪大学のEEM技術に基づく世界最高性能の集光ミラーを組み合わせて極小サイズの集光ビームを作ると、極めて高い強度が実現できるはずである。しかしながら、コンパクトな全長のSACLAにおいて、低発散角のXFEL光のビームサイズを大きくとることは困難であり、集光光学系の開口数 (NA) の制限によって集光サイズも小さく絞り込むことができなかった。

この問題を解決するために、集光光学系を二段に配置し、上流でビームを拡大し、下流で小さく絞り込むという「二段集光システム」が、大阪大学の三村秀和、矢橋らによって提案された。そして、上流光学系を実験研究棟、下流を相互利用実験施設に設置することで、XFELでは世界最小の50nmというビームサイズが達成され、 $10^{20}\text{W}/\text{cm}^2$ という世界最高強度のX線が得られた。

この光を使って、X線非線形光学研究のフロンティアが開拓された。理研の玉作賢治らは、ゲルマニウムK吸収端の2光子吸収を初めて観測し、また電気通信大学の米田仁紀らは、鉄のK吸収端の過飽和吸収を捉えた。さらに米田らは、SACLAの可変ギャップアンジュレータが生成する2色のX線パルスを利用して、銅のK吸収端に対し、一方を励起光、他方をシード光として用いることで、世界で初めて硬X線の原子レーザーを実現した。これらは、SACLAが最初期に達成したエポックメイキングな成果群として記憶されるべきであろう。

### X線構造解析の分野で成果

このような先鋭的な研究と並行して、幅広くSACLAを利用するための基盤的なシステムの開発も進められた。特に、XFELの大強度・超短パルス特性によって、計測対象を擬似的に「凍結」させた無損傷計測（より正確には、破壊前計測 (Measurement-before-destruction)）が可能になると提唱されていたが、このための汎用実験プラットフォームの一つとして、登野健介らがエンジニアリングチームと共に構築したのが「DAPHNIS」システムである。これは、試料を連続的に視野に投入しながら計測する連続フェムト秒X線構造解析 (Serial Femto-second Crystallography : SFX) を主な目的としたものであり、短動作距離でスタンドアロンの運用が可能な大面積のMPCCD検出器と、さまざまな試料インジェクタを装着可能な試料チャンバーとを組み合わせたものである。

このシステムをもとに、京大・理研の岩田想らによってSFX実験の立ち上げが精力的に行われ、ポンプ・プローブ計測を含むさまざまな構造解析研究が実施されるようになった。そして、岡山大学の沈建仁らにより、光合成の際に触媒として機能するタンパク質複合体「光化学系II (PS-II)」の無損傷かつ高分解能の

分子構造の決定が行われた。これはSACLAがもたらした極めて重要な知見の一つであり、持続可能社会実現の鍵を握る人工光合成の実用化に向けて、大きな一歩を踏み出したといえる。

#### ユーザー会議と産学連携

ユーザー層の広がりを受けて、SACLAユーザー協団体（SACLA UC）が、兒玉了祐初代会長の下、2012年に発足した。2013年4月には、「第1回SACLAユーザーズミーティング」が開催され、利用者、施設者を交えて、高度な利用や新しいサイエンスをいかに展開するか、活発な議論が行われた。

SACLAは、SPRING-8と同様に、高度な産業の振興にも大きく貢献すると期待されているが、その一方で、利用にあたって、新光源ゆえのハードルの高さは否めない。この壁を乗り越えて広く産業界の利用を促進するために、2014年度に、「SACLA産学連携プログラム」（2016年度より「SACLA産業利用推進プログラム」に改称）を開始した。これは、SACLAの利用に習熟した大学・研究機関の協力の下、企業の研究者に実際にSACLAを体験してもらいながら、産業利用振興に必要な調査研究を行うものである。本プログラムによって、産業界からもSACLAに強い関心が寄せられるようになり、2016年度からは、SACLAの成果専有利用も開始された（成果専有利用とは、課題審査が簡略化され、成果公開の義務がない代わりに、利用時間に応じたビーム使用料が課せられること）。

#### 高エネルギー密度科学

ところで、パルス的なXFEL光は、大強度の光学レーザーを利用した高エネルギー密度科学（HEDS）とのマッチングが非常に良い。SACLAにおいてHEDSを推進するために、阪大の兒玉らによって、相互利用施設に40TWレーザー、ナノ秒大出力レーザーというハイパワーレーザー群が導入された。次いで、2012年度の補正予算によって、500TWレーザー装置の整備が行われた。これらは、LCLSやEuropean XFELと比較しても高い競争力を持っており、大きな発展が期待される。

また、大強度光学レーザーは、プラズマベースの超小型電子加速器のドライバーとしての役割も期待されている。もしこのような加速器が実現すると、XFEL装置をテーブルトップスケールにまでダウンサイジングし、普及を一気に促すこととなる。この基盤研究開発を推進するために、内閣府の革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）の佐野雄二が中心となって、SCSS試験加速器が移設された後の組み立て調整実験棟において、レーザー加速実証機が建設されている。SPRING-8・SACLAで培われた加速器・ビームラインの堅牢な運転利用技術と、ハイパワーレーザーの最先端技術との融合により、今後の光科学分野への大きな貢献が期待される。



## 第8節 SPring-8の進展

### 加速器SPring-8の高度化

SPring-8の供用開始後、理研は原研、JASRIと協力しSPring-8の供用運転を行いつつ、蓄積リングを中心に加速器の高度化を進めてきた。その一つのトップアップ運転（電子を継ぎ足し入射して蓄積電流を制限値に維持する運転）は、田中らの努力によって2004（平成16）年5月から導入された。現在0.03%程度の電流変動に抑えられ、トップアップ入射時の軌道変動はほぼ利用側から見えないレベルで安定して運転が行われている。

また、2002年11月にはオプティクスの変更によって、エミッタンスはそれまでの $6\text{ nm}\cdot\text{rad}$ から $3\text{ nm}\cdot\text{rad}$ と約半分になり輝度が向上した。しかしながらこのオプティクスに変えたことにより、2003年10月に、電子ビーム廃棄時、入射部チェンバーに局所的に電子ビームが照射されたことによる真空漏れが発生し、しばらく $6\text{ nm}\cdot\text{rad}$ の運転に戻されていた。入射部の改造が加えられ2005年9月から $3\text{ nm}\cdot\text{rad}$ の低エミッタンス運転が再開。2013年5月には、さらにオプティクスの変更が行われ、現在 $2.4\text{ nm}\cdot\text{rad}$ での運転が行われている。

このように段階的な性能向上を続けてはいるものの、海外の高性能の中規模放射光施設が台頭してきており、このままSPring-8が世界でトップクラスの性能を維持するには限界がきていた。理研・JASRI高度化計画検討委員会委員長の石川によるSPring-8高度化の提案を端緒に、2008年10月から理研とJASRIの若手を中心に、次期計画の検討が開始された。

当初は現状の1セル当たり2台の偏向電磁石を6台に増やす6BA（6 Bend Achromat）の採用により、エミッタンス $60\text{ pm}\cdot\text{rad}$ 、さらに最終的にX線領域での2次元回折限界となる $10\text{ pm}\cdot\text{rad}$ へのアップグレードを目指す計画を立てた。しかし、検討を進めていくうちにハードウェアの実現が容易でないことが分かり、大幅な修正の必要が生じた。2013年からは方針を見直し、5BAでエミッタンスは $100\text{ pm}\cdot\text{rad}$ 台とすることにより、ハードウェアに関する制約を大幅に緩和する条件下での再検討が始まり、2014年11月にデザインレポートにまとめられた。2020年代前半のアップグレードを目指し、現在も全体設計と個別のR&Dが進められている。

加速器の安定な運転を支えるインフラストラクチャーも、建設から20年近くを経過した現在、設計寿命を迎えているものも少なくない。年間約5000時間の安定な運転を脅かす重大な故障が生じてもおかしくない段階にきている。2012年から、次世代光源としても利用を継続できるための大改修が行われている。2013年の補正予算で、蓄積リングのクライストロン電源4ステーションの改修が認められ、2016年度末までに更新が完了する予定になっている。一方、マシン冷却設備・空調設備の熱源機器更新工事（2012-2013年）や特高第一変電所関連設備の更新工事（2014年-）も順次行われており、施設の安定な運転を次世代にわたって支えるとともに、最新技術を導入した省エネ化も併せて進められて

いる。

### ビームラインの増設と利用拡大

**88年史**が編纂された2005年9月の段階では、48本のビームラインが稼働していた。共用ビームラインは2002年11月以降しばらく25本体制で運用されてきたが、産業利用分野でのXAFS（X線吸収微細構造）の利用拡大を要望する声が大きく、産業利用ビームラインとして2本目の産業利用Ⅱ（BL14B2）が建設された。建設予算は限られていたが、偏向電磁石ビームライン、XAFS用のシンプルな実験ステーションとし、また、既設ビームラインからの装置の再利用などにより、低コスト化を達成した。理研とJASRIの内部努力により2005年度および2006年度に予算化され、建設が行われ、2007年2月から運転が開始された。以降、共用ビームライン26本体制での運転が続けられている。

2007年に、ターゲットタンパク研究プログラムによる理研ターゲットタンパク（BL32XU）の建設が決まり、山本雅貴らによりビームライン建設が進められた。標準アンジュレータビームラインのエンドステーションにK-Bミラーを置き、1 $\mu\text{m}$ 程度のビームサイズに集光できるようにし、2009年9月から運転が開始された。これにより、タンパク質の結晶構造解析にこれまで必要であった数十 $\mu\text{m}$ 程度の大きさの結晶が不要となり、数 $\mu\text{m}$ 以下の結晶の高難度タンパク質構造解析が可能となった。

2009年に非弾性散乱の研究目的で、長直線部43セルに理研として理研量子ナノダイナミクスビームラインを整備することが決まり、BL43LXUの建設が開始された。基本設計はアルフレッド・バロン（Alfred Baron）が行ったが、同じくバロンらが設計・建設した非弾性散乱ビームラインBL35XU（共用ビームライン）をベースにしつつ、そこでの反省を生かして幾つかの改良が加えられた。一つは長直線部に3セグメントのアンジュレータを置くことにより、光源強度を数倍にすることである。また、試料からの非弾性散乱X線を、高いエネルギー分解能で分光するアナライザー結晶についても個数を大幅に増量し、検出効率を高める工夫がなされ、2011年9月から運転が開始された。

共用ビームラインの増設が厳しい状況にあった2006-7年ごろにあって、残りの空きポートを有効に活用し、放射光利用を拡大するためには、専用施設の誘致が重要な解決策となった。高田昌樹らを中心に理研とJASRIから学界や産業界に積極的に働きかけたこともあり、このころ幾つかの提案が最終的に予算化までつながり、数年にわたるビームライン建設期を迎えることになった。ビームラインの設計・建設には北村、田中隆次、後藤など理研およびJASRIのメンバーが深く関わるようになった。

2007年に豊田中央研究所は、自動車の排ガス処理のリアルタイム計測や、自動車用材料開発に向けた専用ビームラインを建設することを決めた。蓄積リング棟の外に独自の実験棟を建設し、そこで各種実験を行う大規模なもので、候補地は検討の結果中尺ビームラインBL33XUとなった。特徴的なものはテーパ機能付きアンジュレータと高速角振動可能な結晶分光器（通称コンパクト分光器）を

備えたことである（テーパ機能とは、バンド幅の広いスペクトルを得るための機能）。これによりクイックXAFSでは世界最高性能の10ms台の高速XAFS計測が可能になった。2008年1月に設置が承認され、2009年5月から本格的な利用が開始された。

東京大学では、2006年5月に放射光連携機構を設置し、東京大学物質科学アウトステーションをSPring-8に設置し、利用する方針を打ち出した。SPring-8においては軟X線の多様な利用を考え、長直線部セル07を使うことに決まったが、アンジュレータについては、光源を設計する理研と利用側の東大の間でしばらく議論が行われた。最終的には縦／横偏光のFigure 8型アンジュレータを交互に8セグメント並べ、セグメント間に移相器を置くことにより直線／円変更の切り替え可能な融通性の高い光源とすることが決まった。2008年1月に設置が承認され、2009年10月からSPring-8における5本目の軟X線ビームラインとして、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の利用が始まった。

2006年当時、産業と学術の両方から、主に小角散乱を利用したソフトマターの構造解析を可能とする専用ビームラインの必要性が高まっていた。高田らは企業の参加を募り、ソフトマター関連19社からなるフロンティアソフトマター開発専用ビームライン産学連合体が結成されることになった。各社にはそれぞれアドバイザーとなる大学の研究者が加わる形で、産学連携利用のスキームが確立された。2008年1月にビームライン設置が承認され、BL03XUにフロンティアソフトマター開発産学連携ビームラインとして建設が行われ、2009年11月から利用が開始された。

新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）は、次世代蓄電池と燃料電池の開発における放射光利用の重要性を認識し、専用ビームライン建設を推進した。一つは京都大学を拠点としたNEDO革新型蓄電池先端科学基礎研究（RISING）である。京都大学革新型蓄電池先端基礎科学（BL28XU）は、2009年10月に設置が認められ、2012年4月から利用が開始された。X線回折やXAFSを用い、高速時間分解および高空間分解能でその場観察することにより、蓄電池反応のメカニズムの解明が進められている。一方、燃料電池開発は、電気通信大学燃料電池イノベーション研究センターの岩澤康裕をリーダーとする燃料電池プロジェクトが本格的に立ち上がり、「時空間分解X線吸収微細構造（XAFS）等による触媒構造反応解析」を研究テーマとし、先端触媒構造反応リアルタイム計測ビームライン（BL36XU）を建設した。2010年8月に設置が認められ、2013年1月から利用が開始されている。

長直線部の一つであり、かつ長尺（1km）ビームライン建設の可能性のあったセル31に関しては、その延長上の長尺ビームラインの建設エリアにSACLAが建設されることになり、実質的に長尺ビームラインの建設の可能性がなくなった。大阪大学ではレーザー電子光（BL33LEP）に続く、2本目のレーザー電子光ビームラインの提案をした。レーザーの出力増強とレーザーと電子ビームの相互利用長を長くすることにより、BL33LEPよりもGeVガンマ線の強度を増強することを目指した。2010年6月に設置が認められた後、レーザー入射系の整備に加え、

蓄積リング棟の外に計測専用の実験棟を理研の協力を得て建設し、また、米国BNLからソレノイド電磁石を移設することにより、レーザー電子光Ⅱ (BL31LEP) の建設が進められた。2013年1月に最初のレーザー電子光ビームを生成し、調整運転を経て利用実験が開始された。これにより、理研物質科学Ⅱビームライン (BL19LXU) 建設以降しばらく空きであった長直線部は、4カ所とも全て埋められることになった。

2016年現在、SPring-8において57本のビームラインが稼働している。2005年10月に原子力研究機構が運営していた4本のビームラインについては、原研が施設運営から撤退することに伴い、専用施設へと看板を掛け替えた。これらと、2012年4月に創薬産業ビームライン (BL32B2) が利用契約を満了して理研ビームラインに移管されたことも含め、専用施設は現在19本となり、SPring-8のビームラインの1/3を占めている。次期計画推進にあたっては、当然光源を含めビームラインの改造が必須であり、それぞれの事情を有する専用施設からの理解と協力を得ることが、今後の施設者理研としての重要な役割となる。

#### ビームライン・ステーションのアップグレード

SPring-8においては、初期に建設されたビームラインにおいても、競争的資金を導入するなどして機器のアップグレードを適宜行い、先端計測機器としての競争力を維持してきた。ナノビームの利活用はSPring-8の性能を生かす重要な利用戦略である。以下に二つの具体例を示す。

##### (1) グリーン・ナノ放射光分析評価研究拠点

放射光のナノビーム利用技術を支える最先端光学系の一つは、楕円ミラーによる集光光学系である。SPring-8におけるミラーの開発は、理研と阪大との共同研究により始まった。精密加工と放射光による評価サイクルを繰り返し、2009年には、1kmビームライン (BL29XU) において、技術的極限である7nmの回折限界集光を実現した。このように精密ミラー加工技術を用いて製作された2次元集光ミラーシステムが多くの実験ステーションに導入され、100nmレベルのナノビームX線の利用が積極的に行われるようになった。

その具体例として、2010年に100nmサイズの放射光X線を安定利用することが可能な分析評価拠点として、BL37XUとBL39XUにナノビームステーションが建設された。これは文科省主導の「低炭素社会構築に向けた研究基盤ネットワークの整備」の事業の一環で、100nmサイズのX線ビーム利用の分析サテライト拠点となっている。二つのステーションは、BL37XU：ナノビームX線蛍光分析装置 (Nano-XRF)、BL39XU：ナノビームX線吸収スペクトル計測装置 (Nano-XAFS) である。

これらのステーションでは、ミラー本体のみならず、ナノビームの安定精度を担保するため、周辺機器の安定化と環境整備が行われ、総合的に安定化への注力が行われた。安定なナノビームを用いて、物質中の100nm領域で、元素種別の顕微蛍光分析、X線吸収分光による化学状態の観測、X線磁気円二色性 (XMCD) による原子の磁気状態の観測などを可能とした。2011年4月以降、触媒等の単

ークラスター、ナノ磁気ドットなど、これまでは不可能とされてきたナノ分析評価がSPring-8で展開されている。

#### (2) 元素戦略磁性材料研究拠点

2012年度からは、文科省元素戦略プロジェクト磁性材料研究拠点として、軟X線固体分光ビームラインBL25SUに、ナノビームXMCDステーションを設置するための改造が行われた。従来の1ブランチ4ステーションの構成から、2ブランチ化するための光学系および実験ステーションの大改修となった。集光素子としてミラーを用いる高分解能軟X線ビームライン (aブランチ)、フレネルゾーンプレートを用いるナノ集光軟X線ビームライン (bブランチ) の構成に更新された。運転停止期間の2013年12月から2014年3月にかけて光学系と実験ステーションの大幅な改造が行われた。2014年度上期にビームライン立ち上げを行い、下期から供用が再開された。こうして新たに立ち上がったナノビームXMCDステーションでは、100nm以下の円偏光軟X線ビームを用いることにより、ネオジム磁石における磁区イメージングや、粒界相の磁性の判別などが行えるようになった。

#### 利用成果

2015年時点でSPring-8の利用者は年間約1万人、供用開始以降延べ18万人を超え、SPring-8の多彩なビームラインからは多くの利用成果が生まれている。学術論文は年間800報のペースで報告されている。Science誌2011年の10大ブレイクスルーにはSPring-8の成果として、小惑星探査機「はやぶさ」プロジェクトにおける小惑星イトカワの微粒子の分析と、岡山大学沈教授らによる光合成タンパク質の構造決定が選ばれた。

## 第9節 フォトンサイエンスの創生

理研百周年は同時にSPring-8供用開始20周年、SACLA供用開始5周年でもある。大型基盤施設も稼働後20年を経過すると、そろそろ次を考え始める時期であり、本章でも述べたようにSPring-8-IIに向けてのさまざまな開発研究がすでに開始されている。

さらに大きな時間スケールで考えれば、カオスX線光源としての放射光は技術的に次のSPring-8-IIあたりで極限近くに到達し、その後はリング型XFELを目指す研究開発が進むものと思われる。

一方でLCLSとSACLAで始まった、線形加速器ベースのパルスX線レーザーは、今後シーディング技術の発展などにより時間コヒーレンスも向上することが期待され、現状の多モードレーザーからシングルモードレーザーに変化していくであろう。このような変化は、単に加速器技術の発展のみで到達し得るものではなく、加速器技術とレーザー技術の相乗効果によって初めて達成されるものである。

播磨の放射光科学総合研究センターは、加速器ベースの高エネルギーフォトン

サイエンスの世界的COEとして、今後、ハイパワーレーザーとの連携を進め、さらに進化したフォトンサイエンスの創生に向かうことになろう。