

トピックス

米国放射光施設における真空紫外・軟 X 線研究の 現状と21世紀への戦略

菅 滋正, 今田 真

大阪大学大学院基礎工学研究科*

Present Status of VUV・Soft X-Ray Synchrotron Light Sources, Research Activities and Strategies toward 21st Century in USA

Shigemasa SUGA and Shin IMADA

Graduate School of Engineering Science, Osaka University

High brilliance Synchrotron Radiation is now conventionally used in many SR facilities. The status of the storage rings and research activities in the field of VUV and soft X-rays in the United States of America are reviewed. The strategies of the facilities toward the 21st century are also briefly overviewed.

1. はじめに

我が国では大型高輝度 X 線光源として西播磨の SPring-8 が昨年来運転に入り X 線領域では世界の最先端の研究が可能になった。一方 VUV・軟 X 線高輝度放射光の計画は東大計画として概算要求されているものの実現の見通しはまだ立っていない。このような状況で世界における VUV・軟 X 線放射光施設の現状と研究の activity さらに 21 世紀に向けての戦略を知っておく事は我が国の計画推進の strategy を決めるために必要不可欠なものと考えられる。今回は米国の放射光施設を訪問し調査を行った情報を取りまとめる。機会があればアジア・欧州等について来年ふたたび報告をしたいと思っている。なお 2 週間と限られた時間内での調査であったので把握しきれなかった情報もあろうし言葉の制約で誤解をしている点があるかもしれない。それらお気づきの点は著者にご連絡いただければ幸いである。

2. 米国放射光施設報告

2.1 ウィスコンシン大学マジソン校シンクロトロン放射光施設 (SRC) の場合

筆者の一人菅は今回が 3 回目の訪問である。1976 年 DESY (今日では HASY と呼ぶ) での放射光研究の帰途、

運転中であった同大学の Tantalus I に立ち寄ったのが最初である。マジソンよりスタウトンに向かって 15 マイルほど走った側道のトウモロコシ畑の丘の上に当時の SRC は建っていた。入射器であるマイクロトロンから RF 加速空洞さらには分光器から測定装置までが一望できる実験フロアには DESY とは一味違った親しみをおぼえた。2 回目の訪問は 1977 年に Alladin が建設に入ってから 2-3 年の頃であり、田舎道の Schneider Drive のすぐそばに機械工作工場ならびに関連施設を擁する広大な Physical Science Laboratory (PSL) に隣接して最先端の Alladin を地下に建設中であった。高いエネルギー分解能を実現するために広帯域グラスホッパー分光器 (ERG) に大きな期待がかかりその立ち上げ調整が進んでいたと記憶する。実験フロアにはリングのラティスとこれら 2, 3 の分光器を除いては何も無い広々とした状態であった。

帰国後しばらくしても、Alladin の電子蓄積はなかなか成功にいたらず時は無駄に流れていった。遂にはシャットダウン寸前の状態にいたった。その頃、全世界の軟 X 線・VUV 研究者に、米国政府と言っても NSF (National Science Foundation) に対して Alladin を継続支援して欲しいとの手紙を出すようにとの SRC 所長からの要請が行われ、筆者もそれに応じて手紙を書いたのを記憶してい

* 大阪大学大学院基礎工学研究科 〒560-8531 豊中市待兼山町 1-3
TEL/FAX 06-850-2845 e-mail suga@mp.es.osaka-u.ac.jp

る。NSFの支援は中断されず、ほどなくAlladinは100 mAの電子蓄積に成功した。それはイオン・トラッピングを防ぐイオン・クリアリング・エレクトロードをリング全周に渡って付けた成果であったと後日聞いた。

今回の訪問はそのうち米国エネルギー省 (DOE) 傘下のスタンフォード大学 SSRL, ブルックヘブン国立研究所 NSLS, ローレンスバークレー国立研究所のALS, アルゴンヌ国立研究所のAPSなどの放射光施設がグレードアップあるいは新設され、それらのactivityを昨今DOE諮問評価委員会で評価し将来への効率的予算投下を決定しつつある段階で、これと相補的なNSF傘下の放射光研究所 (SRCとコーネル大学の放射光施設) のうち軟X線・VUVの中心であるSRCの現状と将来展望を探るためでもあった。

訪問したのは丁度800 MeVで運転中で各ビームラインでの実験が行われている最中であった (図1)。夏季休暇中のスタッフも多く通常よりは静かな様子であった。まず加速器担当副所長であるTrzeciak博士にマグネトロン、

マイクロトロン、加速空洞、種々の電源、挿入光源等のハードウェア中心の説明を受けた。ちなみにビームラインを閉じてから100 MeVでの入射終了までは約30分と言うところであったろうか。この間実験フロアには立ち入れない。1 GeV運転もしばしば行うために、入射前には必ず1 GeVまで偏向磁石磁場を上げその後0 MeVを経て100 MeVに設定して入射を行う。したがって入射自身は正味約10分間程度である。280 mA程度蓄積後はライフタイムを伸ばすために補助ハーモニックRF空洞でパンチ長を約2倍に伸ばす。100 MeVから800 MeVへのエネルギーアップはほとんどビームロス無しできわめて短時間で終わる。主RFは50 MHzで運転時のパンチ長は約2 nsということで、ライフタイムは約1000 mA・hと言うところである。1/e ライフタイムは約4時間で入射は1日4回、8時、12時、18時、24時に行われる。24時入射は基本的には1 GeV運転であり、その他は800 MeV運転である。1 GeV運転時の磁場は1.6 Tで800 MeVから1 GeVにあげるとビームポジションはかなり動くそうである。2結晶分

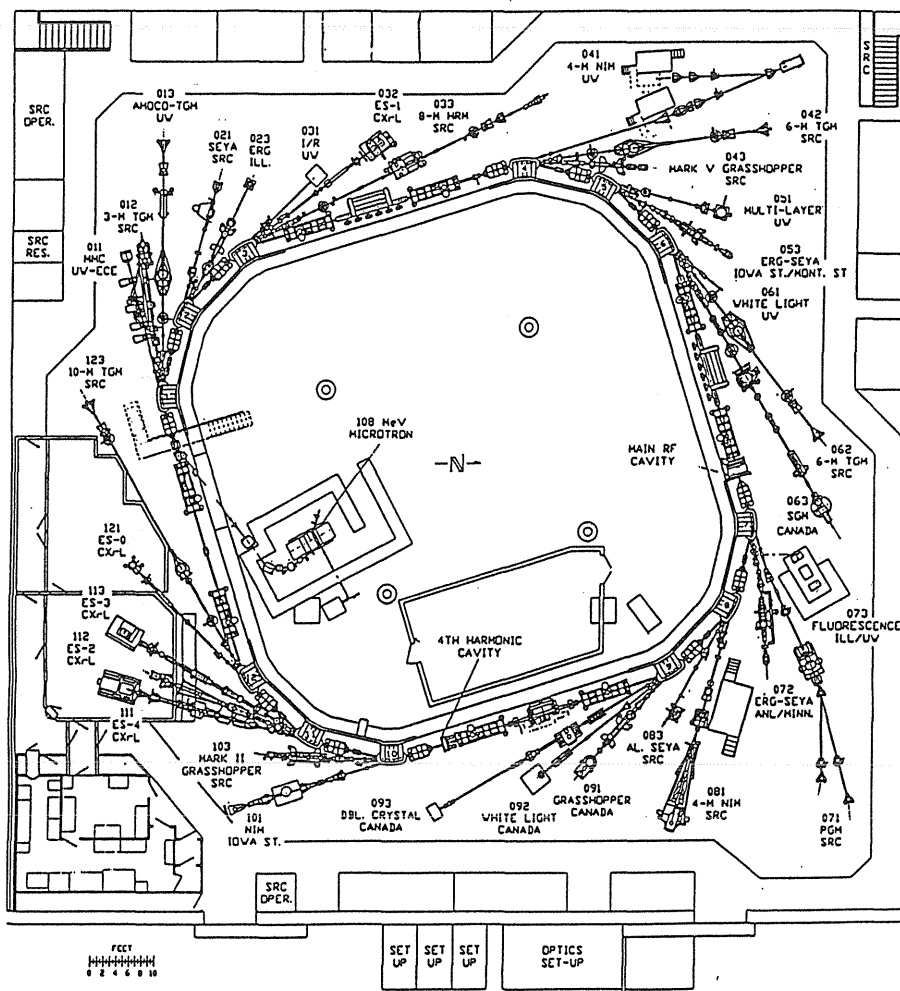


Figure 1. Experimental floor of SRC (Wisconsin-Madison).

光器のユーザー等からの要請があり1 GeV 運転を定常的にやっているとの事である。一方単バンチ運転はRF ノックアウトで行えるようになってきているが近年は利用者からの要請が無く、もう数年間行っていないとの事であった。スタッフの数は事務系や技術者を入れても約45名であり土日は運転していない。1週間のマシンスタディを年9回取るそうである。

このあと1日半をかけてビームライン関係および研究の activity を見てまわりその後将来展望を聞いた。ビームライン (以下 BL と略す) の総数は現状では29本ある。そのうち SRC 固有の BL が13本、外部利用者が建設しその全ビームタイムの75%を利用し、25%を共同利用に公開しているいわゆる PRT (後に出てくる CAT とほぼ同じ意味) の BL が10本、X線リソグラフィーの BL が6本と言うところである。X線リソグラフィーは SRC の主テーマの一つであり、INTEL その他の企業から寄付を受けた関連装置 (マスク・ライター、ディベロッパー、AFM, SEM 等) がフロアの一角に所狭しと並んでいるのは驚いた。現在の SRC 所長の Taylor 氏は化学出身で X線リソグラフィーに並々ならぬ興味と将来展望を抱いている事が明白である。同所長によれば SRC のもう一つの主テーマは強相関電子系と言う事であった。現在の SRC 年間予算のうち NSF から来る部分は人件費を込みで電気代を除いて年3.8 M\$ (訪問時の為替レートでは日本円で5.5億円) である。この予算規模は後で紹介する ALS の10分の1、APS の20分の1であるにもかかわらず、論文数や質の点では他にひけを取っていない事実は驚嘆に値する。なお研究担当副所長は F. Himpsel 氏であるが欧州に出張中で会えなかった。

21世紀に向けての将来計画としては後述の BL 増強の後、2001年から5年間にわたって年平均5.5億円の予算要求を NSF に行うべく準備中であつた。これは現在4本の PRT の BL を持っているカナダがサスカトーン (カナダ中北部寒冷地) に同国固有の放射光源を建設予定であり (予算規模は200億円)、その暁には SRC の4本のカナダビームラインが空く事を視野に入れた計画である。カナダからの利用者は現在の SRC 利用者全体の25%を占めておりその activity が無くなることは緊急対策を要する事態と思われる。もっともそんな寒冷地に作ってもカナダの研究者といえども使いに行く人は多くないのではないかと予想もされていた。我が国でもどこかで聞いた話ではある。

さて Alladin は800 MeV 時のエミッタンスは ϵ_x で85 nm \cdot rad, 1 GeV 時で110 nm \cdot rad である。このリングは4本の直線部を持っている。挿入光源を入れられる実質長は3.5 m であり、現在2つの永久磁石アンジュレーターと2つの電磁石アンジュレーターとが装備されている。いずれもプレーナーアンジュレーターでありウィグラーも円偏光のアンジュレーターも入っていない。この哲学は次のように集約できる。まず SRC のターゲットは光エネルギーに

して10-200 eV を狙うという立場である。これは ALS や SSRL との重複を避けるという NSF の方針に従ったものである。もちろんリソグラフィーの activity を占め出すもので無い事は明らかであるが、強相関系の電子状態の研究には上記のエネルギー領域で高分解能光電子分光等を行えば十分な競争力があるとの判断によるのであろう。したがって光電子回折のようなものは将来の研究の中心とは考えていないようである。円偏光については現在の Alladin にヘリカルアンジュレーターを入れる代わりに、4回反射の全長40 cm の polarizer を用いて直線偏光を円偏光に変換する技術を開発している。利用エネルギー範囲は10-80 eV 程度である。この polarizer はすでに他の施設でも利用されているようである。ただし SRC では実際に低エネルギーでの円偏光磁気2色性測定はあまり盛んには行われていない。これは低エネルギー実験から得られる情報量が、もっとエネルギーの高い内殻吸収領域での同様な測定から得られる情報に対して乏しいためとの Dr. Hochst の見解であった。

さて分光器までは固定設置されているが、実験測定装置については実験ごとに付けたり外したりというのが SRC の大勢らしい。仮に同種の測定装置や分析器がビームライン分光器についている場合であっても試料室の機能が異なる事が多くそれらを他の利用者が使う、あるいは他の利用者に提供する事はほとんど無いらしい。ビームタイムは3週間というのが標準らしく、3週間ごとに週末には装置を付け直してはベークするというふうであった。SRC でも利用グループの教授1人あたりの post doc は1-2人程度であり放射光研究に関わる院生もそれほど多くはなく、装置の立ち上げはなかなか大変と見受けられた。分光器については一時もはやされた TGM (トロイダル回折格子分光器) も ERG もすでにエネルギー分解能や明るさの点で主力装置の座を降りているとの感はいなめない。

分光器について全貌を述べるのは止めて現在および近未来の主力装置についてのみ述べる事にする。最初に非等間隔球面回折格子を用いた分光器が250-1100 eV で用いられている。入射、出射スリットともに固定で回折格子を回転+移動させるタイプである。すでに5年前にデザインされたものであり回折格子の曲率半径は73 m, 500 eV 以上は1400/mm の回折格子で、500 eV 以下は700/mm の回折格子でカバーし、刻線密度は回折格子両端で $\pm 10\%$ のことである。なおエネルギー分解能は5000-1000である。丁度 Gd 系の内殻吸収 MCD の測定が行われていたののでぞいてみたところ、Gd の3 dMCD (約1.2 keV) でスペクトルの $\Delta h\nu$ は5 eV よりも悪いと見受けられた。これでは現在の先端研究には手が届かないのではあるまいかと思われる。さて SRC でビームタイムの要求の高いのは平面回折格子分光器 (PGM) と4 m 直入射分光器 (NIM) である。PGM は8-240 eV をカバーし分解能は17,000を達成している。Ne2s 内殻吸収では20次までのリドベルグ

シリーズを分解できている。入射スリット17 μm , 出射スリット10 μm 時で50 eVで2.5 meV, 10 eVで0.7 meVのエネルギー分解能が達成されている。このBLは2つに分岐されており, SRCが持っているSCIENTAのSES200やVSWのR=50 mmの角度分解電子エネルギー分析器が取り付けられる。後者についていえば角度分解能 ± 0.5 度でパスエネルギーを1.5 Vにして全エネルギー分解能20 meVの測定がすでに標準となっている。さらにNIMにSES200を取り付けて試料温度6 K, フェルミ単位でのエネルギー分解能5 meVがすでに達成されていた。SES200では14度の角度を0.3度の精度で同時に角度分解できる機能がすでに実現しており, 近い将来すばらしい成果が続々と得られると期待されている。その意味では我が国の中型高輝度光源計画のこれ以上の遅れは強相関電子系の研究にとって致命的とさえ思われる。20 eVでPGMとNIMを比較すると当然のことながらPGMの方が高次光が多く(20 eVで約20%), 正確なフェルミオロジーのためにはSRCではNIMの使用が確立していると言ってよい。特に新しく作られた1.2 kG, 26周期の電磁石アンジュレーターを用いたBLが調整中であり, これにシカゴのCampuzanoのグループがMcPhersonの4 mNIMとSES200を付けるべく立ち上げ中であった(見学した時は新しい分光器の整備中でこれはSRCのスタッフが中心になって行っていた)。基本波で7-50 eVをカバーし, 20 eVでの分解能は40,000つまり0.5 meVを目指している。このように1977年に建設を始めたAlladinが未だに強相関電子系の研究では世界の先端を走っている事実は印象的である。Campuzano, Arko, Lynch, Olson, Allen, Onellion, Himpfel等の幅広いactiveな利用者を抱えてSRCの将来は依然前途洋々としているとの印象を持った(研究者によってはSRCとALSをかけもって仕事をしている)。なお電子ビーム位置の安定性はブルックヘブンのNSLS軟X線リングよりはるかに優れているそうである。

その他, 将来を目指す課題としてマイクロ・マシーニングが取り上げられていた。一方でマイクロコピーのactivityについては後に述べるようにALSの方がはるかに力を入れている事が分かる。なおSRCへのaccessはChicagoのO'HARE空港よりウィスコンシン・マジソン空港(またはDane空港とも呼ばれる)に1時間弱で飛べる。それよりSRCまではタクシーで約30ドルの距離である。研究所独自のゲストハウスはSRCより約1.5マイル離れたところにあり1泊22ドルで自炊用の台所はあるものの食堂施設が無くまた足の便も悪いので利用実験にのぞむ場合には出来ればレンタカーをした上でSRCより6マイル南のスタウトンのホテルに宿泊した方がよい。ホテルは1泊60ドル程度である。

この施設でのSRC-BLやPRT-BLへのビームタイムの申請は年1回受け付けられる。この情報を得るためにはSRCのmailing listに入っておく必要がある。いっば

う新しいアイデアのテスト実験等はRapid Response Programと言う形で随時受け付けられ数週間以内にreview結果が知らされる事になっている。詳しい情報は<http://www.src.wisc.edu/>を参照されたい。

2.2 アルゴン国立研究所APSの場合

我々はSpring-8において軟X線のビームラインを用いた研究を行っている。そこで今回の調査では大型X線光源であるアルゴン国立研究所のAdvanced Photon Source (APS)をも訪問した。APSはChicagoのO'HARE空港より南にタクシーで約40-50ドルの距離にある。ただし運転手がアルゴンの地理を知らない事があるので事前にwwwで(<http://www.anl.gov/>)地図を手に入れていた方が無難である(これはSRCについても言える)。ゲストハウスは260室ありマリオネットホテルが経営している。1泊twin roomだと70ドル強である。2人で部屋をシェアすれば35ドル強できわめて快適に過ごせる。

さてAPSの研究の主力はもちろんX線である。計68本の可能なBLのうちすでに14本の偏向部と19本の挿入光源部が割り当てられており, 偏向部では9BLが, 挿入光源では13本のBLが運転状態に入っている。SRCのPRTに相当するのはAPSではCAT(Collaborative Access Team)と呼ばれる。BLの大部分がこのCAT-BLである。CATビームラインのビームタイムの25%が公開されている。APSはDOE傘下にありその年間予算は約123億円でその半分が人件費である。職員数は約400名と聞いたように記憶しているがあまりこの値には自信は無い。電気代はSRCの場合と違って上記予算でカバーされるが, 約9億円になり, その他の保守費用が7.5億円, 開発経費は7.5-12億円程度である。ビームライン委員会はAPSから外部の6名の委員に委嘱し, 必要に応じてサブコミティーを作ってBL提案の検討や採否を行っている。

実験部門の長であるDr. G. Shenoy氏と副長であるDr. E. Gluskin氏とに会って話を聞いたが, 2人の話のニュアンスは微妙に異なっていた事を報告しておきたい。Dr. Shenoyによれば, APSではユーザーコミュニティの意向にしたがって軟X線はやらないとのことであった。しかも明確な哲学は高輝度光源でしか出来ない事しかやらない, つまりSSRLやNSLSでもやれるような研究はやらないとのことである。現状では高輝度を利用したマイクロビーム関係のビームタイムのウェイトが20%であるという事であった。また現在の研究の40%はbiology関係であり今後この比率は60%まで上がるであろうとの予測であった。この数字にはgenomic(ゲノム)technologyも含まれている。これは他の米国の放射光施設とは顕著な差として認識してよからう。運転は8週間の連続運転の後, 2週間のシャットダウンと言うパターンである。12月と4月には例外的に2.5-3週間のシャットダウンを行っている。電子入射は1日2回100 mAまで蓄積していたようで

ある。ライフタイムは32時間と読み取れた。

APSの実験部門の職員はもっぱら技術開発を行い、自ら分光・回折研究を行う事はほとんど無いらしい。そのために職員を雇うには相当の苦勞をしているようである。つまり研究を目指す若手の応募が多くないのではなかろうか。そのためかどうか APSで何人かの post docにも会ったがその平均レベルは決して高いとは言えない感じがした(SSRLの方が優秀そうであった)。APS自身としては new technology たとえばマイクロ・マシーニングなどの nano technology や X線レーザー開発など目指しているらしい。小グループで2-3年の project を行い成功しそうなものはさらに政府に予算要求して強化していくようである。APSではCATがBLの主である事を反映してビームタイムもユーザーコミュニティ自身が決定する仕組みである。ビームラインの評価は建設3年後に行う事になっている。ここでもまた good science あるいは good results と言う事が強調されている。さて Dr. E. Gluskin はもともとソ連(現ロシア)のノボシビルスクで軟 X線の分光をやっていた経緯上、軟 X線の利用にも積極的であり、分光屋のいない APS で孤軍奮闘しているとの印象である。8年前に APS に移り polarizer の開発に引き続いて多層膜鏡作製装置や光学系の評価装置の開発、さらには挿入光源開発など矢継ぎ早の成果をあげており、APSでも大きな発言力を確保しつつあるようである。彼の関心の一つは軟 X線分光であり、APSといえどもマイクロコピーであろうと biology であろうと分光研究の重要性はますます増大しているとの認識を持っていた。実行力のある研究者の発言だけに APS の将来の方向の一つとして注目しておいた方がよいと思われる。

利用者の立場から一言述べておきたい。我が国の PF には利用者用の部屋も机もほとんど無い状態であるが(S課題採択グループは多少優遇されているが)、SPring-8では試料準備室、実験準備室が各 BL 毎に割り当てられずいぶん良くなったと思っていた。しかし APS では CAT メンバー一人一人に BL の近くに部屋が割り当てられており一段と環境がすぐれている。1本の偏向部と1本の挿入光源部をまとめて1セクターと呼んでおり、各セクターに対して8つの居室と共通スペースが割り当てられておりさらに一群の居室の周辺にはセミナー室や簡単な台所などが配置されており SPring-8 より更に利便性がすぐれていると感じた。放射光の多くの利用者は1,2日の実験を除いて、実験期間中単にビームを使うだけでなく、解析をしたり文献を読んだり他のデスクワークをこなしたりしながら滞在型研究を行うのが普通である。我が国の放射光施設でも APS なみに利用者の便宜を最大限はかって欲しいものである。そういうゆとりが優れた研究を生み出す素地であると筆者は確信している。

さて APS 独自の装置として鏡のスロープエラーを測る Linear Trace Profiler や1.5 m 長の鏡に4種類までの物質

を多層蒸着できるコーティング・マシーンさらにはゾーンプレート作製装置などをあげる事が出来る。ゾーンプレートなどは世界中のユーザーに実費で供給しているそうである。普通は効率数%のところ APS では効率15-30%のものが作製できているようである。5-35 keV 付近で使えるものを中心に開発しているようである。その他 BES-SYII の挿入光源用のチェンバーや台湾やイタリア・トリエステの放射光施設にも続々と技術を公開をしているようであった。

APS ではリングのシールド壁外50 m が最大のビームライン長である。これは SPring-8 に比べて少し短い。SPring-8 との比較で他に気の付いた点は、照明が APS の方が明るい事、入退出放射線管理が簡単である事、それに反し実験フロアにある空調や水配管等の雑音がうるさい事があげられる。APS フロアでは主に3輪自転車が使われていたが、SPring-8 では通常の2輪自転車が主である事も目にみえる違いといえよう。

筆者らの興味は軟 X線分光にあったが、それに立ち入る前にそれ以外で興味をひかれたのは核ブラッグ共鳴散乱線を用いて0.6 meV の分解能でフォノンの状態密度を極めて良い S/N 比で測定した実験であった。メスバウアー分光もいよいよここまで来たかの感が強い。さて軟 X線関係は現在 BL2-ID-B, C の2本だけである。Bは主にイメージングに、Cはドラゴン分光器を用いて内殻吸収や光電子分光に使われる予定である。イメージングでは0.5-2.5 keV 領域でゾーンプレートをを用いて0.1 μm まで絞り込んでいる。BL2-ID-C では Gd3d 内殻吸収スペクトルが取られていた。1.2 keV 領域で2 eV 以上の分解能が実現できている。ZnS のスペクトルからは1.2 keV で0.4 eV の分解能が実現できているようである。これらの BL はセクター4に建設中の電磁石アンジュレーター BL にやがて移設する事になるようである。この電磁石型アンジュレーターは偏光については円偏光、水平・垂直直線偏光、楕円偏光と自在に変えられるデバイスである。大きさは軌道に垂直な断面で40 \times 40 cm² で全長約3 m の代物である。周期は12 cm でありヨークは薄い Fe 鋼板を貼り付け渦電流損失を抑えたものもので100 Hz での極性変調が可能(20 Hz が保証値)な設計となっている。直線部ドーナツの垂直内径は5 mm 外径は8 mm でありこれがびたり収まる磁極構造になっている。0.25 T までの磁場を出せる。現在ロシアのノボシビルスクで安価に製造中であり、1998年10月にノボシビルスクから搬入され1999年1-2月にテストを始めるという事である。ヘリカルアンジュレーターとしては400 eV から4 keV をカバーするようである。なお APS では入射時にアンジュレーターのギャップを開く必要は無いためにこのような固定ギャップ型の挿入光源が可能である。すでに装備されている永久磁石アンジュレーターも入射時にギャップを開く必要はないようである。つまり照射損傷による劣化は無視できるほど小さいようであ

る。なおセクター4の直線部にはこの軟X線アンジュレーターとX線用のフラットアンジュレーターとを少し取り出し角をずらして取り付け、同時に軟X線とX線のBLを利用できるような設計とするそうである。X線の方は3-100 keVをカバーするとの事である。このようにESRFのHelios-BL, SPring-8のBL25SU, APSのセクター4軟X線アンジュレーターと世界の3強が揃いつつあり21世紀に向けて競争が激化していくであろう。なおAPSは立ち上がって日も浅く日本との共同研究もまだ多くはないが、やがてX線関係の共同研究が盛んになるものと思われる。その際のビームタイムプロポーザルは各CATに対して出すようであるので各自wwwで確認されたい。

2.3 スタンフォード大学 SSRL の場合

スタンフォードシンクロトロン放射実験室 SSRL は SPEAR と呼ばれる3.5 GeVのストリーミングリングを中心とした施設である。1990年以来、線型加速器 SLAC とは

独立した入射器を持ち、光源専用リングとして生まれ変わっている。年に9ヶ月間運転されている。SLACの終端のコライダーの敷地の中にSSRLが位置している。リングの運転停止中に訪問したので光源用ブースターへ入射する小型LINACとともにシールド壁内のリング全周を見る事が出来た(図2)。SSRLの長い直線部には電子・陽電子衝突実験を行っていた名残の衝突チャンバーの残骸が残されていた。10本のビームラインと26の実験ステーションのうち過半数に2結晶分光器が装備されておりそのほかにも湾曲結晶分光器が3台と圧倒的にX線中心の施設である。EXAFSによる触媒や表面の研究や蛋白質構造解析を含むbiologyなどに過去たくさんの実績を上げてきた。VUV・軟X線分光関係では、8-180 eVの6mTGMが2台、150-1000 eVの6mSGMが2台、24-1000 eVのグラスホッパー分光器が1台、このほか4つの回折格子を交換して20-250 eVあるいは10-1000 eVを 10^{-3} のエネルギー分解能でカバーする分光器が1台ずつ置かれていた。また5.4 mNIM分光器もありこれは18 eVで1

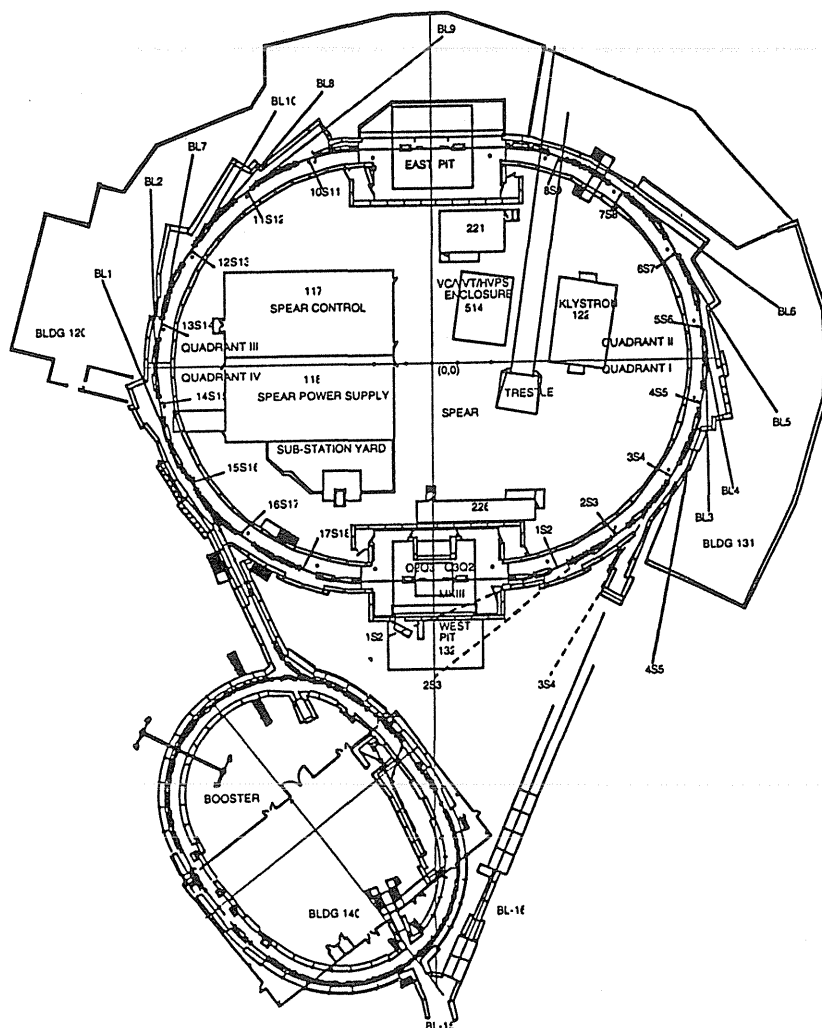


Figure 2. SSRL of Stanford University. SPEAR is shown in the upper part.

meV のエネルギー分解能を実現し、SES200をつけて7.4 meV の高分解能光電子分光が行えるようになっていた。強相関電子系の研究は Z. Shen のグループを中心に少数精鋭で進められている感がある。施設全体では 5-45,000 eV をカバーできる。

20カ国の外国と、36の米国内州の169の諸機関から、年間1300人の利用者があるとの事である。諸機関の内訳は64が大学、36が企業、16が政府の研究所、ならびに53が外国機関という事である。現在527の proposal が active な状態で、その半分は物質科学、残りが biology と VUV である。典型的な proposal は院生や post doc を含む 4-8 名のメンバーからなっている。年間に研究に訪れる院生の総数は31大学から200余名である。SSRL での研究に根差した毎年の発表論文数は200編程度である。なおビームタイムの要求は直接 SSRL に出す方式である (<http://ssrl.slac.stanford.edu/>)。

SPEAR の upgrade プログラムとしてラティスを現在の FODO ラティスから DBA (double bend achromat) に変えてエミッタンスを現在の 160 nm \cdot rad から 3 GeV 時に 18 nm \cdot rad を実現する事、真空チェンバーを改造して 500 mA 蓄積を目指すことなどが考えられている。この upgrade 計画完成の暁には 3 m 直線部が 12本、4.5 m 直線部が 4 本、8 m 直線部が 2 本となるので電子入射やその他に直線部の一部が食われるとしてもきわめて強力な挿入光源リングとして生まれ変わるであろう。新計画では特に 1-4 keV での軟 X 線アンジュレーターの利用にも力が入っているようである。偏向部の放射光の 3 GeV 運転での臨界エネルギーも現在の 4.8 keV から 7.1 keV に増大できる。20 keV 領域での偏向部放射光の光子フラックスは現在より 2 桁以上の増大が得られる。200 mA 時のビームライフタイムは 30 時間以上を期待している。この改造では何本かの偏向部 BL の並び替えを必要としている。計画は通常の 2 ヶ月間のシャットダウンを数回と 6 ヶ月間の長期シャットダウンを 1 回で 3-4 年間にわたって行われる。早ければ 1998 年秋から改造計画に着手するそうである。いかにして利用者の実験との干渉を小さくするかが課題であろう。

さて SSRL に隣接する SLAC は現在は 50 GeV のライナックである。近い将来上流側 2/3 が PEP-II の B-Factor の入射に使われ下流側の 1/3 の 15 GeV ライナック部の電子をライナックコヒーレント光光源 (LCLS) として使う計画がある。LCLS は長いアンジュレーターの中を大電流超短パルスの電子線が 1 回走る間に self amplified spontaneous emission (略して SASE) によって放射される光を自由電子レーザーとして利用する計画である。現在の先端である第 3 世代放射光源と比べて第 4 世代光源とでも言えるものであって、ピーク出力やピーク輝度に関して現在より何桁も高いものである。15 GeV で約 100 m 長、周期長約 3 cm のアンジュレーター中をピーク電流 3.5 kA、エ

ネルギー分布 0.1% の電子線を走らせる。運転エネルギーを 15 GeV から 4.5 GeV に下げる事で波長 0.15 nm から 1.5 nm までのコヒーレント放射光を取り出す予定である。80 fs (フェムト秒) の光パルスで X 線領域の構造解析をポンププローブ分光の形で行う事が可能になるかも知れない。いずれにしても今後の展開に興味を持たれる。

2.4 ローレンスバークレー国立研究所 ALS の場合

ALS はローレンス・バークレー国立研究所 (LBNL) の Advanced Light Source の略である。DOE の傘下にもっとばら VUV と軟 X 線を用いた研究を強力に推進している。この高輝度リングに滞在し研究した経験を持つ日本人は多くいろいろな機会に滞在報告が書かれているが他の放射光施設との対比上この報告でも簡単に取り上げる。交通の便はここで取り上げた施設の中で最も優れている。サンフランシスコの街中から BART に乗ってバークレーまで約半時間、駅前から大学の無料巡回バスに乗って丘の中腹まで行き、そこで丘の上の方を巡回するバスに乗りかえる。サンフランシスコから 1 時間程度で ALS にたどり着ける。そこは遥かに海を見下せる風向明媚な環境にある。傍にキャフェテリアがあり食事の心配無しに実験できる環境は SRC や SSRL よりすぐれており、APS やグルノーブルの ESRF の感じに近い。バスでのぼるにつれてライナック、ブースターならびにストリージリングを擁する施設が丸屋根をいただく建物にそれらしく収まっている。

1986年に ALS プロジェクトが始まり、翌87年に1,800万ドルの政府予算が認められ、88年に建物の改造(中心部の丸屋根の部分は昔からの建物を空にして利用、その周辺にビームラインを引き出し実験装置を置く平屋を増設)が始まった。90年に加速器の据え付けが始まり、91年ライナック運転開始、92年にストリージリング据え付け完了、93年に電子蓄積に成功と言う段取りで進んできた。ALS リングのパラメーターは周長 196.8 m、直線部 12 箇所、運転エネルギー 1.0-1.9 GeV、エミッタンス 3.6 nm \cdot rad、蓄積電流値は多バンチで 400 mA、2 バンチで 2 \times 20 mA、ビームライフタイムは多バンチ 400 mA 蓄積で 5 時間、2 バンチ 40 mA 蓄積で 2.5 時間程度である。

すでに 27 本の BL が出来上がっている。軟 X 線高輝度リングであるために挿入光源が多用されている。典型的な挿入光源を順にあげる (U はアンジュレーター、W はウィグラー)。U5: 周期長 5 cm, 89 周期, 磁場は 0.46-0.10 T で可変, 1.5 GeV 運転での利用エネルギー範囲 130-1900 eV のもの (1.9 GeV 運転では同 210-3000 eV)。同じく U5: 周期長, 周期数ともに同じ, ギャップを小さくし 0.85-0.1 T で 50 eV までをカバーする。U8: 周期長 8 cm, 55 周期 1.5 GeV で 18-1200 eV。U10: 周期長 10 cm, 43 周期, 8-950 eV。EPU: 楕円偏光アンジュレーター, 周期長 5 cm, 37 周期, 0.79-0.10 T で 60-1200 eV をカバ

一。W16: ウィグラー, 周期長16 cm, 19周期, 2.1–0.03 T, 5–13 keV で使用と言うところである。さて0.05–1 eV の遠赤外 BL や2結晶ならびに湾曲結晶分光器など数台を除くとすべて回折格子分光器が装備されている。球面回折格子分光器 (SGM) が9台, 非等間隔溝平面回折格子分光器 (VLS PGM) が5台と言うところが主力分光器である。

この施設は軟 X 線における研究分野のほぼすべてを網羅しようとする施設であるが, 主なものをあげると, 何と言っても高輝度を利用したマイクロコピー (顕微分光) に最大の力が入っている。走査透過型 X 線顕微分光やゾーンプレートを用いた顕微分光, イメージング光電子分光などがそれである。さらに偏光やスピン分析を利用した表面分光などがあげられる。高分解能の光電子分光や原子分子分光さらには光化学なども行われている。軟 X 線光散乱・発光や光電子回折あるいは強相関電子系の光電子分光がマイクロスコピックな系についても行えるわけで今後我々としては関心を持たずにはいられない。応用的関心から INTEL や Advanced Materials との共同で偏向部放射光を利用したマイクロ XPS (μ -XPS) がスタートし, $2\ \mu\text{m} \times 2\ \mu\text{m}$ 領域の光電子分光が可能となった。2 インチウェハーがそのまま取り付けられるホルダー構造となっている。外部で種々の手法で調べた上で興味あるとされる物質について positioning マークを入れて μ -XPS システムに持ち込み, 位置出しを速やかに行った上で興味あるミクロ領域に限って光電子分光を行う。1 keV まで $1\ \mu\text{m}$ の空間分解能を出す事は見通しが立っているそうである。成功すれば次世代のマイクロサーキットの分解能 ($0.18\ \mu\text{m}$) を目指してアンジュレータ BL で使用する新しい装置を考えるとしている。なお ALS の方向を全体としてまとめると, 強相関系, ナノ構造, 環境科学, 高分子や柔らかい物質, 表面・触媒化学, 磁性体, 化学ダイナミクス, 生命科学などがターゲットになっている。なおこのほかリソグラフィ, X 線蛍光微量分析, 蛋白質構造解析などがある事を付け加えておく (その意味でさきの網羅的研究を目指している)。BL は光源から長くても25 m 以下程度であり, 加速器を含む床面積が約4400 m^2 , リング周長が約200 m あることを考えると実験エリアは決して広くはない。BL が所狭しと並んでいる感じがあった。実験は8時間シフトであり, 実際に8時間ごとに実験グループが交代することもよくあるらしい。共同利用者用のゲストハウスのようなものは無く, それがこの施設の唯一かもしれない弱点である。昨年の DOE の放射光関連4研究所諮問評価委員会の評価では NSLS, SSRL, APS に比べて ALS はきわめて厳しい評価を受け, その巻き返しに躍起になって取り組んできた。B. Tonner だけでなく F. Himpsel, Z. Shen や J. Allen 等々が ALS での研究に本格的に取り組んでおりその成果は今後はっきりした形で見えてくるものと思われる。

ALS へのビームタイム要求は ALS へ直接 independent-investigator proposal を出すことから始まる。申請は ALS の Proposal Study Panel (PSP) で下記の5つの点で審査される。まず1. ALS の高輝度を必要とするかどうかである。特にアンジュレータ BL への申請の場合には必要とする輝度, ビームサイズ, 分解能, 光子数等がきちんと書かれていなければならない。もちろん BL の性能に適合するものでなければならない。次は2. 研究の motivation である。PSP のメンバーは申請分野での専門家ではないので分かりやすいものでなければならない。抽象的すぎたはいけない。3 つめは申請研究の現実的なゴールである。4 つめに実験方法, 5 つめに申請研究の実行可能性とこれまでのビームタイムでの成果報告が求められる。申請に対しての採否の結果および採択の場合には何シフト (1シフト=8時間) が与えられるかの連絡がある。その後実験開始の少なくとも1月前までに実験フォームと participating guest information のフォーマットに記入し返送するとともに, 実験開始までには利用者の機関と ALS との間での利用者合意事項文書を提出する必要がある (詳しくは <http://www-als.lbl.gov/>)。

2.5 ブルックヘブン国立研究所 NSLS の場合

NSLS (National Synchrotron Light Source) は BNL (Brookhaven National Laboratory) の中にあり, 軟 X 線・VUV 領域の放射光磁気円二色性を初めて世に出した研究所としても知られている。日程の都合上, 今田単独訪問となった。BNL は, ニューヨーク州 Long Island の東部に位置し, ニューヨーク市内の Penn Station から Long Island Railroad (LIRR) に乗って1時間40分程度で最寄り駅につきここからタクシーに乗った。後で知ったのだが, Ronkonkoma 駅との間は朝夕各1便研究所のマイクロバスが運行されているので, 前もって予約をしておけば利用できる。いずれにしても, LIRR の路線図と時刻表は前もって手に入れておくべきである (これらは, Penn 駅でもらえるし, <http://www.nsls.gov> にも載っているようである)。

NSLS を訪問し, まず, 所長の Michel Hart 先生に話をうかがうことにした。NSLS では何に最も力を入れているかを尋ねたところ, 「全てに力を入れている」ことを力説された。VUV と X 線の両方のリングを持つというほかに類のない施設として, cm から fm まで, 10^{13} の波長領域をカバーし, できうる限り多くのユーザーの要求にこたえようとしている (図3)。約15年前にできたリングであるが, VUV リングには2本, X 線リングには5本の挿入光源を持ち, 光強度スペクトルでは第2世代と第3世代の光源の中間に位置している。約20年前に蓄積リングのラティスを設計したマシングループは今も強力で, 最近では真空封止型のアンジュレータを用いれば3 GeV リングでも高エネルギーリングに匹敵する硬 X 線が出せることを

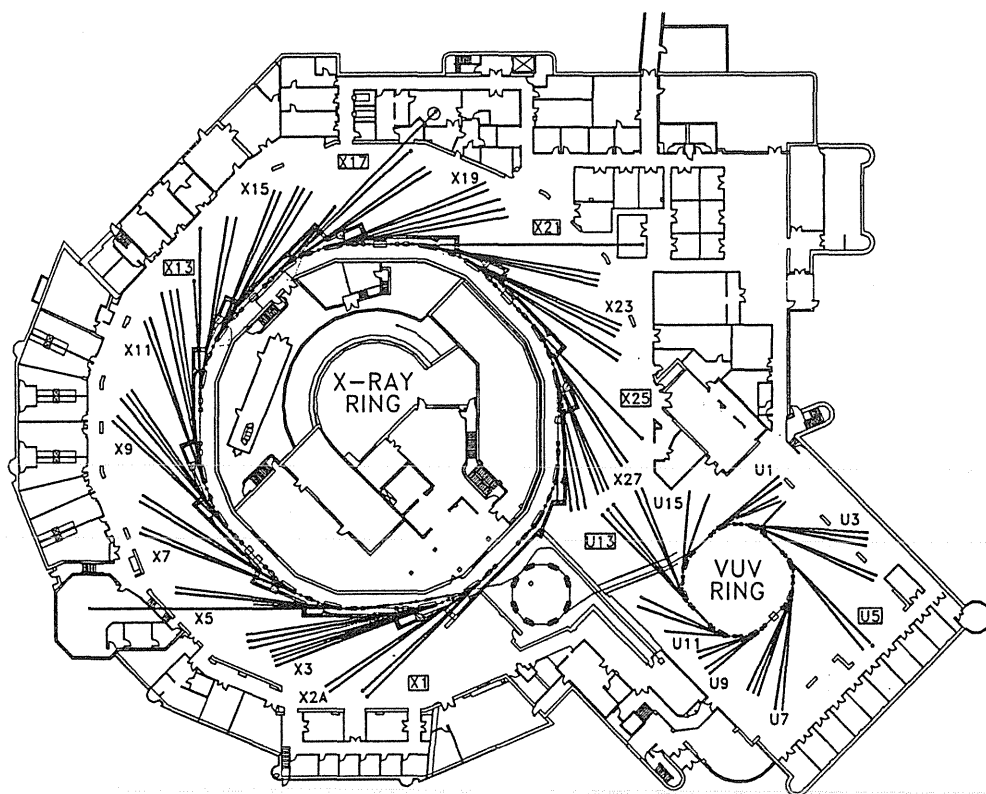


Figure 3. VUV and X-Ray Rings of NSLS (Brookhaven National Laboratory).

示し、SPring-8 と共同で真空封止型アンジュレータのプロジェクトを進めている。X線領域の分光器では世界一の実力を持っているし、VUVリングでは最近赤外線領域を強化し、今では6本の赤外ビームラインを持っていることも注目に値する。将来に向けてのプロジェクトの一つとして、FEL実現のための試験研究を推し進めている。これらの点でNSLSは世界の放射光施設の中でユニークな地位を保っているとのことであった。

ビームラインの更新など施設の意思決定に際しては、15人程度からなるユーザー委員会（約半数は選挙で選ばれたユーザー、残りは各分野のユーザー小委員会の代表者）で討議され、所長に答申され、これをもとに所長が決定するということであった。ビームラインのうち半数以上が、ユーザーが立ち上げて運営するいわゆるPRT方式を取っている。今後利用者の分野の変化によりNSLS職員の果たす役割が増える可能性もあるようだ。ビームラインに投入される予算の出所は、DOE、NSFをはじめ、Commerce、Healthの各省庁、各種企業や基金など、多岐にわたっている。施設としてDOEから受け取る予算は(DOEの放射光関係予算2億ドルのうち)約3000万ドルで、そのうち約2500万ドルを人件費も含めた維持費やユーザー関連費用に充て、残りの約500万ドルを研究開発に用いている。職員は160人ほどで、そのうち10人程度でリングの運転を行い、35人程度がビームライン中心の仕事

をしているとのことであった。

VUVリングは運転エネルギー700 MeVの設計であったが、96年には800 MeVに上げ、現在は850 MeV運転も行っている。将来的には900 MeVまで上げる可能性もある。入射は1日5回程度行われる。いっぽうX線リングは、2.5 GeVと2.8 GeVの2つの運転モードがあって、入射は1日2回である。いずれのリングも2週間につき1-2日のマシンスタディ、1月に2日ほどのメンテナンスを行うとともに、12-1月ごろに2ヶ月程度と5月頃に1-2週間程度ビームライン更新などのためのシャットダウンを行っている。

VUVリングの特長の一つは、上でも触れたように赤外ビームラインである。2本のビームラインでは、偏向磁石の出口直前に置かれたミラーで、放射光をリング面と垂直に跳ね上げている。これによって、リングのほかのコンポーネントと干渉することなく、 $90 \times 90 \text{ mrad}^2$ といった非常に大きな取り込み角を実現し、広い角度発散を持つ赤外放射光を効率よく取り出している。赤外BLの研究テーマの例としては、表面科学、半導体材料・デバイスや生体試料の赤外線顕微分光、高圧、高温超伝導、ポンププローブ分光などが挙げられる。

VUVリングには、挿入光源が2本ある。1本は、95年に更新されたBLで、斜入射の球面回折格子分光器(SGM)の後ろにスピン分解光電子分光装置が常駐してい

る。このスピン分析器は金の散漫散乱を用いたものである。分光器は強度をかせぐためにブレード型を用いており、光エネルギー範囲は、10–250 eV と広い。分解能は29 eV において3.5 meV と、10,000に迫っている。分光器自身の高次回折光の問題は確かにあるが、斜入射分光器を用いた事によって強度のメリットが大きく、高次光もうまく回避できることもあるとのことであった（例えば40 eVの光が欲しいときは、アンジュレータの1次光を40 eVにセットし、分光器は20 eVにセットして2次回折光として40 eVの光を通す。1次回折光(20 eV)や3次回折光(60 eV)はアンジュレータ光の弱いエネルギーなので気にはならない)。このBLにおける最近の成果としては、 $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ の強磁性金属相が、minority spinの状態密度のみがフェルミ面でギャップをもつ half-metal であることが明らかにされたことをあげる事が出来る。この仕事の場合もそうであるが、NSLSには優秀な若手が多く、彼らの活躍が目立っているとの印象を受けた。

もう1本の挿入光源BLでは直入射型回折格子分光器(NIM)を採用しており、現在はシエンタ社製の高分解能電子エネルギー分析器がついている。少し前には、シエンタ分析器の出口に小型スピン検出器をつけてテストが行われたとのことであった。また、真空中で分析器が回転するタイプの角度分解光電子分光装置もこのBLで使われる。NIMは今年6月から稼動しており、光エネルギー5–30 eVで分解能は10,000–20,000である。この分光器の特徴は、入射スリット直前の集光鏡が、直入射に近い15:1の縮小光学系になっていて入射スリット上で光スポットの分散方向のサイズを15 μm まで縮小していることである。

かつてC. T. Chenが軟X線領域のMCDとしては初めての実験であったNi 2p MCDを行ったビームラインでは、Chenが去った後もMCDが中心に行われている。ここでは偏向部放射光のうちリング面より上または下の成分を使って円偏光成分を得ている。分光器はChenが台湾に買い取ったドラゴン分光器の後継機として球面回折格子分光器が用いられている。回折格子の反射角を、低エネルギー(150 eV以下)では160°, 高エネルギー(90 eV以上)では174°と使い分け(中間域はどちらでもカバーできる)、約25eVから1400 eV近くまでを最高分解能10,000程度でカバーしている。MCD測定は、電磁石を用いて試料を磁化し、光電子収量法または反射法で行われている。反射法は、特に多層膜によく用いられ、例えば界面における化学的ラフネスと磁氣的ラフネスの違いを調べることができる。

X線リングで注目されるのが、互いに直行する磁場を生じる永久磁石と電磁石を組み合わせて、最高100 Hzで極性反転を目指す楕円偏光ウィグラーである。NSLS, APSとロシアのノボシビルスクにあるBINPの共同開発で、現在X線リングのR&Dセクションに設置されてテスト中であった。円偏光の極性の交流的な反転によって、ロックインの手法が使えるようになり、極微な円二色性の測定が可能になる。これによって、磁性体はもちろん例えば生物分野では旋光性(カイラリティ)を持つ有機分子の研究など、研究対象が飛躍的に広がるので、非常に有力な手法であろう。

最後に直線加速器型UV-FELの建設現場を訪問することができた。このFELは、NSLSに隣接する別棟Source Development Laboratoryで、加速器と光源の建設が行われていた。予算獲得のために「このプロジェクトが実現可能なことを示す」ために、秋には、挿入光源に入る直前の電子ビームを解析して、電子源および加速器の性能がFELを可能にするものであることを検証する実験を予定している。順調にいけば1年半以内に最初の光を取り出すとのことであった。

3. おわりに

上に見たように米国では各放射光施設がそれぞれの戦略のもとで21世紀に向かって一段と飛躍を図ろうとしている。そこには施設ごとに強相関電子物性、表面、イメージングやマイクロコピー、マイクロ・マシーニング、biologyあるいは全方位戦略等々の特徴がある。エネルギー領域を棲み分ける意識すらある。高輝度光源では他の施設では出来ない研究を目指しその成果をはっきりと要求している。マイクロ・スペクトロスコピーもその一つである。これらの意識は我が国と比較してきわめて鮮明である。すでに欧州でもBESSY IIが電子蓄積に成功しさらにスイスでも高輝度中型放射光施設が建設中である。ひるがえって我が国を見れば高輝度中型放射光施設はいまだに予算が付いていない。諸外国とのこのギャップをいかにして埋めるか、残された課題はあまりにも多い。第2世代リングでの継続研究も必要であるが同時に21世紀に入っても競争力のある課題を真剣に模索しなければなるまい。強相関電子系のマイクロ・スペクトロスコピー、軟X線での2次光学過程や非線形光学の精密分光などは21世紀になって展望の持てる課題ではあるまいか。そのためには長直線アンジュレータ放射光の積極的利用やVUV/軟X線のFELを考えねばなるまい。