

わが国の放射光科学の歩み(Ⅰ) —オリジナリティの系譜を探る—

上坪宏道 理化学研究所和光研究所 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1

要旨 わが国の放射光科学研究は1960年代に始まり急速に発展した。本稿では、放射光源と関連技術に視点を定めてオリジナリティの在り処を探り、その成果の発展をわが国放射光科学の歴史にすることを試みた。取り上げた放射光源は東大核研の電子シンクロトロン（パラサイト利用）、SOR-RING, KEK-PF, KEK-AR, SPring-8で、建設に至る経緯と特徴的な技術開発に注目して、筆者の見た歴史を紹介した。当初、専門家集団である放射光コミュニティだけが利用していた放射光施設が、その有用性が広く認められて利用分野が拡大し、また、ユーザーが急増していて、今や必要に応じて誰もが利用する「計測・分析を中心とした科学技術インフラストラクチャー」の役割を担うようになっている。

1. はじめに

立命館大学は、2006年がSRセンターの設立から今10年になるのを記念して、「SRセンター10周年記念シンポジウム」を開催することになり、太田SRセンター長から筆者に「わが国の放射光科学の歩み」という題で特別講演をしてもらえないかとの依頼があった。はじめは「その任にあらず」としてお断りしようと思ったが、わが国の放射光施設で多くの優れた研究が行われてきたことを広く知ってもらえる機会になると考えて、講演を引き受けることにした。

特別講演では、まず放射光科学の基礎であるX線回折やX線吸収・分光の研究で、戦前（1910年代～1945年）にわが国で行われた研究とその成果を紹介した後で、わが国に於ける放射光研究40年の歴史を概観した。筆者は常々、放射光研究の分野では、利用研究だけでなく光源開発に於いても、わが国で独創的な研究・開発が数多くなされたと思っている。そこでこの機会に、このような研究開発がどのようにして生まれたかを探ってみるのが、本講演の目的であった。

独創的な研究は極めて個人的なものであり、集団で生み出すものではないが、独創的な研究を育む土壌が存在することは確かである。わが国の放射光研究にはそのような土壌があることを示すために、オリジナリティにあふれる独創的な研究をピックアップして、それらの研究が生まれた背景を探ってみた。取り上げたのは光源（加速器及び挿入光源）、光学系と実験手法である。その殆どは関係者が現役で活躍しているため、できるだけ多くの文献を参照して正確さを期すように努めた。本来ならば当事者に直接お聞きするのが筋ではあると思ったが、少し離れた「傍観者」の立場で見た一つの歴史として、敢えて独断を通させてい

ただくことにした。

「独創的な研究」の選び方に客観的な基準を見出すのは難しく、不用意に行なうと物議をかもしも予想される。そこで本講演では、筆者の身近で行われた研究のうち、個人的に強い関心をもった研究の中から取り上げることにした。従って、本稿で紹介した研究は極めて主観的、限定的であることをお断りしておく。

シンポジウムは去る6月17日に開催されたが、講演後、何人かの方からその内容を記録に残したらどうかと勧められた。また、日本放射光学会下村理会長からの誘いもあったので、講演内容に若干の手直しを加えて本稿を纏めた。なお、以下の文章では総て敬称を省いている。

2. わが国の放射光科学の基礎は如何に築かれたか—放射光科学の源流—

放射光科学で主流になっている研究手法は多くの場合1910年代に始まっている。1913年のX線回折の発見で、X線分光の基礎と結晶構造回折の手法が確立され、特性X線による元素分析あるいはX線吸収による化学状態の研究も可能になってきた。

当時、わが国では東大（1877創設）、京大（1897創設）の理学部のほか、1911年に創設された東北大と九大にも理学部が設置され、また、1917年に創設された理研では、東大、京大、東北大の教授（兼務）を含む14主任研究員の研究室が発足して（1922年）、物理・化学の研究を開始した。光や電子あるいは加速器を用いて量子論に取り組んだ現代物理研究は、わが国では1910年代に始まっている。わが国に於ける放射光科学研究の源流をこの時期に求めたのは、欧米から遠く離れて研究環境もまだ整っていなかったわが国で、多くの独創的な研究がなされていたか

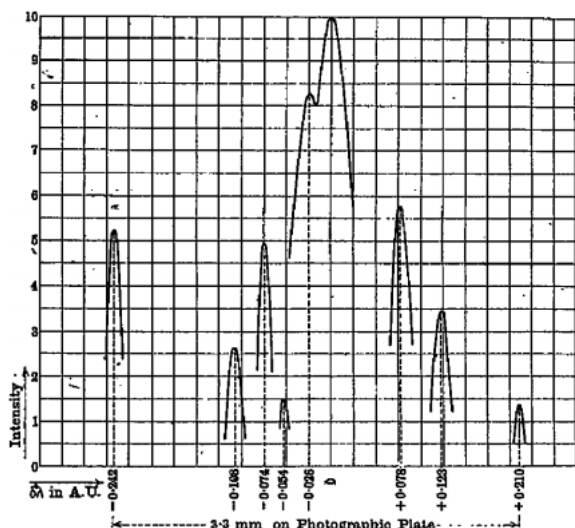


図1 Echelon Grating と Lummer-Gehrcke Plate で分光した水銀の波長5,461オングストローム輝線の(超)微細構造の強度比較。長岡らは水銀の主要輝線について精密分光測定し、後に波長でなく振動数で比較すると規則性があることを発見して、原子内相互作用について論じた。後の超微細構造である。

らである。

2.1 真空紫外分光

1912年、長岡半太郎と高嶺俊夫は、Echelon 格子(階段格子)、Fabry-Perot 干渉計、Lummer-Gehrcke plate(干渉計)を用いて波長分解能を上げ、水銀の輝線スペクトルの精密分光を行ってそのサテライトの微細構造を解析し、Physical Society of London で発表した。図1は1912年に長岡がロンドン物理学会で発表した水銀の輝線スペクトルに関する論文¹⁾のもので、当時としても最高の波長分解能を示している。

長岡はその後ビスマスやカドミウム の測定結果も分析して多重項も見出し、原子内部場との相互作用の可能性を指摘した(1917)¹⁾。1920年代には超微細構造が分光学の中心課題になったが、長岡・高嶺の研究はその端緒を開いた研究である。その後高嶺はウイルソン天文台で金属のシュタルク効果の研究²⁾を行い、帰国後は理化学研究所の主任研究員になった。高嶺研究室には藤岡由夫、富山小太郎、村川 契、田中善雄、須賀太郎などが集まり、3種5台の真空紫外分光器を製作して原子や2原子分子の研究を活発に行った³⁾。なお、原子・分子構造の理論的研究も山内、小谷らによって1930年代から行われている⁴⁾。

戦後、高嶺研究室を引き継いだ藤岡は東京文理科大学(後の東京教育大学、筑波大学)に移り、光学研究所(教育大光研)を設立して真空紫外分光を進め、後進の育成に努めた。このグループに属した瀬谷正男、波岡武は1952年に「瀬谷・波岡型分光器」を考案している⁴⁾。後述するように、戦後の混乱期も活発な研究を続けた真空紫外分光

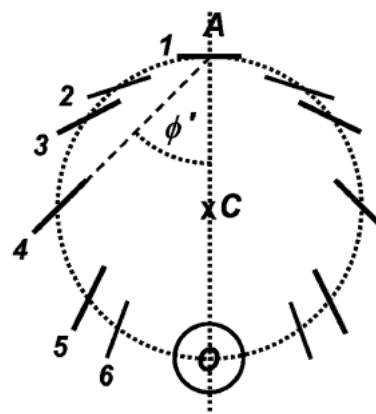


図2 岩塩からのラウエスポット。この実験では、Oは入射X線ビームのスポット、Cは結晶のZ軸が写真乾板と交わる点で、AOが結晶のyz面と乾板の交線である。寺田は蛍光板による目視実験でスポット1~6がZ軸に交差する結晶面からの反射であることを確かめていたので、この写真から、1~6がそれぞれ(011)、(311)、(211)、(111)、(121)、(131)からの反射であると論じている。

グループがいち早く放射光利用研究を開始できたのは、このような強力な研究グループが存在したからである。

2.2 X線回折

LaueによるX線回折の発見50年を記念して発行された国際結晶学連合(IUCr)の“50 Years of X-Ray Diffraction⁵⁾”の第5章には、初期のX線回折研究の拠点としてイギリスとフランスに続いて日本の項があり、東大理学部 の寺田寅彦、西川正治らの研究を紹介している。

1912年10月下旬Laueの論文に接した寺田は、この発見がX線の性質と物質構造の解明に関する新しい研究分野を拓くと直感し、独創的方法でX線回折の実験を開始した。寺田は1917年に「ラウエ映画(注:映像のこと)の実験方法およびその説明に関する研究」により学士院恩賜賞を受賞しているが、その審査要旨によると、寺田は1912年12月には旧式のX線管と高圧発生装置(注:テプラー感応起電機)を他機関から譲り受け、実験を開始した。寺田の手法はLaueらの方法と異なり、直径5~10mmの孔を通した広いX線ビームを用いて結晶のラウエスポットを蛍光板に撮像する方法で、X線の方に対する結晶軸の方向を容易に決めることができた。図2は寺田の方法を示す図⁶⁾であるが、寺田が結晶学の知識でラウエスポットを的確に理解していたことがわかる。

こうして寺田は「結晶体内に存在する幾多の特有なるX線に相交わる諸平面に於ける反射を以て、簡単にラウエ映画は構成される」ことを見出し、岩塩、蛍石、水晶、雲母、ホウ砂など多くの物質を実験して、「ラウエ氏の方法を一新して幾何学的に空間格子の状況を詳にする」(「」内は審査要旨)ことができた。寺田は引き続いて彎曲させた岩塩のX線回折と明礬の構造解析を発表した⁶⁾だけで、

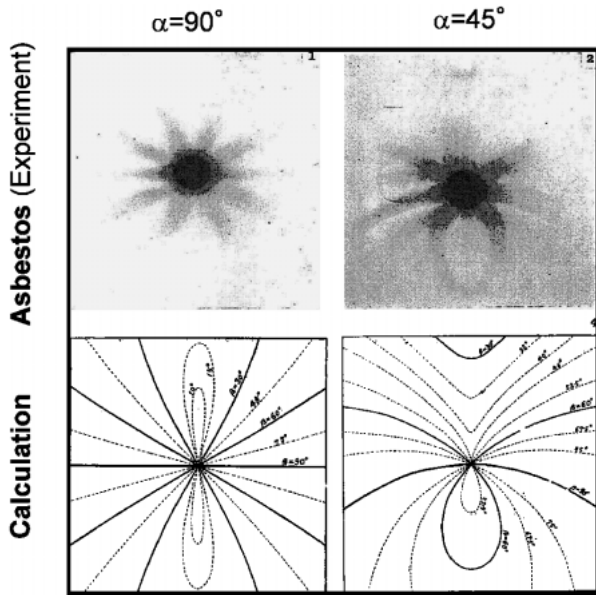


図3 寺田の実験の直後に行なわれた繊維状物質アスベストの X 線回折実験。X 線を Z 軸とし、繊維と Z 軸を含む面を yz 面、繊維と Z 軸のなす角を α とした時の実験データと解析結果。

後述するようにこの研究を止めている。

一方、寺田に誘われて「ラウエ映画」の実験を見た西川は、寺田の勧誘を受けて X 線回折の研究を開始する。1913年夏には西川は寺田の指導で繊維状物質、薄片、顆粒状物質についても X 線の干渉が現れることを確かめた。図3は X 線の方向を Z 軸とし、繊維と Z 軸のなす角を α として測定したアスベストの回折像と、寺田の方法で解析した計算結果を示したものである。その後、西川はスピネルのような化合物の結晶構造を決めているが⁷⁾、1917年には「スピネルの原子配置並びに歪を受けたる物体のレントゲン線検査に関する研究」で学士院賞を受賞している。西川の研究は、学士院賞の審査概要が「ほぼ同時に実験を行っていたブラッグが類似の成果を発表したのは半年も遅く、しかも原子の位置を詳にしたのは西川君の如く精密ではなかった」と言うように先駆的であった。

寺田が日本数物学会で最初の研究成果を発表したのは1913年5月3日である。その後に Bragg の論文を入手した寺田は、文献6)の第一論文の末尾に脚注で「After the paper was read, I have received the paper of Mr. W. L. Bragg (論文タイトル略) read before the Cambridge Philosophical Society on Nov. 11, 1912, and printed on Jan. 10, 1913, and became aware that my way of reconstructing Laue's photograms and of explaining the shape of the spots on them was essentially not new」と記して、X 線の実験をやめてしまった。ところが文献5)の75ページには、寺田や西川が極めて旧式の装置を用いて行なった独創的な研究について「one cannot but admire the independent ap-

proach and the valuable ideas contained in these and other early Japanese papers」と述べ、また、寺田と西川が結晶の空間対称性を世界に先駆けて解析に導入したことを評価して「This was an important transmission of information much in advance of the time when the British crystallographers recognized the value of the systematic structure theory」と述べている。その後、西川研究室は電子線回折の研究を始め、また、中性子線の回折の初期の実験を行なっているが、後年わが国の X 線、電子線、中性子線の散乱・回折を大きく発展させた仁田 勇、三宅静雄、篠原健一、木村一治をはじめ多くの俊英を輩出した。

わが国では1920年代から30年代にかけて、東大、理研だけでなく、東北大学、京都大学、九州大学や大阪大学において X 線回折の研究が活発に進められた。この様子は文献5)の第23章(仁田勇執筆)に詳しい。

2.3 X 線分光

特性 X 線は1906年に Barkla, Moseley によって発見されたが、その精密測定は結晶分光器の発明以後である。1913年 Bragg は「ブラッグ条件」を発見するとともに、この条件を用いた X 線分光器を製作した。また、ほぼ時を同じくして Moseley と Darwin (英), de Broglie (仏) が、翌1914年には Siegbahn が結晶分光器を開発した。その後しばらくは特性 X 線の精密測定がなされていたが、1920年代になると X 線分光分析が活発に行なわれるようになった。1923年にニールスボーア研究所に留学した仁科芳雄は、Hevesy の下で Coster らと共同で X 線分光による元素の定量分析を開始した。仁科は定量のために比較する元素として、目的の元素の線に波長の接近した線を与える元素を選ぶことを考案して、多くの原子・分子、化合物の定量分析を行っている。その後、ボーア研究所に留学した木村健二郎と青山新一も仁科の研究に加わり(1926)、色々な化合物の X 線の吸収スペクトルを測定して、化学状態による吸収スペクトルの変化を調べた⁸⁾。仁科は1928年に帰国して理研に仁科研究室をつくり(1931年)、X 線分光学、宇宙線の研究を開始したが、1935年以後はサイクロトロンを建設して原子核の研究と放射線の生物効果を行っている。

吸収端は1913年に初めて測定されたが (de Broglie), その微細構造は1920年代に Fricke らによって詳しく調べられ、1931年には Kronig が理論的解析を行っている。一方わが国では、1931年より仁科と X 線吸収の研究を始めた吉田早苗が、その後、X 線吸収スペクトルの化学状態による変化、吸収スペクトルの微細構造の研究を行い⁹⁾、また、東北大では青山が袋井忠夫と X 線吸収スペクトルの化学状態依存性の研究を行っている。図4に吉田の行った実験結果の一部を示しておく。

F. W. Lytle はシカゴで開催された「第10回 XAFS 国際会議」で EXAFS の歴史について招待講演¹⁰⁾を行なった

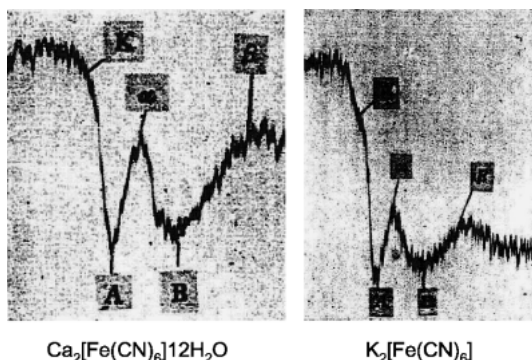


図4 異なる Fe の化合物の K 吸収端

が、その中で放射光実現以前の EXAFS の分野で行われた日本の研究として Takeshi Hayasi; Theory of EXAFS (1936, 1949), Sawada; Amorphous/crystalline polymorphs (1955), Shiraiwa; Improved Theory (1957) を挙げている。

3. わが国放射光科学の歩み (光源) — より明るく、より波長の短い光源の建設 —

1947年に GE の 70 MeV シンクロトロンで放射光が初めて観測されたが、その後1950年代にかけてコーネル大学のグループがスペクトルと角度分布を測定して理論計算との一致を確かめた。こうして、光源としての放射光の優位性は広く認められるようになったが、当時はまだ電子シンクロトロンは高エネルギー物理学の第一線加速器であり、パラサイト利用すら難しい状況であった。そのため放射光の本格的な実験は1960年代になって実現したのである。

本稿ではわが国で放射光源がどのようなタイミングで建設されたかに重点をおいて述べることにした。関係者には現役で活躍している方々が多いので、事実関係で誤りがある場合には後日訂正することが可能である。お知らせいただければ幸いである。なお、光源そのものは大方の読者には周知のことであり、光源のパラメータや特徴などは省いている。

3.1 第一世代放射光源 — パワーユーザーによるパラサイト実験 —

1963年にアメリカの NBS (National Bureau of Standard) の 180 MeV 電子シンクロトロン (SURF) で、極紫外領域の分光実験が始まった¹¹⁾。すぐにイタリアのフラスカッティで 1.15 GeV シンクロトロンを用いた放射光実験が開始され、1964年にはドイツハンブルグの DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron, 6 GeV) でパラサイト実験が行なわれるようになった。さらに1968年にはアメリカのウィスコンシン大学に放射光専用の蓄積リング Tantalus I (0.24 GeV) が完成し、1970年代になると、フ

ランスのオルセーで 0.54 GeV の電子蓄積リング ACO が放射光専用に改造され、また、NBS も 1974年に 0.25 GeV の蓄積リング (SURF II) を建設している。一方 X 線領域では、DESY に続いて 1974年にスタンフォード大学 SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) の SPEAR リング (2.5 GeV) で放射光利用のパラサイト実験が始まっている。

これに対してわが国の状況を簡単に述べてみよう。わが国では戦後しばらくの間原子核・素粒子研究の実験が厳しく制限されていたが、講和条約が締結された翌年 (1952年) 度から文部省に大型研究の予算がみとめられるようになり¹²⁾、1953年に東京大学理学部が 170 MeV 電子シンクロトロンの建設を開始し、また、東北大学では 40 MeV シンクロトロンを建設した。後者は 1954年に完成してわが国最初のシンクロトロン光を観測している。しかし、本格的な高エネルギー加速器の建設は東大原子核研究所 (核研, INS) が設立 (1955年) されてからで、1961年12月には、サイクロトロンに続いて建設した 0.75 GeV 電子シンクロトロン (ES) の試運転に成功した。世界最先端には及ばないエネルギーではあったが、高エネルギー物理学研究者にとっては最初の大型加速器であり、1963年4月から共同利用を開始している。その後1966年に 1.3 GeV までエネルギーが増強されて¹³⁾、主に中間子の光発生に関する実験などに使われていた。

この時期に ES が完成したことはわが国の放射光研究にとってたいへん幸運であった。NBS での実験の前年に、小塩高文 (大阪市立大学)、佐々木泰三 (東大) は INS-SOR グループを結成して (1962)、ES による放射光利用計画を提案した。翌63年には大阪市大、東大、都立大、教育大、東北大の共同研究グループが分光実験を開始し、ES の光取り出し口から可視光を観測した。図 5 にこのときのビームラインの位置を示した。彼らは電子ビームの不安定さに苦しめられながらも実験を続け¹⁴⁾、1965年春には建設したビームラインに教育大光研にあった高嶺研究室の斜入射写真分光器を移設・調整して、軟 X 線吸収スペクトルの測定に成功した¹⁵⁾。当時の核研アニュアルレポート¹⁶⁾をみると、INS-SOR グループの意気込みが伝わってくる。それによると、1965年の6月と8月のビームタイムで、Be, Al (Mg), Sb, Bi の金属/合金や KCl, NaCl の K, L₂, L₃ 吸収分光あるいは希ガス He, Ne, Ar の吸収分光を測定しているが、12枚のスペクトル図を掲げて放射光の素晴らしさを示している。その中の一枚を図 6 に示した (これが例として示すのに相応しい図なのかは門外漢の筆者には全く自信がない)。

この頃には既に高エネルギー物理学の実験が始まっていた。当時を知る人の思い出では、放射光ビームラインはよく真空漏れを起こし、たびたびシンクロトロンが停止したという。それにも拘らず、山口省太郎など ES の首脳部は放射光実験にたいへん好意的で、実験成功に向けて協力を

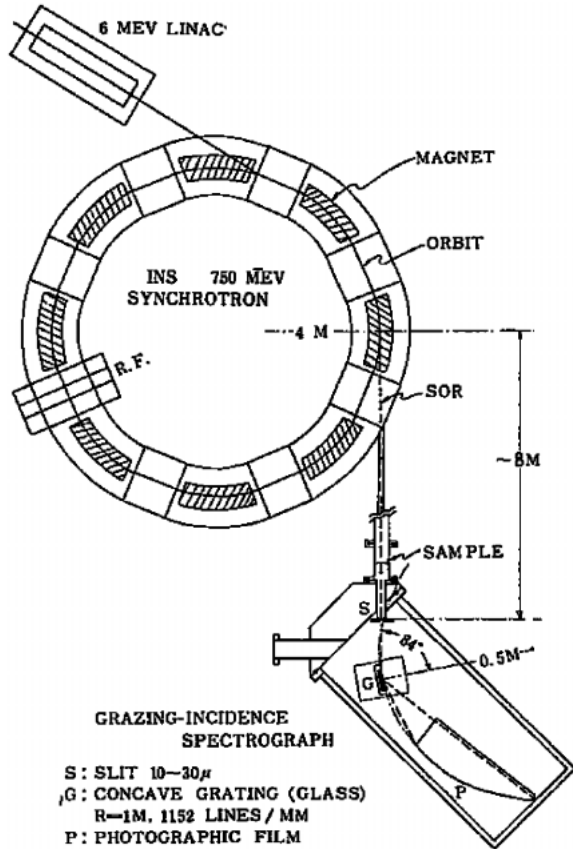


図5 東京大学原子核研究所電子シンクロトロン (INS-ES) に初めて建設された放射光 (SOR) ビームライン (1965年)

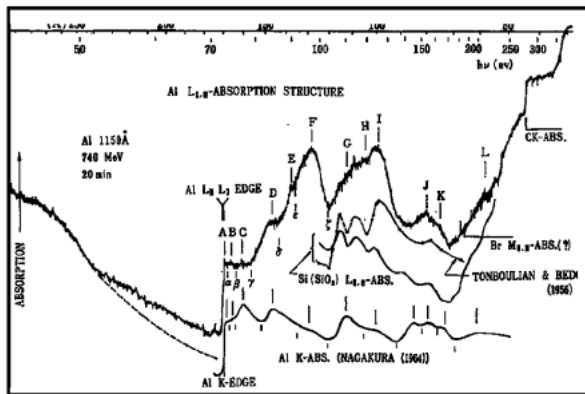


図6 INS-ES で行なわれた金属アルミニウムの極短紫外光～X線吸収分光のデータ (1965年)

惜しまなかった¹⁵⁾。ES計画を推進していた人達には戦前の仁科・西川両研究室の流れを汲む人が多かったが、その伝統が受け継がれていたのかもしれない。

1965年から始まったINS-SORグループによる真空紫外・軟X線領域での固体及び希ガスの分光実験は大きな成果を挙げ、内外に大きな反響を呼んだ。また、ビームラインも増強されて放射光研究のユーザーが急増したが、INS-SORグループは任意団体であり研究を大きく発展さ

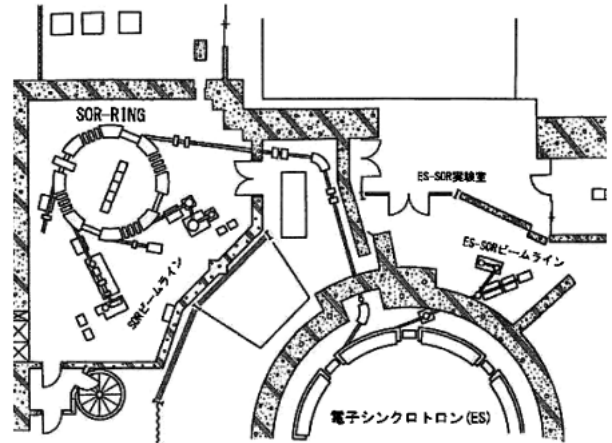


図7 原子核研究所の電子シンクロトロンとSOR-RINGの配置図 ES-SORビームラインではリソグラフィも行なわれた (1975年)

せるには限界があった。このことは諸外国が最初に加速器施設内に放射光部門を設置したのとは対照的で、世界のトップを切って走り出したわが国の放射光研究に遅れをもたらし始めた¹⁵⁾。

3.2 第二世代放射光源—SOR-RINGの建設—

放射光ユーザーが増えるにつれてビームタイム不足が顕著になり、専用リングの建設が強く求められるようになった。1965年にINS-SORが提案した新光源 (SOR-RING, 400 MeV) 計画が、紆余曲折の末に¹⁷⁾核研に建設されることになったのは1970年である。74年に完成して運転開始し1976年には300 MeV, 100 mAの仕様を達成して利用運転が始まった。この頃、高エネルギー物理学コミュニティは陽子シンクロトロン計画を推進しており (1976年完成)、1971年に高エネルギー物理学研究所 (KEK) が設立されている。そのため、SOR-RINGの建設はユーザー主体の建設チーム (リーダー: 佐々木泰三) が核研高エネルギー部の協力を得て行うことになった。このとき参加した若い研究者らが、その後わが国の放射光研究を推進する牽引車となった。

SOR-RINGは設計段階から極紫外・軟X線領域の専用放射光源を目指した蓄積リングであり、図7のようにESを入射器としたので加速を行わず、蓄積リングの機能のみを持っていた。この点でSOR-RINGは世界最初の蓄積リング放射光源である。一方、加速器の立場からみると、わが国の加速器技術の発展に重要な寄与をしていて、日本加速器史の重要なマイルストーンになっている。具体的な例を挙げると、SOR-RINGはわが国で初めて分布型イオンポンプを装備した大型加速器であり、オンビームで 10^{-8} パスカルを実現している。因みにイオンポンプは1950年代半ばに発明され、1960年代には小型真空槽による超高真空 (10^{-8} から 10^{-9} パスカル) 下での清浄表面研究など

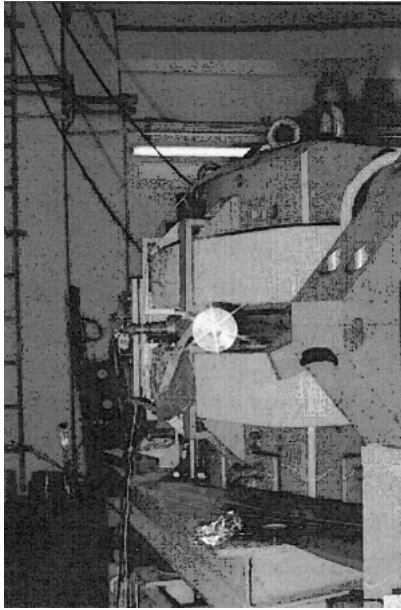


図8 SOR-RINGの最初の光；1974年12月15日

に用いられていた。一方加速器については、SLACの線形加速器にイオンポンプが用いられたのは1960年代後半であり¹⁸⁾、70年代初期のわが国では、大型加速器の超高真空技術が皆無に近かった。そのため、SOR-RINGの建設は超高真空に係わる多くの技術開発と並行して進められたのである。SOR-RINGにビーム蓄積が始まると真空は急速によくなって 10^{-8} パスカルに達し、電子ビーム寿命は100 mAで1時間程度になった。なお、最初の光は1974年12月15日に観測したが、図8はそのときの写真である¹⁷⁾。

挿入光源技術でもSOR-RINGはパイオニアになった。1980年H. Winick（スタンフォード）がわが国を訪れ、Halbach（LBL）と協力して開発した永久磁石（ SmCo_5 ）挿入光源を紹介した。これを聞いた佐々木は、早速プロトタイプ（10周期）を作ってSOR-RINGに設置して（1981年）、アンジュレータ光を観測しその特性を明らかにし¹⁹⁾、さらに実機（60周期）を製作してPFに設置した（1983年）。SOR-RINGの挿入光源で得られた丸い虹色の写真は長く文部省の玄関に飾られていたという²⁰⁾。そのほか、電子ビーム位置・ビームサイズの光学的観測も行っているが、これは蓄積リング真空槽に数箇所の放射光取出孔を付け、ウォルツ板を通して取り出した可視光を用いている。

SOR-RINGは完成後、物性研SOR施設（1975年設立）に移管され、その後は共同利用施設として運営されて成果を挙げてきたが、物性研で放射光の次期計画が検討されるようになった1997年に共同利用運転を終了した。なお、そのときの性能は500 MeV、500 mAであった。

SOR-RINGがその後のわが国加速器の発展や放射光研究の進歩に果たした役割は極めて大きく、それを記念する

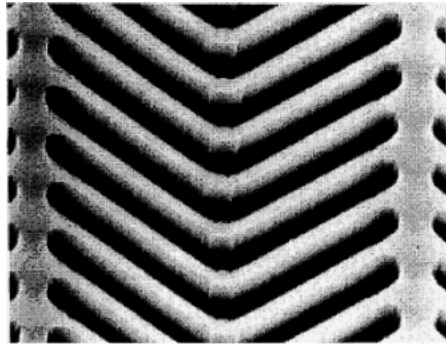
ためにSPring-8施設に移されて展示室に組み立てられている。

3.3 X線放射光源の建設を目指して—パワーユーザーグループの誕生—

極紫外・軟X線領域放射光の成功を受けてX線領域でも強力光源の実現を望む声が高まった。わが国には従来からX線回折の強力な研究集団があったが、X線吸収分光など他の分野の研究グループにも働きかけて、X線領域の放射光源建設計画である「フォトンファクトリー（PF）」計画を提案した。1973年春に「フォトンファクトリー計画研究会」（世話人・富家雄、高良和武）が開かれ、計画の検討が正式に始まっている。PF計画は広い学問分野の研究者から多くの支持を集め、「放射光総合研究所」設立の提案として日本学術会議の審議にかけられて、1974年秋には政府に勧告された。当時、学術関係の大型計画は学術会議の勧告があれば実現するのが通例であったが、PFは適当な設置場所が見つからず宙に浮いたままになっていた²¹⁾。

この頃、高エネルギー物理コミュニティは次期計画（トリスタン建設）を推進していた。トリスタン計画の主導者であった西川哲治は、世界の第一線に立つような将来計画として「1973年に筆者が提案したトリスタン計画は、（中略）予算や技術的諸問題、タイムスケジュールなどを考慮して1980年にむしろ高工研の予定敷地一杯に全周約3 kmの電子・陽電子衝突型加速器を建設することを第一段階とするということで研究者間の合意を得た」²²⁾と述べて、トリスタン計画の変遷を説明している。一方、PFの入射器主幹であった田中治郎によると²³⁾、高良らがPFをKEKに設置してもらえるように時の諏訪（繁樹）所長に申し入れたので、加速器系主幹の西川が田中、木村嘉孝、木原元央らにトリスタンとの整合性を検討させた。その結果、PFの入射用2.5 GeV線型加速器をトリスタンの入射器にすると、2.5 GeV光源リングとトリスタンAR、MRが敷地内にうまく収まり「建設可能」であると答申したという。こうしてPFをKEKが受け入れ、PF入射器の2.5 GeV電子線型加速器をトリスタンの入射器として使用する案がまとまった。当時、原子核コミュニティに属していろいろな委員会に出席していた筆者は、幅広い研究分野からの支持があり、学術会議の勧告もあるPFとの組み合わせは、効率的に世界最高エネルギーの電子・陽電子衝突型加速器を建設する名案と感じたものである。それは、トリスタンが建設予算700億の巨大プロジェクトであり、社会的なコンセンサスを獲得のはかなり困難であると思っていたからであった。

一方、原子核物理コミュニティはニューマトロン計画を推進していて、トリスタン計画と激しく競い合っていた。両計画の取り扱いを審議する学術審議会加速器部会に筆者も委員の一人として参加したが、白熱の議論の末にトリス



(9)

図9 原子核研究所電子シンクロトロンで行なわれたリソグラフィ実験の成果(1976年~77年)

タン計画を優先する結論になったと記憶している。部会の席上、難波進(阪大)らがESで行なったリソグラフィ実験の成果(図9)が競争相手のIBMより優れた加工性能を示していることが紹介され²⁴⁾、大きなインパクトを与えた。

X線領域の放射光源建設を求めるパワーユーザーの熱意と放射光に対する幅広い分野からの支持、それが高エネルギー物理学コミュニティの力に同期して、巨大プロジェクトトリスタン計画を実現させたといつてよい。なお、PFユーザーの要望で、ARの建物に放射光利用のためのスペースが作られたのもこのような協力の結果である。

1970年代になって放射光研究分野では、蓄積リング光源の優位性が広く認められるようになったが、パラサイト利用のDESY、SLACとコーネル大学の施設を除くと、殆ど極紫外・軟X線領域の放射光施設であった。ところが1976年に、アメリカのNational Research Councilは、Brookhaven国立研究所(BNL)に0.7 GeVと2.5 GeVの放射光源(NSLS)を作ることを勧告した。一方、イギリスではダーレスベリー研究所の5 GeV NINA(パラサイト利用中)を撤去し、1977年にSRS(2 GeV)を建設してX線領域の放射光専用リングとした。NSLSとSRSはともに1981年に完成している(共同利用開始は1983年)。

3.4 第二世代放射光源—PFの建設—

こうして1978年に「放射光実験施設」がKEKに新設され、2.5 GeVリニアックを入射器にしたPFの建設が始まった。PFは1982年に2.5 GeV電子ビームの蓄積に成功し、1983年から共同利用を実施している。なお、トリスタンは1984年に入射蓄積リング(AR)で6.5 GeVの加速に成功し、1986年に全体の試運転に成功した。

加速器技術史の観点からPFを振り返ると、入射器に採用した2.5 GeVリニアックはわが国最初の大型電子リニアックであり、精密組立て・アライメントなど多くの技術開発を伴いながら建設された。また蓄積リングでは、ビーム不安定性の検討や高周波系の研究開発、超高真空系の実

現、ビーム制御/安定化技術の開発など、わが国の加速器技術の発展に大きく貢献している。このとき採用された加速高周波数の500 MHzはトリスタン、SPring-8にも用いられ、また、超高真空系の分布型イオンポンプも今日まで用いられている。なお、ビーム不安定性研究の一環として、陽電子を蓄積している(1988年)。

挿入光源の建設では、1983年完成の強力永久磁石を用いたアンジュレータ²⁵⁾に続いて超伝導ウィグラー²⁶⁾が開発され、リボルバー型挿入光源²⁷⁾や真空封止挿入光源²⁸⁾開発へと発展してきた。

PF建設は高良和武(施設長)、田中治郎(入射器系主幹)、冨家雄(光源系主幹)、佐々木泰三(測定系主幹)のリーダーシップのもとで行なわれた。設計から建設までPF計画において中心的存在であった冨家は、PFの特徴を「2.5 GeVのリニアックを建設して蓄積リングにフルエネルギー入射にしたこと、蓄積リングに本格的な挿入光源用の長直線部を2箇所設けたことであった」と、PFがX線放射光源の新しい方向を打ち出したことを述懐していた²⁹⁾が、その原型となったのはSOR-RINGである。このSOR-RINGの実績とパワーユーザーグループ(PF懇談会)の熱意がPFの早期実現をもたらし、わが国をこの分野のフロントランナーにしたと言ってよい。なお、PFでは日本電電公社(NTT)、日立、富士通、NECがそれぞれ専用のビームラインを建設して放射光利用実験を行ったが、この点から難波らの実験が産業界に与えたインパクトの強さがうかがえる。

PF、SRS、BNLが稼動し始めると、それぞれ数十本のビームラインで年間延数千人のユーザーが実験し、これまで不可能であった手法で全く新しい対象にまでX線の利用を広げたので、世界各地で新しい放射光施設の建設が始まった¹²⁾。なお、オーストラリアはPFに偏向磁石ビームライン(BL20B)を建設し、回折(結晶/粉末)、小角散乱などの実験を行っている。

KEKがPFの設置を認めたのは、それがトリスタン実現のために不可欠と判断したからであろう。しかし、KEKはPF新設と同じ年に陽子シンクロトロンにブースター利用施設を併設してパルスミュオン実験装置とパルス中性子源(KENS)の建設を始め(両者とも1980年に稼動)、その後も陽子線治療施設(筑波大)を併設するなど、高エネルギー加速器利用施設の建設を推進してきた。また、現在もJ-PARCの建設を進めており、最先端加速器研究の成果を広く社会に開放する役割を果たしている。PFの建設が、KEKを「加速器科学」の総合的研究所に発展させる一つの契機になったことは確かである。

PFには東京大学理学部など国立大学/研究所がビームラインを設置しているが、1986年に始まった国のプロジェクト「新ビーム技術による高性能機能性材料の分析・評価技術に関する研究」(科学技術振興調整費)における国立研究機関用ビームラインとして、多極ウィグラービーム

ライン (BL13) が理研と電総研の協力で建設された。このほか、原研が KEK と協力して RI 専用ビームライン (BL27) を建設しており、PF は全国的な共同利用施設としての役割を果たしてきた。

加速器の高度化では、1986年に最初の PF 低エミッタンス化が認められて改造作業を行い、88年からエミッタンス130 nmrad の運転を開始した。その後、1997年に第2回の改造が行われ、1998年から36 nmrad のエミッタンスでユーザー運転を行っている。その後、さらに新たなアップ

グレード計画が始まり、2005年には磁石配列を変えて挿入光源用直線部の数を従来の7から13に増やすとともに、直線部を長くする高度化を行っている³⁰⁾。挿入光源ビームライン BL17のショートギャップアンジュレータ (SGU) では、SGU 両側の磁石配列を大幅に変えて SGU を挿入する直線部 (図10) を新設した³¹⁾。

今後さらにトップアップ運転も計画されていて、PF では先端的大型研究施設としての機能の大幅な向上が進められている。20年以上も前に完成した大型放射光施設の画期的な高度化計画である。



図10 KEK-PF の高度化計画の一例 (BL17)。偏光磁石光源部の磁石配列を大幅に変えてショートギャップアンジュレータ (SGU, 図の中央) の両側の磁石配列を変えて SGU を挿入する直線部を新設した。(KEK 山本樹氏提供)

3.5 小型光源³²⁾

PF とほぼ同時期に建設が始まった電子技術総合研究所 (電総研, 現在の産業技術総合研究所) の0.8 GeV 放射光施設 (TERAS) は1981年に完成した。この建設の指揮を執った冨増多喜夫は、その後も同じ入射器を用いた小型放射光施設 (NIJI-I, II, III, IV) を次々に建設し、また、TERAS を用いて、コンプトン後方散乱光の実験やヘリカルアンジュレータ (図11(a)) による円偏光放射光の発生³³⁾ など、加速器や実験手法の研究開発を行なっている。なお、小型放射光施設のうち、NIJI-I が廃棄され、NIJI-IV は住友電工播磨研究所に移管されて、現在は残りの2基のみが特定の課題による技術開発あるいは産業利用に使われている³²⁾。

分子科学研究所の UVSOR (0.6 GeV) は PF より1年遅れて完成した (文献32, p49)。化学研究を主目的にし

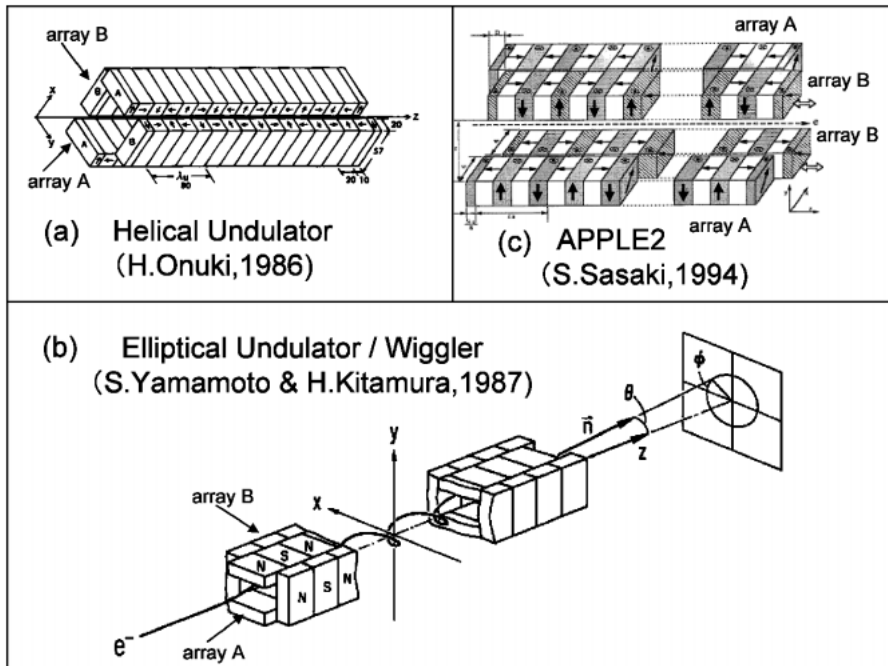


図11 可変偏光の光源としてわが国で開発された、2次元磁場分布をつくる永久磁石挿入光源、3者とも array A と array B の磁石列の相対位置を変えて左右円偏光、直線偏光を得ることができる。b)方式は真空封止挿入光源に planar 型とともに用いられており、また、c)方式は中小型第3世代放射光施設で広く使われている

表1 公的研究機関の小型放射光施設

設置機関	光源名称	エネルギー (GeV)	入射器	稼動年
産業技術総合研究所	TERAS	0.8	リニアック (TELL, 0.5 GeV)	1981
産業技術総合研究所	NIJI-II	0.6	リニアック (TELL, 0.5 GeV)	1989
産業技術総合研究所	NIJI-IV	0.5	リニアック (TELL, 0.5 GeV)	1987
分子科学研究所	UVSOR	0.75	シンクロトロン (0.6 GeV)	1983
立命館大学	AURORA-1	0.6	マイクロトロン (0.15 GeV)	1996
京都大学化学研究所	KSR (JSR を移設)	0.3	リニアック (0.3 GeV)	
広島大学	HiSOR	0.7	マイクロトロン (0.15 GeV)	1996
兵庫県立大学	NewSUBARU	1.5, 1.0	リニアック (1 GeV)	
九州シンクロトロン光研究センター	SAGA-LS	1.4	リニアック (0.26 GeV)	2005

表2 産業界が所有する放射光施設

設置企業	光源名称	エネルギー (GeV)	入射器	稼動年
石川島播磨重工業 (土浦)	LUNA	0.8		1989
NTT (厚木)	NAR	0.8	入射用シンクロトロン	1988
NTT (厚木)	Super ALIS	0.6	シンクロトロン (0.6 GeV)	1989
住友重機械 (田無)	AURORA-2S	0.7	マイクロトロン	
三菱電機 (尼崎)	MELCO-SR	0.6	シンクロトロン (1 GeV)	1993
住友電工 (播磨)	NIJI-III	0.62		1995 ?

た放射光源で、渡辺 誠らが建設した。極紫外・軟 X 線を用いた基礎研究を行ってきたが、2003年に低エミッタンス化とアンジュレーター 6 本設置の改造を行い、第三代放射光源として共同利用している。また、自由電子レーザーの研究開発にも用いられ、1993年には紫外光の発振に成功した。

広島大学の HiSOR (0.7 GeV) と立命館大学の AURORA-1 (0.6 GeV) は共に1996年に完成した極紫外・軟 X 線領域の放射光源で、両者とも同じ企業が開発した。前者はレーストラック型リングのシンクロトロン/蓄積リングで、偏向磁石の電子軌道から放射される放射光と、2本の直線部に設置されたアンジュレータからの放射光を利用して、軟 X 線光電子分光などの基礎研究が行われている。後者では、超伝導円形磁石が作る円形の電子軌道から放射される放射光を利用して基礎研究のほか LIGA によるマイクロマシン開発を行っている。

New-SUBARU (1.0~1.5 GeV) と Saga-LS (1.4 GeV) は地方自治体が建設した放射光施設である。前者は安藤愛之輔らが建設した蓄積リング光源で、SPRING-8 の入射器からの 1 GeV 電子ビームを蓄積リングに入射しており、現在トップアップ運転も行われている。モーメントム・コンパクション・ファクターを正負に変えることができる電

磁石を有していて、極短パルス光を発生できるユニークな光源である(文献32, 54ページ)。一方、Saga-LS は富増らが建設した準第三代放射光源であるが、九州地区唯一の放射光源として、近隣国立大学との連携融合研究や産業利用で地域センターとしての特徴を出している。

公的研究機関が建設する放射光源はそれぞれ独自の目標を持っており、それぞれに特徴ある成果を生み出している。現在、稼動している小型放射光施設を表1に纏めておく。

産業利用の放射光施設は、ほとんど全てがリソグラフィを主目的にして1980年代後半に建設された(表2)。ところがこれらの施設が完成する頃には、超 LSI の線幅はサブミクロンの領域に入っていて、レーザーを用いた微細加工が行われていた。そのため放射光が主役の座にはつくことは無かったが、現在の線幅60ナノメートルと次の目標値45ナノメートルの先は技術的めどが立っていないので、極紫外放射光リソグラフィの可能性も残されている。しかし、MELCO-SR の紹介によると³⁰⁾、「1日2~3回蓄積リングに電子ビームを入射し、年間2000時間程度放射光を供給しており、サブ100 nm まで超微細パターンの安定形成を実現している」という。

最近、超 LSI 開発で必要な放射光利用の一つとして、

ナノメートル領域での結晶構造解析など精密分析が注目されている。放射光の産業利用は新たな発展を見せている。

産業技術開発の目的で国のプロジェクトとして建設された放射光施設 SORTEC (1 GeV) は、実用化の目途をつける前に期間満了で運転を停止し、その部品はタイ国放射光施設に送られた。

3.6 次世代光源建設へ始動—ARの放射光利用—

1980年代になるとヨーロッパで、低エミッタンス蓄積リングに多数の挿入光源を設置した「第三世代放射光源」の検討が始まった。この動きに触発されて京大、阪大などの研究者グループが「関西 6 GeV 計画」を提案したが、この提案を実現する手立てが見つからず、理研へ非公式な協力依頼があった。その頃理研では、新設する研究組織フロンティア研究システム(1986年発足)に設置を検討していた中型放射光計画を取り止めており、比較的短期間で関西計画の検討に取り掛かっている。その後、理研と科学技術庁(科技庁)に正式な協力要請があり、理研は設計作業を進めて独自の原案をまとめた上で科技庁と協議して「大型放射光施設(SPring-8)計画」を提案し、その準備研究費を1987年度予算に要求した。これに対して文部省は「トリスタン入射蓄積リング(AR)の放射光利用計画」を提案して、1987年度予算にその経費を要求した。両者の激しい予算獲得競争は予算折衝の大詰めまで続いたが、最後には両計画とも認められて SPring-8 の準備研究が発足するとともに、AR の放射光利用計画が動き出したのである。また、科技庁に関係各省庁の専門家を集めて「大型放射光施設整備連絡協議会(黒田晴雄座長)」を設置し、大型放射光施設計画の進め方を検討することが決まった。協議会は1987年に5回開催されて、計画の重要性を認めようとして「計画実現に当っては研究者の意向を十分踏まえ、これまでの研究成果や経験を十分取り入れ、幅広い研究者の協力を得て推進するよう」に提言した³⁴⁾。こうして、これまでは国立大学付置研究所あるいは国立大学共同利用研究機関が建設してきた先端的大型研究施設を、それ以外の組織が建設する仕組みがスタートしたのである。この方式はさらに発展し今日の J-PARC の建設に引き継がれている。

KEK-AR の利用は1988年からパラサイト利用研究として始まり、トリスタンの運転停止後は単バンチの専用光源として用いられている。1988年には大強度高エネルギー X 線源として EMPW (楕円的多極ウィグラー) が設置され、50 keV の偏極 X 線によるコンプトン散乱の実験が行われた³⁵⁾。さらに1990年にはアンジュレータビームラインも新設されて³⁶⁾、放射光核共鳴非弾性散乱の実験が行われた³⁷⁾。EMPW をアンジュレータモードで用いて X 線磁気円二色性(MCXD)の研究も行われている³⁸⁾。KEK-AR では、その利用開始が第三世代 X 線光源の完成前であったため、1990年代前半に多くの先駆的研究が行

われ、優れた成果が得られている。

一方、トリスタンの30 GeV 主リング(MR)を低エネルギーで運転してエミッタンスを小さくし、放射光実験に用いる計画も提案されていて、1995年には MR で放射光実験が行われたが、トリスタン II (Bファクトリー)計画のために撤去された。

3.7 第三世代放射光源—SPring-8の建設—

SPring-8 は理研と原研が協力して建設することになり、両者は1988年に共同チームを結成して設計・準備研究を進めた。建設は、計画全体のリーダー上坪、加速器建設グループリーダー熊谷教孝(原研担当加速器建設グループリーダー横溝英明)、挿入光源グループリーダー北村英男、ビームライン(基幹部)建設グループリーダー石川哲也の陣容で進められたが、1992年に着工して1997年3月試運転に成功し、同年10月から共用(共同利用)を開始した。一方、ヨーロッパが共同して建設した施設 ESRF (グルノーブル)は1994年秋、アメリカの APS (アルゴンヌ)は1996年に実験を開始したが、SPring-8 の場合は当初の計画を2年近く短縮して、ESRF に3年、APS には1年の遅れで、10本のビームラインで共用を開始している。

SPring-8 の設計・準備研究が始まると「次世代 X 線光源研究会(代表 菊田愷志)」が結成され、従来とは異なる仕組みで推進される SPring-8 の建設・運営について、研究者コミュニティの意見を反映させる役割を果たすことになった³⁹⁾。この組織はその後「SPring-8 利用者懇談会」に発展的改組され今日に至っている。SPring-8 の建設は極めて順調に進み、当初の予定を繰り上げて供用を開始して、21世紀になって急速に激化したゲノム科学やナノテクノロジーの国際的研究競争で大きな役割を果たしてきた。なお、SPring-8 には専用施設として台湾が2本、産業界が3本、大学・研究機関が15本のビームラインを建設している。

既に述べたように、SOR-RING 建設は極紫外分光研究グループが、また、PF 建設は X 線回折・分光研究グループが中心になって推進したプロジェクトであり、目指す性能も研究者コミュニティの論議を経て早くから決められていた。ところが SPring-8 計画は、提案初期に KEK-AR と激しく競争したこともあって計画策定期間に専門家の協力を得ることが難しく、また、関西 6 GeV 計画を引き継いで提案されたので、計画のアップグレードが困難であった。ところが1987年に「大型放射光施設整備連絡協議会」の審議が行われ、また、「次世代 X 線光源研究会」が活動を始めるようになると、計画に対するユーザーの関わりが深まってきた。1989年には専門家/学識経験者による「大型放射光施設計画検討委員会(検討委員会、高良和武委員長)」が発足して⁴⁰⁾、全国共同利用施設として SPring-8 計画が進められるようになった。それまでに共同チームで検討していた 8 GeV への変更案や、4箇所長直線部設

置、ビームラインの標準的長さや運営母体の新設などが提言されている。その後、具体的なビームライン設置計画は「利用者懇談会」で検討されている。

こうして SPring-8 は、広い科学技術分野のための世界最高性能研究施設を目標にして、波長範囲（電子エネルギー）、輝度、偏光特性、パルス特性、安定性や制御性などが世界最高になるように設計・建設が進められるようになり⁴¹⁾、わが国で初めて国際助言委員会も設けられた。

SPring-8 は、完成後も光源の高度化が続き、4箇所ある長直線部に挿入光源を設置するための Chasman-Green ラティスの変更⁴²⁾、時間変動も含めた電子ビーム位置の安定化⁴³⁾、偏光制御、バンチ・フィリングパターン制御⁴⁴⁾とバンチ純度の向上⁴⁵⁾、低エミッタンス化⁴⁶⁾、トップアップ運転（蓄積電流の変動幅0.1%以内⁴⁷⁾などを次々に行って世界最高性能を実現し、科学技術の広い分野で多くの成果を挙げている。なお、これらの改造・高度化は建設の初期から検討されていたもので、例えば、エミッタンスについては SPring-8 の建設が始まった時期にさかのぼる。当時、半年間滞在の予定で ESRF に派遣されていた田中均は、直線部にディスパージョンを残したほうがエミッタンスを低くできることに気付いて（このことは既に1983年に神谷幸秀と木原元央が見出している⁴⁸⁾）、ESRF の加速器責任者 Laclare に提言したという。早速、ESRF では検討を始め、蓄積リングの運転が始まるとすぐに低エミッタンス化を実現している⁴⁹⁾。SPring-8 でも同様の方法で 3 nmrad の低エミッタンス化に成功し、さらに低くする努力が続けられている。

これらの改良・高度化が特徴的なのは、加速器グループが主導して計画的に進めてきた点である。トップアップ運転の報告の末尾⁴⁷⁾には、「光源としての加速器の高度化は光を利用するユーザーの声から始まるのが理想であろう。今回は加速器側が主導した開発であるが、ユーザーに光源性能向上の必要性を認識してもらえたのではないだろうか」と記して、ユーザーからの積極的提言を呼びかけている。

SPring-8 の性能が高まるにつれて広範な実験への対応が可能になり、利用者が急増している。とくに産業界の利用が増加していて、2005年には170社から延べ2200人が実験を行った。また、PF の高度化が進んで利用もこれまでの専門分野に留まらず、広く基礎的学術研究の重要な実験手段になっている。放射光利用は、科学捜査、考古学、環境、農林水産など広い分野に広がり、産業界の利用分野も急激に拡大している。SPring-8 や PF などの放射光施設は、今や社会における科学技術のインフラストラクチャーとしての存在になってきていると言えるのではないだろうか。

3.8 挿入光源

放射光利用研究で最も必要な要素は優れた特性の光であ

る。従って、優れた性能の蓄積リングを建設して優れた性能の挿入光源を設置することが、第3世代放射光施設計画の目標である。

現在、優れた性能の挿入光源は殆ど強力永久磁石を使った Halbach 型であるが、わが国でこの型の挿入光源を最初に建設したのは SOR-RING である¹⁹⁾。また、SOR-RING と同時期に PF に60周期のアンジュレータが設置されて²⁵⁾、0.4 keV～1 keV の X 線を使った実験が行われた。このときは両者とも SmCo₅ 磁石を用いていたが、1982年により強力な永久磁石ネオマックス（Nd-Fe-B 系磁石）が発明されてからは、これを用いた多様な挿入光源が開発された（図11）。わが国はこの分野で最も顕著な成果を挙げてきて、世界のリーダーになっている。

ネオマックスを用いた最初の挿入光源は、PF マルチポールウィグラー/アンジュレータ MPW#16 である。また、PF の山本 樹、北村英男は図11(b)に示した EMPW（楕円多極ウィグラー）を開発し、AR リングの長直線部に設置した⁵⁰⁾。これは周期長16 cm の縦磁場と横磁場をもち、両者の位相を変えて円偏光、直線偏光の軟 X 線（100 eV-2 keV）を発生するヘリカルアンジュレータモードと、縦磁場を強くして大強度の硬 X 線（2-50 keV）を発生する楕円ウィグラーモードで使用可能である。さらに PF では周期長の異なる4組のアンジュレータを搭載したりボルバー挿入光源や真空封止アンジュレータなど、次々に新しい型の永久磁石挿入光源が開発されてきたことは既に述べた。その後北村は SPring-8 の建設に参加し、窒化チタンをコーティングした高温特性に優れたネオマックスを用いて、標準型アンジュレータ以外にミニギャップアンジュレータ⁵¹⁾、8の字型アンジュレータなど多種多様な超高真空封止挿入光源を建設した⁵²⁾。図12は長さ27 m の平面型真空封止アンジュレータで、SPring-8 に設置されて世界最高輝度の X 線源になっている。また、試作機として製作した真空封止型ミニギャップアンジュレータが BNL の



図12 世界最大の真空封止型アンジュレーター真空封止挿入光源は原型が KEK-PF で開発され、SPring-8 で本格的に使用されて世界に広まった

X線光源に設置されて⁵¹⁾ 実用機として用いられているほか、標準型の真空封止アンジュレータはスイスのSLSなど多数の外国の放射光施設に設置されている。

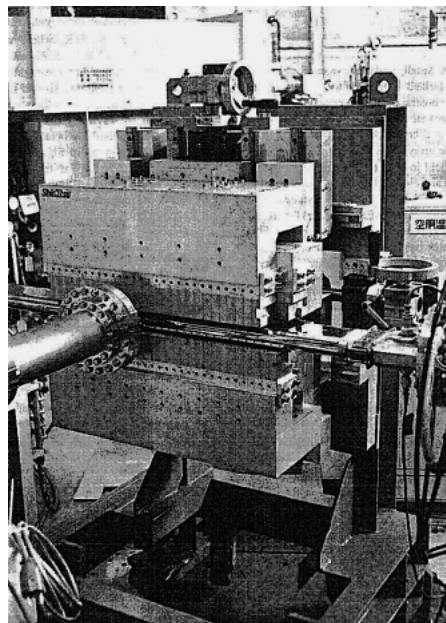


図13 世界最初のAPPLE, SPring-8の開発研究で考案され、日本原子力研究所のJSRで実証試験が行われた。現在、世界で広く用いられている

一方、日本原子力研究所大型放射光施設建設チームの佐々木茂美が、平面型アンジュレータの磁石列を上下とも2分割して独立に動かせるようにしたAPPLE (Advanced Planar Polarized Light Emitter)を開発し、原研の試験用蓄積リング(JSR, 300 MeV)に設置して(図13)その性能を確認した⁵³⁾。図11(c)はその模式図である。これを改良したAPPLE2は、アメリカ、ヨーロッパの主要な第三世代中型放射光施設に設置されて、円偏光/直線偏光の軟X線発生装置として高い評価を受けている。このほか佐々木は高調波を出さない準格子アンジュレータも開発している⁵⁴⁾。

3.9 自由電子レーザー

自由電子レーザー (Free Electron Laser, FEL) は1971年にJ. M. J. Madeyによって提案され、1977年にスタンフォード大学の研究グループによって実証された。その後、FELに対する関心が急速に高まってきて、1980年代にはアメリカおよびヨーロッパの大学、研究機関でFELの研究開発が活発に行なわれるようになった。ところがわが国ではさらに遅れて、FELの研究開発が活発化したのは1990年代になってからである。わが国最初のFELは1991年にレーズングに成功した電子技術総合研究所のTERASのFELであるが、表3に示した稼働中のFELの一覧表には、このFELは既に撤去されているため含まれていな

表3 わが国の自由電子レーザー

設置機関名	施設名	光源加速器	エネルギー (MeV)	用途	発振成功
産業技術総合研究所	自由電子レーザーラボ	蓄積リング (TERAS)	800	技術開発	1991
		蓄積リング (NIJI-IV)	310	PEEM など	1992
日本原子力研究開発機構	超伝導リニアック駆動自由電子レーザー	エネルギー回収型超伝導リニアック	17	技術開発	1997
東京理科大学	FEL-SUT	Sバンドリニアック (MIR-FEL)	40	分光, 照射など	2001
		Sバンドリニアック (FIR-FEL)	10-20		2003
東京大学	原子力工学研究施設	Sバンドリニアック	13	技術開発	1993
日本大学量子科学研究所	電子線利用研究施設	Sバンドリニアック	125	生体組織照射効果, 半導体材料開発など	2001
分子科学研究所	UVSOR	蓄積リング (UVSOR)	750	放射光・FEL 同期実験	1993
京都大学エネルギー理工学研究所	KUALIS (KU-FEL)	Sバンドリニアック	9	建設中	—
		Sバンドリニアック	40		
大阪大学大学院工学研究科	自由電子レーザー研究施設	Sバンドリニアック (グリッドパルス電子銃)	170	生体医療半導体物性化学・装置開発	1997
		Sバンドリニアック (RF 電子銃)	20		2000 (阪大移管)
大阪大学産業科学研究所	赤外自由電子レーザー	Lバンドリニアック	38	技術開発	1994
理化学研究所播磨研究所	XFEL 試験加速器 XFEL	Cバンドリニアック (DC 電子銃)	250	技術開発, テスト実験	2006
		Cバンドリニアック (DC 電子銃)	8000		建設中



図14 XFELのプロトタイプ機2006年6月20日にレーザー発振に成功した

い。なお、第2行のFELはわが国初のエネルギー回収型超伝導リニアック(ERL)を用いた自由電子レーザーであり、また、一番下の理研FEL以外は光共振器を用いた赤外～紫外レーザーである。

その後、より波長の短い自由電子レーザーの開発に注目が集まり、SASE(Self-Amplified Spontaneous Emission)方式のFELが研究されるようになった。最近では第4世代高輝度光源としてX線自由電子レーザーの建設がヨーロッパとアメリカで始まり、わが国でも理研播磨研究所がXFELの建設を開始した。2006年6月20日に、理研はかねてから建設していたXFEL試験加速器(プロトタイプ機)の発振に成功した。図14はXFELプロトタイプ機の写真である。

なお、自由電子レーザーではないが関連した研究として付け加えると、東北大学核理学研究施設は300 MeVの電子リニアックを用いて、世界で初めてコヒーレント放射光を観測した⁵⁵⁾。一方、日本大学量子科学研究所は125 MeVの電子リニアックを用いて、パラメトリックX線の利用実験を行っている。

3.10 付記

本稿では、わが国放射光研究の発展の要となった光源建設の軌跡の一つの流れとして捉え、世界の状況、ユーザーの熱意、わが国の加速器建設の状況、建設に当たった加速器研究者の創意工夫などに注目して迎えることを試みた。筆者は、ここで取り扱った放射光施設の建設を、長期に亘り間近に見てきた者の一人であり、それほど困難な作業とは思っていなかったが、始めてみると調べなければならない資料が予想以上に多く、大変難渋した。そのため、多くの方に教えて頂いたが、それでもまだ不十分だと考えており、ここで一旦筆を擱くことにした。誤りにお気付きの場合はお知らせ頂ければ幸いである。最後に、いろいろ教えて頂いた佐々木泰三、高良和武、田中治郎の各先生に感謝

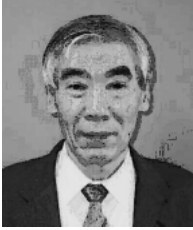
します。

参考文献

- 1) H. Nagaoka and T. Takamine: The Constitution of Mercury Lines examined by an Echelon Grating and a Lummer-Gehrcke Plate, Proc. Phys. Soc. London **25**, 1 (1912).
H. Nagaoka and T. Takamine: Anomalous Zeeman Effect in Satellites of the Violet Line (4359) of Mercury, Phil. Mag. **29**, 241 (1915).
H. Nagaoka: On the Regularity in the Distribution of the Satellites of Spectral Lines, Proc. Phys. Soc. London **29**, 91 (1917).
H. Nagaoka and Y. Sugiura: On the Regularity in the Distribution of Spectral Lines of Iron and Intra-atomic Magnetic Field, Jpn. J. Phys. **2**, 1 (1923).
- 2) T. Takamine: The Stark Effect for Metals, Astrophys. J. **50**, (1919) 23.
T. Takamine and M. Fukuda: Spectra of Constricted Arc of Metals, Jpn. J. Phys. **2**, 111 (1923).
- 3) 理研25周年, 1942年3月.
- 4) 高柳和夫: 原子分子物理—国内研究50年の移り変わり, 日本物理学会誌51巻6号(1996) 408.
- 5) IUCr: P. P. Ewald eds., 50 years of X-ray Diffraction (1962) IUCr (the free pdf version is available from <http://www.iucr.org/iucr-top/publ/50YearsOfXrayDiffraction/index.html>).
- 6) T. Terada: On the Transmission of X-Rays through Crystals, Proc. Tokyo Math.-Phys. Soc. II **7**, 60 (1913).
T. Terada: Deformation of Rock salt Crystal, Proc. Tokyo Math.-Phys. Soc. II **7**, 290 (1913).
T. Terada: On the Molecular Structure of Common Alum, Proc. Tokyo Math.-Phys. Soc. II **7**, 292 (1913).
- 7) S. Nishikawa and S. Ono: Transmission of X-Rays through Fibrons, Lamellar and Granular Substances, Proc. Tokyo Math.-Phys. Soc. II **7**, 131 (1913).
S. Nishikawa: On the Spectrum of X-Rays obtained by Means of Lamellar of Fibrons Substances, Proc. Tokyo Math.-Phys. Soc. II **7**, 296 (1914).
S. Nishikawa: Structure of Some Crystals of Spinel Group, Proc. Tokyo Math.-Phys. Soc. II **8**, 139 (1915).
- 8) S. Aoyama, K. Kimura and Y. Nishina: Die Abhangigkeit der Rontgenabsorptionsspektren von der chemischen Bindung, Z. Phys. **44**, 810 (1927).
- 9) S. Yoshida: Variation of the Atomic Structure Factor with Wave-length, Sci. Papers, I.P.C.R. **38**, 263 (1941).
S. Yoshida: K Absorption Edge of Fe in Various Chemical States, Sci. Papers, I.P.C.R. **38**, 272 (1941).
- 10) F. W. Lytle: The EXAFS family tree: a personal history of the development of extended X-ray absorption fine structure, J. Synchrotron Radiat. **6**, 123 (1999).
- 11) A. L. Robinson: History of Synchrotron Radiation, X-Ray Data Booklet Section 2.2 (2001).
- 12) 1952年より前にローレンスが来日し、その勧めで大阪大学と理化学研究所に小型サイクロトロンの建設が認められた。それを受けて、大阪大学は文部省予算で、また、理研は通商産業省の補助金で建設を開始した。なお、講和条約(サンフランシスコ条約)は1951年9月調印、翌52年4月発効した。
- 13) 木原元央: 日本加速器史の中のKEK-PS, 日本物理学会誌 **61**, 745 (2006).
- 14) INS Annual Report 1964.
- 15) 佐々木泰三: 日本と世界の放射光研究(Ⅰ)—回顧と展望—, 固体物理 **22**, 59 (1987), 日本と世界の放射光研究

- (Ⅱ)—回顧と展望—固体物理 **23**, 56 (1987).
- 16) INS Annual Report 1965.
 - 17) 佐々木泰三：光源加速器の誕生…SOR-RING 誕生のいきさつ，加速器（日本加速器学会誌）**2**, 433 (2005).
 - 18) 当時わが国で建設された大型加速器の真空は 10^{-4} パスカル程度であり，超高真空は小型チェンバーで試みられている状態であった。筆者は1968年から1970年まで滞在していた Saclay で，超高真空を研究していた研究室を訪ねて 10^{-9} パスカルの実験に強い印象を受けた。
 - 19) H. Kitamura et al.: Observation of Undulator Radiation. I. Operation Studies and Visual Observation: Jpn. J. Appl. Phys. **21**, 1728 (1982).
H. Maezawa et al.: Absolute Measurement of Undulator Radiation in the Extreme Ultraviolet, Nucl. Instrum. Methods **208**, 151 (1983).
 - 20) 佐々木泰三：INS-SOR と SPring-8，加速器 **1**, 36 (2004).
 - 21) 高良和武：フォトンファクトリー誕生の頃 日本物理学会誌 51巻12号 (1996) 879.
 - 22) 西川哲治：素粒子実験と加速器—戦後の日本を中心に—，日本物理学会誌 51巻1号 (1996) 11.
 - 23) 田中治郎：PFNEWS 23 No. 2 (2005) 39及び私信。なお，筆者は PF の当初計画の入射器はシンクロトロンであり，トリスタン計画との統合を検討する段階で線型加速器に変更されたと記憶している。しかし，文献(21), (22), (23)には当初計画の記述がない。
 - 24) T. Nishimura et al.: X-ray Replication of Masks by Synchrotron Radiation of INS-ESS, Proc. of the 9th Conf. on Solid State Devices (1977) Tokyo, JJAP Supplement 17-1, 13 (1978).
 - 25) H. Maezawa et al.: Spectral characterization of undulator radiation in the soft x-ray region, Appl. Opt. **25**, 3260 (1986).
 - 26) T. Yamakawa, S. Sato, H. Kitamura, E. Takasaki, T. Shioya, T. Mitsuhashi, M. Kihara and C. Lesmond: The construction of the superconducting vertical wiggler and its operation in the photon factory, Nucl. Instrum. Methods A **246**, 32 (1986).
なお，運転開始は1983年2月である
 - 27) G. Isoyama, S. Yamamoto, T. Shioya, H. Ohkuma, S. Sasaki, T. Mitsuhashi, Y. Yamakawa and H. Kitamura: Construction of a multiundulator, Revolver No. 19, at the Photon Factory, Rev. Sci. Instrum. **60**, 1863 (1989).
 - 28) S. Yamamoto, T. Shioya, M. Hara, H. Kitamura, X. W. Zhang, T. Mochizuki, H. Sugiyama and M. Ando: Construction of an in-vacuum type undulator for production of undulator x rays in the 5–25 keV region, Rev. Sci. Instrum. **63**, 400 (1992).
 - 29) 富家：私信，後年 SPring-8 の技術顧問になったとき，筆者によく語っていた。
 - 30) 本田 融，小林幸則：加速器 **2**, 494 (2005).
 - 31) Shigeru Yamamoto, Kimichika Tsuchiya and Tatsuro Shioya: to be published in Proc. Ninth International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI2006), May 28–June 2, 2006, Daegu, Korea.
 - 32) 国内の加速器関連施設（各施設報告と一覧表），加速器 **1**, 38 (2004).
 - 33) H. Onuki et al.: Nucl. Instrum Methods **A246**, 94 (1986).
T. Tomimasu: Nucl. Sci. Appl. **3**, 29 (1987).
 - 34) 理化学研究所史編集委員会：理研精神八十八年 (2005) 155–164.
 - 35) S. Yamamoto et al.: First Observation of Intense Circularly Polarized Hard X Rays from a Novel Multipole Wiggler in an Accumulation Ring, Phys. Rev. Lett. **62**, 2672 (1989).
 - 36) Z. Xiaowei et al.: Construction and Performance of an X-ray undulator beamline at the Tristan Accumulation Ring, Rev. Sci. Instrum. **63**, 404 (1992).
 - 37) M. Seto et al.: Observation of Nuclear Resonant Scattering Accompanied by Photon Excitation Using Synchrotron Radiation, Phys. Rev. Lett. **74**, 3828 (1995).
 - 38) Y. Kagoshima et al.: Rev. Sci. Instrum. **66**, 1996 (1995).
 - 39) 財団法人高輝度光科学研究センター10年史 (2001) ページ.
 - 40) 完成後，蛋白質の構造解析やナノテクノロジー研究で重要な役割を果たしているのだから，建設目標であったとの誤解もあるが，1986年当時は両分野ともまだ緒に就いたばかりであった。
 - 41) SPring-8 計画発足以前に，理研は世界最高性能の重イオン加速器施設を建設した (1986年完成)。その基本理念として他施設では不可能な独創的実験を可能にすることを掲げ，とくに，施設全体の安定性・性能拡張性に留意して建設したので，今日まで多くの優れた成果を挙げている。現在この加速器を入射器とする RIBF 建設が進められている。SPring-8 建設にも同じ基本理念を持っていた。
 - 42) 熊谷教孝：蓄積リングへの30 m 長直線部の導入に関して，SPring-8 利用者情報 **6**, 5 (2001).
 - 43) SPring-8 年報：2000年度18, 2001年度16, 2002年度20, 2003年度22, 2004年度20
軌道安定プロジェクトの詳細は以下の WEB ページで見ることができる：
http://www.spring8.or.jp/ja/about_us/organization/accelerator/acc_project/orbstab.
 - 44) 川島祥孝：SPring-8 の電子ビーム制御について，SPring-8 利用者情報 **4**, 4 (2001).
 - 45) 青木 毅，田村和宏：SPring-8 における高純度バンチ運転，放射光 **19**, 223 (2006).
 - 46) 田中 均ほか：SPring-8 蓄積リングの低エミッタンス化，SPring-8 利用者情報 **8**, 84 (2003).
 - 47) 田中 均ほか：トップアップ入射で実現した安定な低エミッタンス電子ビーム運転 —より高度化された利用実験のために—，SPring-8 利用者情報 **11**, 93 (2006).
 - 48) Y. Kamiya and M. Kihara: KEK Report 83-16 (1983).
 - 49) J. L. Laclare et al.: ESRF/MACH-LAT-93-08 (1993). L. Farvacque et al.: Possible Retuning of the RSRF Storage Ring Lattice for Reducing the Beam Emittance, Proc. of the 4th European Particle Accel. Conf. London, June (1994) 612.
 - 50) S. Yamamoto and H. Kitamura: Generation of Quasi-Circularly Polarized Undulator Radiation with Higher Harmonics, Jpn. J. Appl. Phys. **26**, L1613 (1987).
S. Yamamoto, T. Shioya, S. Sasaki and H. Kitamura: Rev. Sci. Instrum. **60**, 1834 (1989).
 - 51) P. M. Stefan, T. Tanabe, S. Krinsky, G. Rakowsky, L. Solomon and H. Kitamura: Initial results from an in-vacuum undulator in the NSLS X-ray ring, J. Synchrotron Radiat. **5**, 417 (1998).
 - 52) H. Kitamura: Present Status of SPring-8 insertion devices, J. Synchrotron Radiat. **5**, 184 (1998).
 - 53) S. Sasaki et al.: Design of a new type of a planar undulator for generating variably polarized radiation, Nucl. Instrum. Methods **A331**, 763 (1993).
 - 54) Shigemi Sasaki et al.: Conceptual design of quasi-periodic undulator, Rev. Sci. Instrum. **66**, 1953 (1995).
 - 55) T. Nakazato et al.: Observation of coherent synchrotron radiation, Phys. Rev. Lett. **63**, 1245 (1989).

● 著者紹介 ●



上坪宏道

独立行政法人理化学研究所特任顧問

E-mail: hkamitsubo@riken.jp

専門：加速器

【略歴】

1961年東京大学大学院数物系研究科物理学専攻博士課程終了，理学博士。東京大学物性研究所助手，理化学研究所サイクロトロン研究室研究員，同主任研究員，東京大学原子核研究所教授として原子核物理，加速器工学の研究に従事。その後，大型放射光施設建設共同チームリーダー，理化学研究所理事，高輝度光科学研究センター副理事長を経て現職

Historical overview of the synchrotron radiation research in Japan

—from the view point of creative works in the development of light sources and related technology—

Hiromichi KAMITSUBO RIKEN Wako Institute, 2-1 Hirosawa, Wako-shi, Saitama 351-0198, Japan

Abstract Synchrotron radiation research in Japan started in early 1960's when the first electron synchrotron was commissioned at the Institute of Nuclear Study (INS), University of Tokyo (UT). This review covers the parasite use of the INS electron synchrotron and research works done at the light sources in Japan such as SOR-RING, Photon Factory (KEK-PF) Accumulator Ring (KEK-AR), and SPring-8. History of synchrotron radiation research in Japan was overviewed by paying attention to the creative works in the development of light sources and related technology, as well as the pioneering works on the development of experimental techniques and methods. At present there are more than ten synchrotron radiation sources are in operation and the number of their users, especially users from industries in Japan is increasing very rapidly and the research fields of users are also developing. Accordingly the synchrotron radiation facility becomes more and more indispensable facility in the society in Japan.