

米国におけるシンクロトロン光施設を訪問して

愛知県内では、次世代のモノづくり技術を創造・発信する「知の拠点」整備が愛・地球博の跡地で進められており、その中で産学連携の橋渡しを担う先導的中核施設やモノづくりの基盤となるナノテクノロジー分野での高度な計測・分析を可能とする「中部シンクロトロン光利用施設（仮称）」の建設が始まっています。

シンクロトロン光（放射光）施設は学術的にも非常に広い範囲をサポートするものであり、ライフサイエンス研究への応用の拡がりとともに、産業界での研究利用が活発化するなど、シンクロトロン光施設の重要性は世界的にもますます高まってきているようです。とりわけ、北米、ヨーロッパ、アジアを含めて、世界中で大型のものから小型のものまで、様々なタイプのシンクロトロン光施設がすでに稼動しており、世界的な技術開発競争の中で、シンクロトロン光施設はビジネスの動向を大きく左右する重要な研究開発施設となってきています。

こうしたことから、愛知県サンフランシスコ産業情報センターでは、米国におけるシンクロトロン光施設の動向の調査の一環として、今年3月以降、SLAC 国立加速器研究所（カリフォルニア州メンローパーク市）や、ローレンス・バークレー国立研究所（カリフォルニア州バークレー市）、アルゴンヌ国立研究所（イリノイ州レモント市）を訪問し、それぞれのシンクロトロン光施設の概況について聞き取りを行いましたので、その内容をご紹介します。

*シンクロトロン光とは（愛知県「知の拠点」パンフレットより）

ほぼ光速で直進する電子が電磁石によって進行方向を変えられた際に発生する電磁波。非常に明るく（通常の計測装置の千倍から百万倍）、1台の装置でマイクロ波、赤外、可視、紫外から X 線まで連続した波長の光を出すことができる。

（宇宙の始まりの解明にも一加速器の起こり）

もともと、シンクロトロン光利用につながる高エネルギー物理の研究は、20世紀初頭にイギリスが最初に力を入れ始め、続いて米国や日本でも研究が活発化しました。電子を高速でぶつけると運動エネルギーが生まれ、ビッグバン直後の状態が作られることにより、その後どのような素粒子ができたかがわかるとのことで、こうした研究を通じて宇宙の始まりにさかのぼることができるようです。なかなか壮大なロマンを感じさせるものですが、「物質の本質や宇宙の起源に迫りたい。」という研究者らの熱い思いが、この分野の研究の中核的な役割を担う加速器と呼ばれる装置の開発・改良につながったとのことで、その研究発展の歴史の中で、送電線技術を活用した方式や線型加速器、円形加速器など様々な加速器の種類が生みだされてきました。

（加速器の発展とシンクロトロン光施設の登場）

そうした加速器を使った研究が20世紀に発展していく中で、1940年代にシンクロトロン光の存在が確認されました。シンクロトロン光は、真空中で光速に近い速度で直進する電子が、電磁石によって進行方向を変えられた際に放射される電磁波のことをさしますが、最初

は、それ自体が電子から放出されたエネルギー損失であるとして、利用価値のないものと考えられていました。ところが、その後の研究でシンクロトロン光の持つ性質が様々な研究に使えることが分かり、1960年代以降、シンクロトロン光を利用した研究が急速に発展し、シンクロトロン光利用施設が世界各地に建設されるようになりました。

1990年代になると、加速器の技術やアンジュレータ（周期的な磁場）装置などシンクロトロン光発生技術も進歩したことから、第三代と呼ばれる新型のシンクロトロン光施設が作られるようになり、米国ではカリフォルニア州にあるローレンス・バークレー国立研究所の「ALS (Advanced Light Source)」やイリノイ州アルゴンヌにある施設「APS (Advanced Photon Source)」、欧州ではフランスに所在する欧州放射光施設(ESRF)、ドイツの BESSY - II、日本では SPring-8（所在地：兵庫県）などが登場しました。続いて、21世紀に入ると、フランスの Soreil、イギリスの Diamond、ドイツの PETRA2 などが稼働を開始、あるいは建設が進められるなど、時代とともに新たな研究手法、研究装置が生み出され、世界各地で最先端の開発技術をめぐる抜きつ抜かれつの競争や棲み分けなどが行われてきました。

（米国内のシンクロトロン光施設について）

そうした中で、米国は加速器の発展やシンクロトロン光施設を利用した研究、あるいは研究交流といった面で長く世界の中で大きな役割を果たしてきており、これまでに米国各地に大小様々なシンクロトロン光施設が建設され、大学での基礎研究や産業界での研究開発に広く利用されてきています。

<米国における主なシンクロトロン光関連施設>

略称	施設の名称	運営組織
ALS	Advanced Light Source (カリフォルニア州)	Lawrence Berkeley National Laboratory ローレンスバークレー国立研究所
APS	Advanced Photon Source (イリノイ州)	Argonne National Laboratory アルゴンヌ国立研究所
CAMD	Center for Advanced Microstructures & Devices (ルイジアナ州)	Louisiana State University ルイジアナ州立大学
CHESS	Cornell High Energy Synchrotron Source (ニューヨーク州)	Cornell University コーネル大学
CTST	UCSB Center for Terahertz Science and Technology (カリフォルニア州)	University of California, Santa Barbara カリフォルニア州立大学サンタバーバラ校
DFELL	Duke Free Electron Laser Laboratory (ノースカロライナ州)	Duke University デューク大学
Jlab	Jefferson Laboratory Free Electron Laser (バージニア州)	Thomas Jefferson National Accelerator Facility トマス・ジェファーソン国立加速器研究所
NSLS	National Synchrotron Light Source (ニューヨーク州)	Brookhaven National Laboratory ブルックヘブン国立研究所
SRC	Synchrotron Radiation Center (ウィスコンシン州)	University of Wisconsin-Madison ウィスコンシン大学マディソン校
LCLS	Linac Coherent Light Source (カリフォルニア州)	SLAC National Accelerator Laboratory SLAC 国立加速器研究所
SURF	Synchrotron Ultraviolet Radiation Facility (メリーランド州)	National Institute of Standards and Technology 国立標準技術研究所

* 出所: LightSource.prg より抽出して作成。 <http://www.lightsources.org/cms/?pid=1000098>

これらの施設はそれぞれ特徴を有しているようですが、中には時代の変遷とともに、あるいは世界の他の施設との競合との関係で、その目的を変えてきたものもあるようです。

そうした中で、今回、愛知県サンフランシスコ産業情報センターでは、米国内の SLAC 国立加速器研究所（カリフォルニア州メンローパーク市）や、ローレンス・バークレー国立研究所（カリフォルニア州バークレイ市）、アルゴンヌ国立研究所（イリノイ州レモント市）を訪問しましたので、その施設について概要をご紹介します。

（１）アルゴンヌ国立研究所の先端光子源施設

イリノイ州レモント市に位置するアルゴンヌ国立研究所は、米国初の国立研究所として 1946 年に設立されました。同研究所の研究は、基礎科学研究、エネルギー資源、環境管理、国家安全並びに科学関連ユーザー利用施設という 5 つのカテゴリーに分類され、関連研究施設が集積しています。研究所全体の敷地面積は 1,500 エーカー（約 607ha）におよび、研究者を含む職員 3,200 人を擁する巨大研究所となっています。研究所自体はエネルギー省の管轄であり、同省の委託を受けて、シカゴ大学が運営を行い、年間予算は 6 億 5 千万ドルにも達しています。敷地内にはイリノイ州が建設し、民間ホテルが運営するゲストハウスが設けられ、滞在型の研究が可能となっています。

このような巨大な研究所の中に、シンクロトロン光施設「APS (Advanced Photon Source)」が一研究施設として設けられており、今回、愛知県議会北米調査団（2010 年 8 月）に同行する形で、この施設の視察を行いました。



周長 1,104m の蓄積リングを持つ施設の外観

本シンクロトロン光施設は X 線領域の放射光施設として、1990 年から 1995 年にかけて 5 億ドルを投じて建設が行われ、蓄積リング（7.0GeV : 70 億電子ボルト）のビームは 1996 年に完成しました。蓄積リングの周長は 1,104m（愛知で建設中の施設の約 15 倍）にも及び、ビームライン 68 本を有するなど、日本の兵庫県播磨にある「SPring-8」、フランスのグルノーブルにある「ESRF（ヨーロッパ放射光施設）」と並び世界三大施設の一つとして知られているようです。

年間運営費は 1 億 2 千 500 万ドルで、シンクロトロン光施設内で 450 人の職員が働いており、施設は 24 時間稼働されています。案内スタッフの方の話では、施設の利用料については、利用者がその成果を公開する場合は無料となり、成果を秘密にしたい場合は有料となるとのことで、製薬会社をはじめ、多くの企業は実験結果を非公開とすることを希望することから、料金を支払っている場合が多いとのことでした。

こうした施設の利用目的ですが、例えば、癌研究のためにタンパク質の成分・構造の分析に使われたり、車のバンパーなどの耐久性を調べる研究にも使われたりしているとのことでした。また、運営面で大事なこととして、案内スタッフの方は、研究者は実験器具の使い方がわからないので、利用しやすいようにサポートをしてあげることが重要であると説明してくれました。

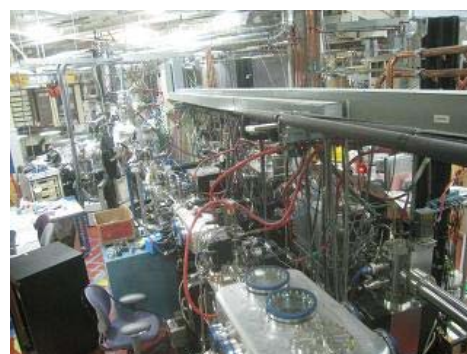
利用者全体の 5%が産業関係であり、大半は大学などの学術研究利用となっているとのことでしたが、政府の予算も縮小されてきており、企業利用による収益も大事であることから、ワークショップを開催するなどして企業関係者の利用拡大に努めているとのことでした。

(2) ローレンス・バークレー国立研究所の先端放射光施設

カリフォルニア州立大学バークレー校内に 1931 年にアーネスト・オーランド・ローレンス教授（のちにノーベル物理学賞受賞）が作った放射線研究所を前身とするローレンス・バークレー国立研究所は、敷地面積 200 エーカー（約 81ha）、科学者・技術者・学生・職員合計で 4,200 名を擁する研究施設となっています。米国エネルギー省が管轄していますが、運営はカリフォルニア州立大学バークレー校により行われています。

これまでに 13 名のノーベル賞受賞者を輩出したこの国立研究所の中に、シンクロトロン光施設「ALS (Advanced Light Source)」が設置されています。

今回、同研究所の加速器核融合部門で勤務している西村弘志博士から施設概要についてうかがうことができましたが、シンクロトロン光施設の建物自体はすでに 70 年以上が経過しているとのことで、1997 年には建物内部に周長 200m の蓄積リング（1~2GeV : 10~20 億電子ボルト）を有するシンクロトロン光施設がオープンし、現在、24 時間稼働による利用がなされているとのことです。



施設内部の様子

本施設は真空紫外領域ではいわゆる第 3 世代の施設とのことで、X 線領域の施設であるアルゴンヌの光子源先端施設(APS)とは、同じ米国エネルギー省管轄の施設として棲み分けがなされているようです。

双方とも 1990 年代中期に運転開始をしたものですが、10 年以上が経過したことから、性能向上につながる設備の改良・改造が常に続けられているとのことです。

現オバマ政権のステイブン・チュウ・エネルギー省長官は、カリフォルニア州立大学バークレー校で博士号を取得し、スタンフォード大学で在職中にノーベル賞を受賞しましたが、その後またバークレーに戻ってきて、このローレンス・バークレー国立研究所の所長を務めていました。エネルギー長官就任後は、エコ、あるいはエネルギー分野の研究を積極的に後押ししており、このローレンス・バークレー国立研究所も次世代型のシンクロトロン光施設「NGLS : Next Generation light Source」の計画を政府に提案しているところ（2010 年 6 月現在）とのことでした。

(3) SLAC 国立加速器研究所の線型加速器と光源施設

カリフォルニア州メンローパーク市に立地するスタンフォード大学内の SLAC 国立加速器研究所は、エネルギー省が管轄し、同大が運営する国立の研究所として 1962 年に設立されました。本研究所では一般見学者向けに加速器の見学ツアーを設けていることからこれに参加しましたが、この研究所では科学者・技術者・職員合計で約 1,500 名を雇用（2010 年 3 月訪問時）しており、そのほか 3,000 名を超える研究者を毎年迎え入れているとのことでした。

研究所内には 1962 年に世界最長の直線 2 マイル（約 3.2km）の加速装置を持つスタンフォード線形加速器センター「SLAC : Stanford linear Accelerator Center」が設置されており、以降、高エネルギー物理研究に長年利用されてきました。一方で、世界各地での他の新型施設の登場や施設間の競争の激化などもあり、2008 年には線形加速器の終端部に長尺ア

ンジュレータ（周期的な磁場）装置を置く自由電子レーザー施設「LCLS（Linac Coherent Light Source）」として新たな研究システムを開始しました。この点、世界的にみると、シンクロトロン光研究では、線形加速器を用いる方法が注目されているとのことで、日本でも SPring-8 横の X-FEL という施設がその先駆け的存在であり、本国立研究所内の LCLS は、本格的なシンクロトロン光用線形加速器としては世界で初めての施設として、再び注目を集めているようです。



世界最長の線形加速器の内部

<求められるユーザー重視の施設運営と開放性>

以上、米国における3つの施設を訪問しましたが、いずれの施設でも重要なこととして説明を受けたのは、施設を利用する研究者らへの研究活動支援の必要性でした。例えばローレンス・バークレー国立研究所のシンクロトロン光施設「ALS」では、14名の施設職員が24時間・毎日、常時、最低2名体制で施設・装置の運転に行っているとのことで、施設職員が研究者の実験準備を手助けしており、こうしたサポート体制の在り方も施設の発展には大変重要とのことでした。

また、もともとこうした施設での研究活動では、活発な研究、人事交流が行われているようですが、それぞれの施設でも世界各地域から研究者を積極的に受けていることがうかがえました。加えて、一般向けに広く案内ツアーを設けているところもあり、こうした活動も利用者増に向けた広報活動、あるいは地域が誇れる施設として発展していくためにも重要であると感じられました。

<日本における主なシンクロトロン光関連施設>

施設/蓄積リング	場所	研究機関
HiSOR	広島県東広島市	広島大学放射光科学研究センター
PF 2.5GeV リング、PF-AR リング	茨城県つくば市	高エネルギー加速器研究機構（高エ研）物質構造科学研究所、放射光科学研究施設（PF）
極端紫外光研究施設（UVSOR）	愛知県岡崎市	自然科学研究機構分子科学研究所
SPring-8	兵庫県播磨科学公園都市	高輝度光科学研究センター（JASRI）
ニュースバル（NewSUBARU）	兵庫県播磨科学公園都市	兵庫県立大学高度産業科学技術研究所
NTT SOR 施設; Siper-ALIS, NAR	神奈川県厚木市	日本電信電話株式会社（NTT）先端技術総合研究所
NIJI-IV, TERAS	茨城県つくば市	産業技術総合研究所
佐賀県立九州シンクロトロン光研究センター	佐賀県鳥栖市（鳥栖北部丘陵新都市）	佐賀県
超伝導小型SR光源（AURORA）	滋賀県草津市	立命館大学、SRセンター
極紫外軟エックス線高輝度光源計画（SuperSOR計画）	千葉県柏市	東京大学物性研究所（軌道放射物性研究施設）
中部シンクロトロン光利用施設（仮称）計画	愛知県瀬戸市	財団法人科学技術交流財団

* 出所: SPring-8 ホームページより抽出して作成

世界的には、加速器を利用した研究から多くのノーベル賞受賞者が輩出されています。現在、愛知県内で建設が進められているシンクロトロン光施設は、今回訪問した3つの施設に比べると小型のものではありますが、日本の中央に位置し、モノづくりの拠点である地域に、産業利用を重視した使い勝手の良い施設が整備されるという点では、今後の愛知におけるナノテクノロジー研究の発展につながるものとして、大いに期待が高まるどころです。

愛知県サンフランシスコ産業情報センターとしても、引き続き米国におけるこうしたシンクロトロン光施設の動向についても注目していきたいと思います。