



## 放射光科学の第三世代

—西播磨テクノポリスと 6 GeV・SR 計画の周辺—

佐々木 泰 三\*

シンクロトロン放射 (SOR, 放射光ともいう) は電子加速器で発生する強力な白色光で、レーザーの開発がおこなわれている紫外線・X線の領域で、光を用いる基礎科学と先端技術の有力な研究手段として登場し、1980年代には世界各国に専用の巨大施設が相次いで完成した。

そもそも事のおこりは1950~60年代、素粒子実験用につくられた電子シンクロトロンの光を極紫外・軟X線分光学の研究者が便乗して使いはじめたもので、これを第一世代とすると、はじめから加速器を光源としてつくることとなった70~80年代が第二世代である。わが国では原子核研究所のシンクロトロンが動き出した1962年に第一世代の研究活動がはじまり、第二世代としては1974年に完成した世界最初の専用光源加速器 SOR-RING, 1982年に完成した高エネルギー物理学研究所のフォトン・ファクトリーがある。この分野では日本の研究者はつねにパイオニアで、欧米にも大きな影響を与えてきたし、現在もひきつづき世界の先頭集団の一翼を担っている。

放射光の現代科学・技術へのインパクトはきわめて大きい。基礎科学の分野での二・三の例をあげてみよう。原子や分子の光電離・光解離の過程の解明は宇宙・地球科学、核融合研究、光化学反応やその工業的応用の基礎となる。その断面積の測定にはじまり、光電子・光イオンのエネルギー、角度分布の詳細な測定による励起と緩和の原子過程についての知見はこの10年間放射光の利用によって面目を一新した。

また固体の光電子分光は半導体や金属のバンド構造の精密決定、バルクと表面の電子過程、とくに表面の化学的過程の理解に決定的な役割を果たし、VLSI を中心とする固体デバイスの

急速な進歩を支えてきた。

またX線の回折・散乱による古典的な結晶学も面目を一新し、筋肉や生体膜の動的過程を分子レベルで追うとか、構造相転移、たとえばグラファイトがダイヤモンドになる過程をリアルタイムで観察するとか、磁区や転位の運動をこれまたリアルタイムで観察・記録する実験が日常的に可能になった。

また明瞭な回折像が得られない、不規則な構造や表面の化学反応、生体高分子の活性中心などといった対象がX線分光技術で促えられるようになり、触媒や酵素反応の研究などに大きな進展が生じつつある。

これらの基礎研究はいずれも直接・間接に現代のエレクトロニクスを中心とする先端技術に影響を与えつつあるが、さらに進んで放射光の直接的な工業的応用の可能性も検討されている。その重要な分野の一つがX線リソグラフィによる半導体素子の画像転写で、デザイン・スケールが  $0.5 \mu\text{m}$  以下になると予想される1990年代の超微細加工では、研究の段階をこえて、生産工程への直接的導入が課題になるであろう。また一方では心臓・血管等の循環系疾患や各種の癌・腫瘍のX線診断ないし治療に放射光の硬X線が威力を発揮することがあきらかとなり、医学への応用も世界各国で早くも動物実験の段階から人体での試験に進む勢いにある。

このようにして、光源加速器という手段を共有し、高輝度の紫外線・X線を用いて、物質の機能と構造の解明を目ざす、「放射線科学, Synchrotron Radiation Research」という新しい学際的な研究分野がこの10年間に形成された。現存の光源用加速器は、(1)X線を発生する2~3 GeV級の専用機、または4~10GeV級の共用機(主目的は素粒子実験)と、(2)主として極紫外・軟X線用の1 GeV級以下の装置(ほ

\*佐々木泰三 (Taizo SASAKI), 大阪大学基礎工学部教授, 物性物理工学科, 理学博士, 物理学

とんどが専用機)にわかれているが、ここ数年間の光源技術の著しい進歩によって、加速器の軌道の直線部に磁場を加えることによって電子を発光させる、「挿入型光源 (Insertion Devices)」が大きな成功をおさめ、放射光科学全体が更に大きな飛躍の時期を迎えようとしている。

挿入型光源は大別して二つに分かれ、一つはアンジュレーター (Undulator)、もう一つはウィグラー (Wiggler) とよばれる。装置としては本質的に同じもので、どちらも一定周期の磁極を直線上に多数配置し、電子を何べんも蛇行させるものである。Uは弱い磁場を用い、電子は磁極ごとに出す光の場の中を走るので、干渉条件をみだす波長の光は強調され、他は消えてしまつて準単色光となる。これに対してWは強い磁場を用いてスペクトルを短波長にシフトさせ、さらに磁極の数に応じて輝度も増すしかけである。加速器の円軌道から出る通常の放射光(以下Sとよぶ)にくらべ、Uは長波長、Wは短波長域をカバーすることになるが、輝度でくらべるとUはSの3~4桁上、WはSの2~3桁上になる可能性がある。とくにUは必要な波長域にだけパワーを集中し、光学系に無用の損傷を与える白色成分を減衰させるという利点があり、高輝度光源としてきわめて有利である。そこで現在から将来にわたって放射光X線利用のニーズの最も多いと考えられる10~30keVの領域で、Uの導入によって輝度を上げようすると、必要な電子のエネルギーは6~10GeVとなる。一方紫外・軟X線でUの利益を存分に活用しようと思えばエネルギーは2GeV程度になるであろう。さらに目的を絞ってたとえばリソグラフィ用軟X線の単色光源をつくるとすれば、0.5GeV程度のエネルギーで超伝導多極ウィグラーを利用する方向に行くであろう。

放射光利用者がつねにより多くのフォトン・フラックスを求め、光量が増すにつれてより高いエネルギー分解能・空間的・時間的分解能で対象に迫り、そのたびに知見や新しい課題を発見する、というプロセスは学術の発展の法則であつて、とどまることがない。そのニーズはす

にフォトン・ファクトリーの最近3年間の活動の成果とともに強く意識されつつある。一方、挿入型光源の技術もフォトン・ファクトリーの永久磁石型アンジュレーター(120極)や超伝導縦型ウィグラー(3極6テスラ)の成功や欧米各国の実績ですでに成熟しており、放射光科学の「第三世代」がこのような挿入型光源によって担われる、ということも疑う余地がない。

すでにヨーロッパ連合ではこのような第三世代の光源(5GeV)をグルノーブルに建設することを決定しており、米国ではブルックヘブン、アルゴンヌ、スタンフォード等から提案された6GeV光源の建設計画が調整段階にある。またバークレーからは極紫外・軟X線用の1~2GeV級光源(ALS)の建設提案が出され、スタンフォードではさらに一歩進んだ自由電子レーザー用1.3GeV光源の建設がはじまっている。自由電子レーザーは現在までに赤外と可視域ではすでに成功例が報告された、Uをベースとする装置で、真空紫外やX線で放射光が現在占めている地位にとって代るには未だ多くの難問を克服せねばならないであろう。

これに対してわが国では阪大・京大を中心とするグループが83年から検討作業を開始し、兵庫県の西播磨テクノポリスに建設することを目標とする6GeV級の第三世代光源の計画が進んでいる。西播磨テクノポリスは第1図のように中国自動車道の佐用ICと山陽新幹線相生駅の間で広大な敷地を造成してつくられる兵庫県の学術・先端技術地域の計画で、6GeV光源はその学術的中心施設として位置づけられている。テクノポリス計画自体はすでに9月に政府の認可を受けて着工しており、6GeV-SR計画は加速器の基本設計、利用計画策定のための研究活動を今年度から開始した。放射光研究の従来の中心が東大および高エネルギー物理学研究所など関東地区の文部省関係機関に集中しているため、この方面の専門家の参加ないし協力が計画の推進にとって不可欠であるが、すでに関西各大学の研究者は数多くフォトン・ファクトリーでの研究活動を通じて力をつけて来ており、関西でこのようなプロジェクトを遂行する基盤は形成されつつある。しかし何といつても

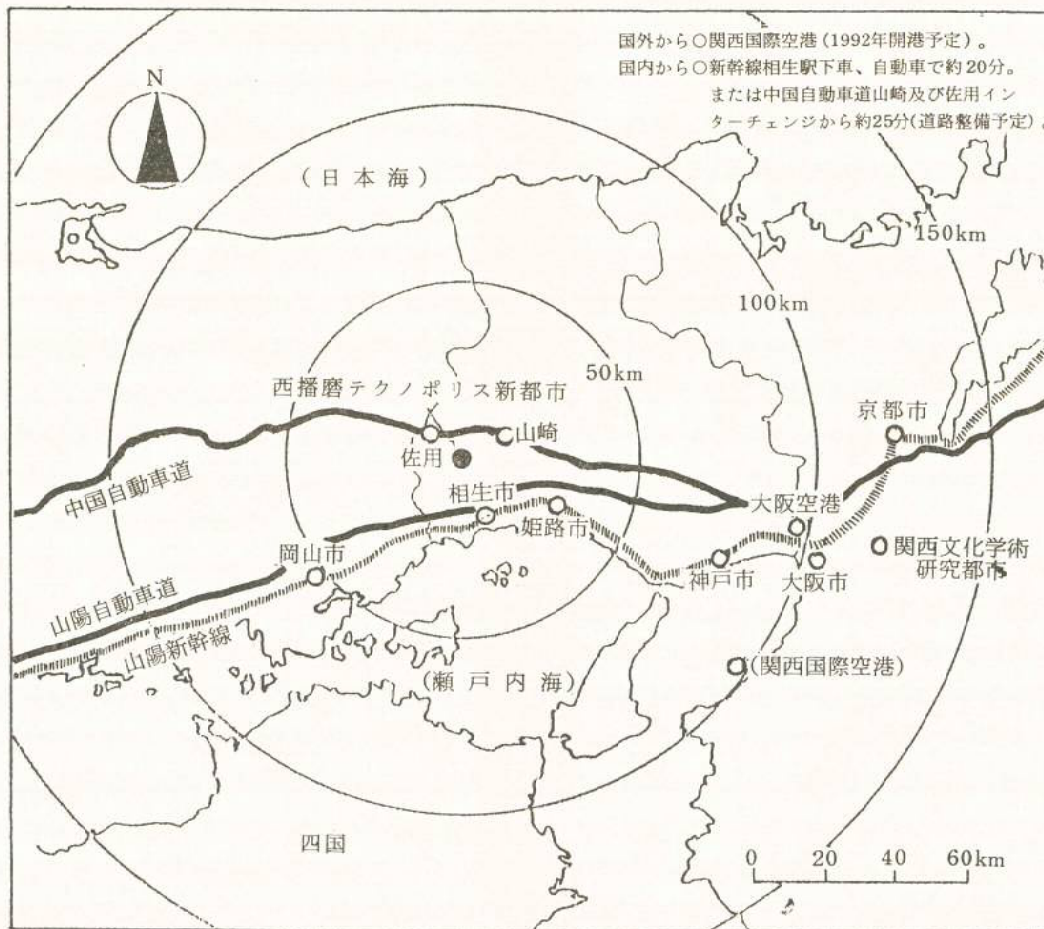


図1 西播磨テクノポリスと関西主要都市・施設の位置関係

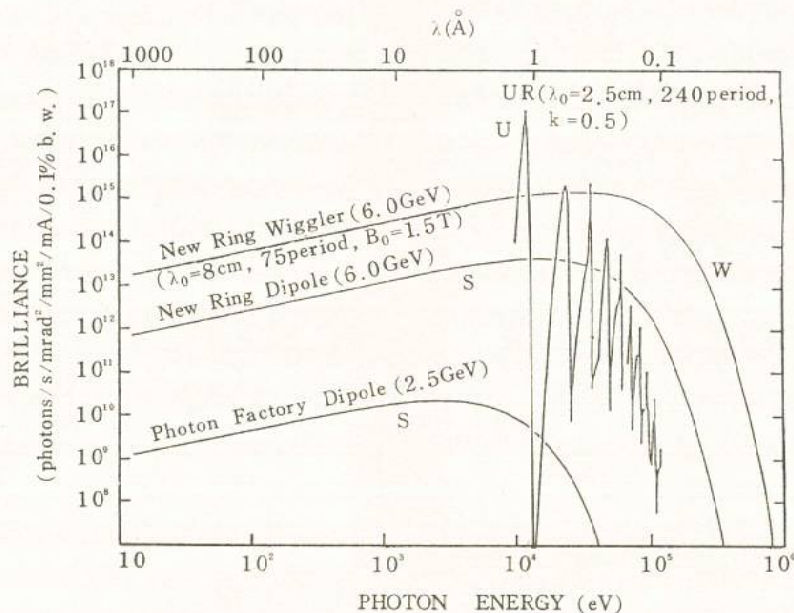


図2 6 GeV 放射光 (S,W,U) の輝度。(北村英男・私信)

プロジェクトの規模が大きく、予算規模500億円、人員400名、期間5~10年にわたると予想される建設を支障なく遂行するのに決定的に重

要なのは人材の養成で、加速器理工学、放射光科学という従来わが国の大学にはおかれていない、学際的な研究分野で人材養成にあたる大学

院の専門課程の設置が望まれる。幸い高エネルギー物理学研究所は既存の大学学部に、このような専門課程を設置してこれと連携して後進の指導に当たり、また研修の場として院生の委託を受け入れる、という方針を積極的に進めており、たとえば大阪大学をはじめとする複数の大学にこのような課程を設置することは今後のわが国の放射光科学の進歩のみならず、広汎な加速器科学の発展にとってきわめて大きな意義をもつであろう。

6 GeV 級光源の最終仕様をきめるまでには今後多くの設計作業のつきかさねと、設計者と利用者との議論・対話が必要である。しかしとりあえず、いくつかのパラメタを仮定して6 GeV の第三世代光源が大体どんなものかを示すモデルをつくり、試算した結果を第2図に示してある。光源の性能を最も具体的に表現する量として「輝度 (Brilliance)」を選び、横軸にフォトン・エネルギーあるいは波長をとり、S・U・W の三つのタイプの6 GeV 光源のスペクトルと、比較のため現在のフォトン・ファクトリーのスペクトルを示してある。Uのパラ

メタは最大のピーク (1次光) が1 Å 付近に来るように設定してあり、パラメタをかえればこのスペクトルは比較的容易に変えられる。このモデルで6 GeV のSに比べてWで約2桁、Uで約4桁 (1次光) の利得があることがわかるが、現存の2.5 GeV のSにくらべるとWで5桁以上、Uで7桁以上 (10 keV 領域) 光は強くなる。現在筑波のフォトン・ファクトリーで従来の光源と桁ちがいの線源を使って得られた技術革新と学問的発展の規模を思いうかべつつスケールアップをすれば、放射光科学と技術が再び面目を一新することは容易に想像できる。もちろんこのようなつよい光による加速器と光学系への放射線損傷と熱負荷の問題が容易ならざる技術的課題であることも想像できるが、これも従来の経験から外挿して考えれば決定的な障害とはならないであろう。このような問題で苦労しているのは幸か不幸か、放射光だけではないので、レーザー、核融合の研究者も悩みを共有している。この困難を克服する努力は結局それに価するという認識に支えられていままでも続けられたし、今後もそうなるであろう。

