



大型放射光施設 SPring-8 の 10年目の成果と展望

Achievements of The World Largest Synchrotron Radiation Facility SPring-8 During 1st Decade and Foresight

永田正之
Masayuki Nagata

(財) 高輝度光科学研究センター
常務理事

1 はじめに

日本が世界に誇る大型放射光施設、SPring-8は昨年10月に、多くの皆様のおかげをもって供用開始10周年を迎えた。10年一昔と言うが、SPring-8も必ずしも平坦な道のりではなかった。SPring-8建設期はまさに日本のバブル期であって、SPring-8の運営主体として財団法人高輝度光科学研究センターが設立された時には、産業界の期待を受けて基本財産として六十数億円の出捐金を集めることができた。科学技術の面では米国から日本に、基礎研究ただ乗り論の批判が出て、対処するため基礎研究への取り組みが期待されていたが、その後の「失われた10年」を経て、日本の研究開発の効率の悪さが問題となり大学法人化を始め基礎研究分野で大きな改革が進められた。一方、日本企業も業界の横並びを脱して、生き残りをかけた決断を余儀なくされ、選択と集中によって基礎研究への見方も相当に厳しくなった。

また、SPring-8を建設した日本原子力研究所(現日本原子力研究開発機構)と理化学研究所も、特殊法人改革により独立行政法人となり、これを機に前者はSPring-8の経営から撤退された。財団法人高輝度光科学研究センター(以下JASRI)を設立した根拠法、大型放射光利用促進法(SR法)が、平成18年7月には改正され大型研究施設共用促進法になった。これによってJASRIの業務も細分化されることになった。また、JASRIは財団法人として現在進行中の公益法人改革の波にさらされつつある。

このような激変の中、特にここ数年で急速に進展したSPring-8の産業利用を中心に成果と展望について紹介する。

なお、既にふえらむには継続的にSPring-8の技術紹介記事がいくつか掲載されている¹⁻¹³⁾。従い、それらとは異なった視点からSPring-8の10年を眺めてみる。

2 大型放射光施設 SPring-8 の装置としての特徴

SPring-8は放射光施設として世界最大であり、たぶん今後も世界最大で有り続けるであろう(図1)。それは元素の周期律表にある大部分の原子(水素からウランまで)の特性エネルギーをカバーしているからである。また、リングの性能は、蓄積電子エネルギーが8GeVと高いことに加え、電子ビームのサイズ、あるいは放射光の発散度合いを示すエミッタンスが低い(小さい)事が特徴である。日本の加速器分野の人たちは極めて優秀で、設備の建設がタイミングの良い予算措置によって順調に進んだ事もあるが、でき上がった装置のエミッタンスは世界の常識を塗り替えるものであった。電子はお互いに反発するので、電子ビームのサイズを周長1436mにわたり絞るのはなかなか難しい。これが素粒子を対象とする加速器と最も異なる点である。SPring-8では、立地した地盤の堅さ、寸法を維持する温度コントロール、電子の制御技術などが相俟って、周長1436mにわたり10 μ mレベルに押さえ込まれている。また、2004年5月よりはトップアップ



図1 SPring-8全景(リングの直径、約500m)

プ運転が行われており、利用者は光源強度を気にする必要がなくなった。すなわち、シンクロトロンから蓄積リングに電子が打ち込まれる際、以前は、既に蓄積されている電子が、後から追加される電子の影響を受けて、電子軌道が揺れた。当然、光も揺れるので、電子の入射時には実験を中断せざるを得なかったが、現在は、元の電子軌道をほとんど揺らさずに1分ごとに電子を追加する技術が確立した。結果、光源強度はほとんど変化しなくなり、実験に影響しないばかりか測定データの補正が不要になった。トップアップ運転による利用者の利便性向上は非常に大きい。「低エミッタンス」と「トップアップ運転」は世界の放射光光源の目標になっているが、SPring-8においてこれらは既に高いレベルで達成されている。

3 SPRing-8の産業利用の広がり

しかし、SPring-8が放射光光源としてどれほど優れていても、その利用制度が伴わなければ真価を発揮できず宝の持ち腐れになる。ユーザーが装置を活用し、良い成果を得て初めて装置の素晴らしさが一般に認識される。その意味で初期には利用の重要性が認識されていなかった。というよりそこまで手が回らなかったということかも知れない。とにかく、利用についてのしきいの高さから、当初は企業利用者の評判が悪かった。最先端の装置は、放射光のことを深く勉強した専門家だけが使う権利を有するという驕った文化があった。

3.1 産業利用施策の実施と展開

これに対し文部科学省は産業利用にとって重要な施策を実施された。一つは施設利用の手ほどきをするコーディネーター制度創設、産業利用の共用ビームライン設置、次に初心者を優遇するトライアルユース施策、更に成果を積極的に生み出す大型先端研究施設戦略活用プログラムなど、産業利用の成果が出るのに比例して次々と手厚い施策が打たれた。産業界からの要望に応えるのみならず、日本の科学技術施策のトレンド、納税者に理解される科学技術を先取りする動きであった。

特に、SPring-8のコーディネーターが果たした役割は大きく、放射光がいかにも明るくても「たかがX線」であって、一般から見れば単なる物性測定ツールである。ただそのツールは常識を遥かに超えたツールであって、「それが見えないものが見えるようになるX線」であった。このシーズとニーズのギャップを埋めるべく、両方に精通したコーディネーターが施策実現に大活躍した。特に役所の要請は、あまねく広く、ということであるが、分野によって実際はトップランナーが走る方が効果大きい場合もある。成果を最大化する事を目

標に、相手に応じて「かゆい所に手が届く」サービスを行った。

これらの施策の結果、SPring-8を利用した企業は230社を数える。この中で、エレクトロニクスが約40社、金属・鉄鋼は17社であった。また、2006年度だけでも180社、延べ約2,300人の企業研究者が高い出張旅費と人件費を負担してSPring-8にきた。SPring-8で実験を行った研究者全体の延べ人数が11,640人であるから、丁度20%である。課題数でもやはり20%程度である。また、成果を公開しない有料の成果専有課題も着実に増加している。

興味深いことに産業利用だけでなく、大学の工学部系の先生方の利用も増えてきており、放射光の専門家という制限は産業利用だけに影響していたわけではなかった。

3.2 SPRing-8利用推進協議会の役割

SPring-8を運営する財団法人高輝度光科学研究センターは法律によって機構に指定され、業務も自由度がなく全て文章に規定されていた。また、費用についても全て予算項目に従って業務が行われていた。これでは特にニーズとシーズがかけ離れた初期段階では円滑な利用者支援ができない。

このため任意団体としての企業ユーザーの団体、SPring-8利用推進協議会が設立された。もともと大型装置の誘致や建設への協力団体という性格もあったが、研究会活動などを通じた利用方法の啓蒙、利用制度の改善に関する要望提出など、特に産業利用者の現場の声を集める場として機能した。現在ではJASRIの人材も自由度も増え、施設を利用する講習会などもJASRI自身が実施する体制になったので、今では啓蒙活動というより先行企業の成果PRとSPring-8の特徴をPRするという相互理解の場を提供している。また、海外の放射光施設調査を行い、利用や運用に関する情報収集と会員への情報提供により、放射光の産業利用に関して深く考えて頂く機会を提供している。活動の概要はウェブページ <http://www.spring8.or.jp/ext/ja/iuss/> に示されている。

ともすれば企業利用者は多忙なので、目先のビームタイムが確保できれば良く、施設全体の運営には関心がないというスタンスになりがちである。そこを、年に数回は、施設全体の状況をご理解頂いて、ご意見を頂くことが重要で、この時、理想論ではなく現場に立脚して建設的な知恵を出して頂くためには、実験担当者とは会社幹部の間のマネージャークラスが適切である。ただ、適切な意見を言って頂ける人ほど忙しい。

3.3 産業利用分野の成果

SPring-8で実施された研究課題は10年間の累積で11,500件に達する。2006年度で年間約1,700件の実験が行われ、産業利用でも約300件の課題をこなした(図2)。必ずしも1回

産業利用の広がりを以下に概観してみる。

もともこの分野の企業の放射光利用者は多く、LSI 研究はもとより光通信、フラットパネルディスプレイなどの分野で多数の成果があり事業にも貢献している。ただ、製品の寿命が短く、多くの技術の組み合わせであるため、学会ではインパクトがあっても一般に認知されない面もある。業界は応用物理学会などの影響もあり成果発表は活発でオープンな分野であるといえる。

なかでも、光電子分光という技術は表面敏感な技術で超高真空を必須としていたが、放射光の高エネルギーのおかげで少し深い所の光電子が捉えられる様になった。このため、通常真空中で表面解析が可能になり、微細化の進むLSIの研究に大きなインパクトを与えている。また、日本企業が強いFPD用の素材研究でも放射光の特徴を活かして多くの成果が生ま

図2 SPring-8の利用統計（半期毎の共同利用及び専用施設利用の推移）

区 分	B L 数				合 計
	共用 ★	専用 ●	理 研 ◆	加 速 器 診 断 ■	
稼動中	26	14	7	2	49
調整・建設中	0	3	1	0	4
合 計	26	17	8	2	53



図3 SPring-8のビームラインマップ

出されている。放射光による表面反射率の測定で、ダイナミックレンジ 12 桁という驚異的な測定が可能になっている (図 4)。

(2) 記録材料

ハードディスクや DVD などの記録材料において磁気記録媒体のみならず読み取りヘッドや青紫レーザーダイオードの研究が行われている。特にスピバルブと呼ばれる GMR ヘッドは、オングストローム厚の多層膜の成分分析、工程改善に活用され、ハードディスクでは表面の DLC や、表面に塗布される特殊な油の研究も行われた。DVD 記録媒体の高速読み書きの材料的なメカニズム解明がなされた。最近では磁性研究に放射光の MCD (円偏光二色性) という技術が注目されていて企業の課題応募が急増している。またナノテク研究や磁気メモリのみならず、レアメタルの高騰、資源問題とハイブリッドカー等のモーター出力増大を狙い、新磁石材料開発に MCD 技術が欠かせない。

(3) 金属材料

X 線構造解析は金属の研究に欠かせないツールであるが、放射光による応力測定、イメージングなどにも展開されている。放射光による鉄鋼の表面さびの研究によって、緻密なさびが実現し、さびない鉄が橋梁などに実用化された。また、自動車の車体に大量に採用されている亜鉛めっき鋼板でも新しい知見が出てきたり、金属の溶接凝固割れ解明のため SPring-8 にアーク溶接装置を持ち込んで in-situ 実験し、高速で凝固観察した事例はよく知られている^{14,15)}。応力測定では、水中でのレーザーピーニングにより表面に圧縮残留応力を付与できることが SPring-8 で実証され、既存の原子炉の

安全性を高め寿命をのばした事例がある。金属の凝固時にデンドライトが生成する様子をリアルタイムで捉えたり、疲労き裂を 3 次元的に CT 観察したりと、金属分野での放射光の活用が広がってきた。また、イオンの価数や配位状態がわかることからめっきの研究にも役立っている。ただ、SPring-8 の特徴である数十から 100keV あたりでの高エネルギー X 線を使った研究はまだ拡大の余地がある。

(4) 高分子材料

高分子繊維の紡糸時にシシカバブ構造がどのように生成して繊維強度に影響するのかや高分子シートのラメラ構造などが X 線の小角散乱で解析できる。小角散乱による長周期の結晶構造と広角散乱による短周期の構造が同時に測れるので、急速に利用が広がっている分野である。世界の放射光施設でもヘテロジニアスな材料研究が盛んである。

(5) 超電導材料

新しく発見される超電導材料の構造解析や超電導発現機構の研究に加え、実用化が始まった銀シースビスマス系高温超電導線の熱処理過程を銀シースのまま in-situ 測定して高温超電導相の生成過程が直接観察されている。前者では ARPES と称する角度分解光電子分光手法が、高温超電導発現メカニズム解明のキーテクノロジーと見られている。後者では、工場の大型炉中での反応が手に取る様に再現されている。

(6) 創薬

1 万～数万におよぶ分子量を持つ蛋白質の結晶構造解析は放射光の最も得意とする所である。このためゲノム創薬を目指して世界的な協力／競争のもと、蛋白質データベースが整備されつつあり、SPring-8 でも理研がその一翼を担っている。製薬会社は蛋白質の構造解析に参加するのみならず、自社の持つ薬候補化合物と標的蛋白の結合構造、活性点などを放射光で研究している。ただ、製薬会社は研究内容を一切公表せず、有料の成果専有利用がほとんどという際だった特徴がある。

最近では、放射光によるデータによって結晶多型が見分けられることから、製薬原料の粉末結晶構造解析が脚光を浴びている。加えてソフトウェアの急激な進歩により、粉末 X 線回折データから未知構造解析が可能になるところまで進んできた。

また SPring-8 の放射光では研究室の X 線データに比べ、測定時間が早いだけでなく、データの質 (S/N 比) が圧倒的に優れているので解析も楽になることから、日常的に使いたいというニーズも強い。

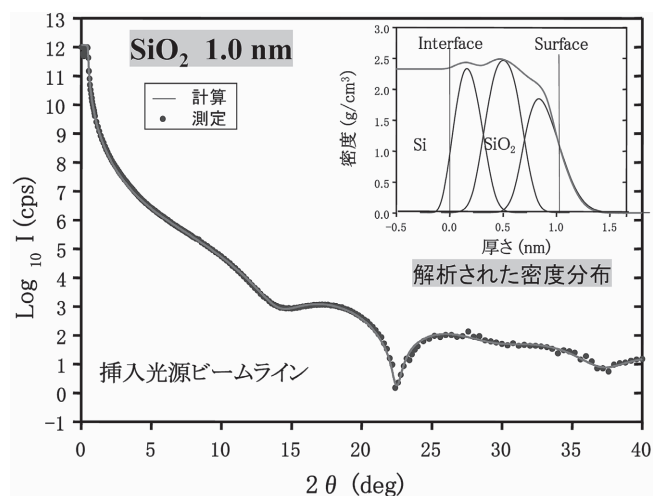


図 4 放射光による表面反射率測定データ (ダイナミックレンジ 12 桁、1nm の極薄膜積層構造の十分な定量) 富士通研淡路ほかによる

(7) ヘルスケア

最近急激に増えている分野としてヘルスケア分野がある。髪の毛や皮膚角質層の構造を SPring-8 で調べ、シャンプーやコンディショナーの新製品開発、化粧品開発に活用した事例が出てきた。また、薬事法により経皮吸収薬が認可されるようになったことから、角質や細胞間脂質などの研究が盛んである。また、これらの知見は食品の糖質や澱粉研究とも共通する部分があり、食品の甘み研究、歯磨きペーストやひげ剃り器の研究まで広がっている。

(8) 環境／エネルギー

環境汚染物質は主として重金属が多いことから SPring-8 はその分析に適している。シダなどの植物による土壌浄化、焼却炉におけるダイオキシン発生メカニズム研究、汚泥中の重金属の反応研究に SPring-8 の蛍光分析、XAFS 技術などが活用されている。

エネルギー分野として燃料電池、リチウムイオン電池、ニッケル水素電池などが SPring-8 で活発に研究されている。電極材の改善による容量増加や充放電サイクル寿命の劣化原因究明、スタック複合体の歪み測定など多方面から成果が得られている。

(9) 触媒

触媒分野は XAFS 技術を中心に著しい進化をとげており、工業触媒はもとより自動車用排気ガス浄化触媒は SPring-8 で最も大きな成果をあげた事例といえる。SPring-8 でメカニズム解明された大量酸素貯蔵放出型 3 元触媒は 3000 万台を超えるガソリン車に搭載されている。これとは別に軽自動車用排ガス触媒でも走行距離にたいしてほとんど劣化しない触媒のメカニズム解明がなされた事例もある¹⁶⁾。

(10) 土木

従業員が 100 人に満たない中小企業でも、水和セメントの反応を SPring-8 で調べ、そのデータを営業活動に活用して多くの防水工事を受注施行した事例がある一方、大手ゼネコンの一角はコンクリートの長期寿命予測にチャレンジしてコンクリートの放射光による CT 観察を行っている。

(11) その他

このほかにも犯罪捜査への SPring-8 利用、考古学分野における三角縁神獣鏡の非破壊分析など、社会に貢献する成果も多い。

以上の様に SPring-8 の放射光が活用される分野は極めて広くなり、放射光で回折、構造解析するのは当たり前の世界

になってきた。ただ、データをうまく活用するためには、工場の製造条件や製品が実際に使われる状態を模擬する試料環境を、SPring-8 の実験スペースにいかにもうまく作るかが決め手であり、研究者のアイデアが問われる。JASRI は文部科学省の支援を受け、見識のあるコーディネーターと有能な技術支援者を揃えており、多数の事例を集積しノウハウを有している。ここに相談頂くのが近道である。大企業、中小企業を問わず、2 百数十社が既に SPring-8 を繰り返し利用されている。個々の事例については SPring-8 のホームページ <http://www.spring8.or.jp/ja/> をご覧頂きたい。

4 今後の展望

当然の事ながら、SPring-8 自体ではものは作らない。あくまでも世界最高の分析装置である。分析装置としてその性能や効率は、測定される材料によって実証される。分析技術と材料開発は車の両輪であって、両方が揃わなければならなし、両者をうまく機能させると大きな成果が得られる。日本企業における材料開発は世界でも優位であり、社会に大きなインパクトを与える事ができる。日本ではものづくりに対する理解もあるので、つくづく SPring-8 が日本にあって良かったと感じる。SPring-8 の成果は、明らかに日本の産業構造を反映している。SPring-8 はものづくりに非常に役立つものであって、日本の科学技術の基盤を支えるものである。企業の方々が、分析へのご理解を深めて頂き、自社の材料開発に SPring-8 を有効に活用して下さることを願う。

今後 10 年を見通しても SPring-8 は、ハードとして世界最高であり続けるであろう。ただ、産業界は研究開発のスピードが重要で、10 年一日のごとく同じ研究を続けることは少ない。このため、SPring-8 のような大型装置は、業績が浮き沈みする産業界ではなく、じっくりと長期に研究する学術に基礎をおくべきであろう。現在の SPring-8 の産業利用は、多種多彩な分野から、全体として 20% 程度になっているのはある意味、適切ではないかと考えられる。

一方、SPring-8 の 8 割を占める学術利用は、成果を一般に説明するのは難しい部分があるけれども、例えば、今はやりのサイテーションで引用回数が 2000 を超える論文が SPring-8 で生み出されているのをはじめ、平均でみても国内多くの研究機関の中で上位に位置するレベルである。

このように SPring-8 は世界との競争の中で産学とも優れた成果を生み出してきていると自負しているが、SPring-8 の運営を行う JASRI は、所有者である理研の入札によって毎年契約更新をするという不安定な立場になった。利用者選定や支援業務は国からの交付金によっているが、これも単年度予算であって、JASRI 全体としての長期展望が描きにくい。加

えて本年末から始まる公益法人改革も運営体制に大きな影響が避けられない。また、10年を経てもまだ、JASRI 職員の責務としての利用者支援と自主研究の比率のあり方に迷いがある。これらの困難を乗り越えるのは一にかかって「施設の生み出す成果」であると思う。

これから日本の科学技術の大型研究施設として J-PARC、XFEL、次世代スパコンなどが続々と建設され、完成を迎える。SPring-8 における産業界との関わり方が何らかの参考になり、日本の競争力向上に貢献することができれば幸いである。

参考文献

- 1) 廣沢一郎：ふえらむ, 9 (2004) 7, 490.
- 2) 秋庭義明：ふえらむ, 9 (2004) 8, 559.
- 3) 川崎宏一：ふえらむ, 9 (2004) 9, 613.
- 4) 山下正人, 水木純一郎, 小西啓之, 内田仁：ふえらむ, 9 (2004) 10, 699.
- 5) 木村正雄：ふえらむ, 9 (2004) 11, 783.
- 6) 中山武典：ふえらむ, 10 (2005) 1, 9.
- 7) 谷山明：ふえらむ, 10 (2005) 2, 81.
- 8) 早川慎二郎：ふえらむ, 10 (2005) 10.
- 9) 中前勝彦：ふえらむ, 11 (2006) 1, 9.
- 10) 鈴木裕士, 菖蒲敬久：ふえらむ, 11 (2006) 11, 701.
- 11) 鈴木茂, 篠田弘造, 斎藤正敏, 松原英一郎, 早稲田嘉夫：ふえらむ, 12 (2007) 1, 9.
- 12) 二宮利男：ふえらむ, 12 (2007) 2, 65.
- 13) 淡路直樹：ふえらむ, 12 (2007) 3, 131.
- 14) 米村光治, 小薄孝裕, 寺崎秀紀, 小溝裕一, 佐藤真直, 豊川秀訓：鉄と鋼, 93 (2007) 2, 68.
- 15) 小溝裕一, 寺崎秀紀：鉄と鋼, 94 (2008) 1, 1.
- 16) 安保正一, 杉浦正治, 永田正之監修：SPring-8 の高輝度放射光を利用した先端触媒開発, (株) エヌ・ティー・エス, (2006)

(2008 年 6 月 30 日受付)