

IV 加速器／ビームラインの現状

1 加速器

1. はじめに

SAGA-LSでは2008年5月～7月に建屋増築工事が行われた。増築工事終了後の実験ホールの状況を図1に示す。拡張工事に伴う長期シャットダウン後、加速器は定常的な運転サイクルに戻り、安定にユーザーに放射光を提供している。加速器グループではユーザー運転を行いつつ、既設加速器系のさらなる安定化、性能向上及び挿入光源等の新規開発を進めている。

2. 進展及び現状

光源スペクトルを図2に示す。光源としては偏向電磁石、プラナーアンジュレータLS4U（佐賀大）に加えて可変偏光挿入光源としてAPPLE-II型[1]アンジュレータLS3Uが加わった。光子エネルギー35eV～1keV（含7次）、周期長72mm、周期数28、最小最大ギャップ30mm/200mmである。片持ち式C型構造にAPPLE-II磁石列を配置したものである。設置する長直線部LS3は空間的制約が大きく、設計では特に軽量コンパクトであることが考慮された[2]。設置は2008年末に行った。設置状況を図3に示す。2009年1月末立ち上げ調整のため初めてBL10にアンジュレータ光を導入した。

開所以来段階的に蓄積電流増大を行っている。入射蓄積スタディ、蓄積リング熱負荷調査及びビームライン光焼きだしをすすめ、2008年8月に蓄積開

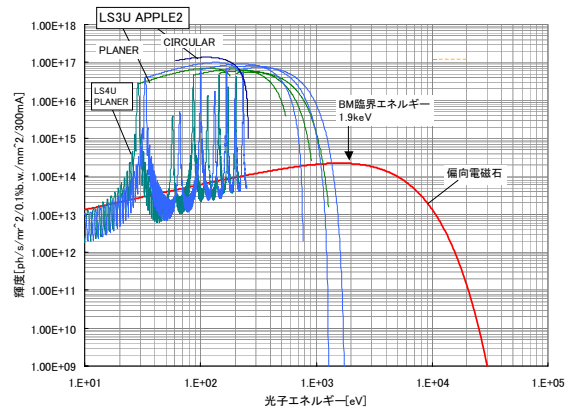


図2 SAGA-LS放射光スペクトル

始電流を150mAから200mAへ、2009年1月に250mAに増大させた。

これと平行して放射光観測系整備が進んでいる。ビームスタディ用及びユーザー運転時モニター用光観測ラインとしてそれぞれBL20、21を整備した[3]。BL20についてはリング遮蔽壁外に観測用暗室を設け、ストリークカメラ及びSR干渉計[4]によるビームサイズ測定系のスタディを開始した。

またビームエネルギーモニター及び高エネルギーガンマ線利用研究を目的として、CO₂レーザー(10.6 μm)を用いたレーザーコンプトン実験の準備を進めている[5]。これまでに蓄積リングへレーザー光を導入する真空チャンバーのBL1への設置が終了した。

リアックについては、手動制御であった制御系の計算機制御化を進めた。加速器運転の省力化、運転条



図1 施設拡張後の加速器及びビームラインの状況。実験ホール南側2階テラスより撮影。



図3 長直線部LS3におけるAPPLE-II設置状況

件の再現性向上及びマシンスタディにおける計画的な運動制御の実現が目的である。これまでに電子銃、クライストロンモジュレータ、位相器の個別計算機制御化が終了した。また電子銃については、計算機制御化に加え、入射効率改善やシングル、セベラルバンチ運転等実現のために多様なパルスモードを持つグリッドパルサーに交換した[5]。

3. 運転実績

加速器運転は、月曜マシンスタディ、火曜～金曜ユーザー運転の定常的なサイクルで行われている。ユーザー運転時間は10時間/日で週当たり40時間程度である。2008年4月には新たな運転サイクルの試みとして24時間運転も行われた。

ユーザー運転実績は例年（～1500時間）に比べ減少し1040時間であった。これは前述の増築工事に伴う5-7月のシャットダウンが原因であり、2006年開所以降最小となっている。2008年のユーザー運転における月当たりのビームアポート率（ユーザー運転中の加速器故障時間÷実績ユーザータイム）は3.8%で、昨年度（6.4%）[6]に比べ40%減少した。このアポート率はリニアッククライストロンE3729の重故障（カソードヒーター断線）でほぼ決まっている。

4. 今後の計画

SAGA-LSの放射光源としての総合的な能力は、今後も継続的に向上する予定である。蓄積電流増大のスタディをさらに進め、300mAでのユーザー運転を行う計画である。またより高エネルギーのX線ニーズに応えるため2009年度設置を目標に4T超伝導ウィグラー（臨界エネルギー5.2keV）の設計を進めている。特

に運用上の安定性、堅実性を目指している。

5. まとめ

SAGA-LS加速器グループでは継続的な既設加速器設備の性能向上を進めつつ、250mA運転による高フラックス化を行い、可変偏光アンジュレータによる高輝度光提供を開始した。今後、超伝導ウィグラーの開発を行い、放射光源としてのさらなる性能向上を進める。

参考文献

- [1] S. Sasaki, “Analyses for a planar variably polarizing undulator”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*347, 83-86 (1994)
- [2] 江田他, ”SAGA-LSにおけるAPPLE-IIアンジュレータの製作”, 第22回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム予稿集、東大本郷, 108 (2009).
- [3] 高林他, ”放射光モニタ用ビームラインBL20・BL21”, 九州シンクロトロン光研究センター・早稲田大学ナノ理工学研究機構合同シンポジウム平成19年度研究成果報告会実施報告書, 152-155 (2008).
- [4] T. Mitsuhashi, “Spatial coherency of the Synchrotron Radiation at the Visible light Region and its Application for the Electron Beam Profile Measurement”, *Proceedings of the PAC97, Vancouver, Canada*, 12-16 (1997).
- [5] 金安他, “SAGA-LSにおけるレーザーコンプトン散乱γ線生成の検討”, 第22回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム予稿集、東大本郷, 108 (2009).
- [6] 高林他, “SAGA-LSリニアック新型グリッドパルサーの導入”, 第5回加速器学会年会・第33回リニアック技術研究会プロシーディングス, 東広島, 966-968 (2008).
- [7] 江田他, “放射光施設SAGA-LSの現状と今後”, 第5回加速器学会・第33回リニアック技術研究会報告集, 東広島, 616-618 (2008).

加速器グループ
江田 茂

2 県有ビームライン

1. はじめに

2008年度前半には、昨年度から引き続き行われた施設全体の増築工事が完了し、実験ホールの床面積も約1.4倍に拡張された。これにより、ビームラインの設計・配置がこれまで以上に容易になり、ビームラインの拡張性が確保された。この拡張された実験ホールには、偏光可変アンジュレータを光源とする新規ビームライン BL10 が建設された。本アンジュレータは県有ビームラインとしては初めての挿入光源である。さらに、ユーザー利用の多い硬 X 線を利用することのできる唯一のビームラインの BL15 の混雑を解消することを目的に、BL11 が BL10 と併設されて建設された。本報告では、これら新設ビームラインの状況と、既に建設され利用が行われている県有ビームラインの状況について述べる。

2. 県有ビームラインの状況

2-1 全体の概要

表 1 は 2008 年度末の時点における県有ビームラ

インの状況について、光源、利用可能なエネルギー、可能な実験手法などについてまとめたものである。なおこの表には、県有ビームライン以外の他機関設置ビームライン（九州大学ビームライン；BL06、佐賀大学ビームライン；BL13、ニコンビームライン；BL18）も一緒に示してある。また、BL07 は計画中の県有ビームラインである。光源に超伝導電磁石を使用し、稼働中の硬 X 線ビームラインよりも高エネルギーの X 線の利用を目指している。現状の県有ビームラインでは、軟 X 線の利用が可能な BL10（2008 年度新設）、BL12、硬 X 線の利用が可能な BL11（2008 年度新設）、BL15、そして白色光の利用が可能な BL09A の 5 本のビームラインが稼働又は調整中である。

2-2 新設ビームライン BL10、BL11 の概要と状況

(1) BL10 [1]

BL10 は偏光可変型アンジュレータ APPLE-II を光源とする 30 から 1200eV の真空紫外光・軟 X 線を利

表 1 SAGA-LS に設置された 2008 年度末におけるビームラインの状況

ビームライン	光源 ^{a)}	単色器	利用エネルギー	実験手法	状況	設置者
BL06	BM	2 結晶	2.1~23keV	XAFS、SAXS	建設中	九州大
BL07	W	2 結晶	4~35keV	XRD、XAFS、イメージング ^{g)}	計画中	佐賀県
BL09A	BM	なし	白色	LIGA Process、Topo	稼働	佐賀県
BL09B	BM	瀬谷一波岡	10~50eV	Photochemistry	稼働	佐賀県
BL10	U	VLS-PGM ^{b)}	30~1200eV	PEEM、ARPES	調整中	佐賀県
BL11	BM	2 結晶	2.1~23keV	XAFS、SAXS	稼働	佐賀県
BL12	BM	VLS-PGM ^{b)}	40~1500eV	XPS、XAFS、etc.	稼働	佐賀県
BL13	U	VLS-PGM ^{b)}	15~800eV	ARPES、etc.	稼働	佐賀大
BL15	BM	2 結晶	2.1~23keV	XAFS、XRD、イメージング ^{g)}	稼働	佐賀県
BL18	BM	多層膜ミラー	~92eV	EUV 露光	稼働	(株)ニコン

a) BM：偏向電磁石、U：アンジュレータ、W：ウィグラー

b) VLS-PGM：不等刻線間隔平面回折格子分光器

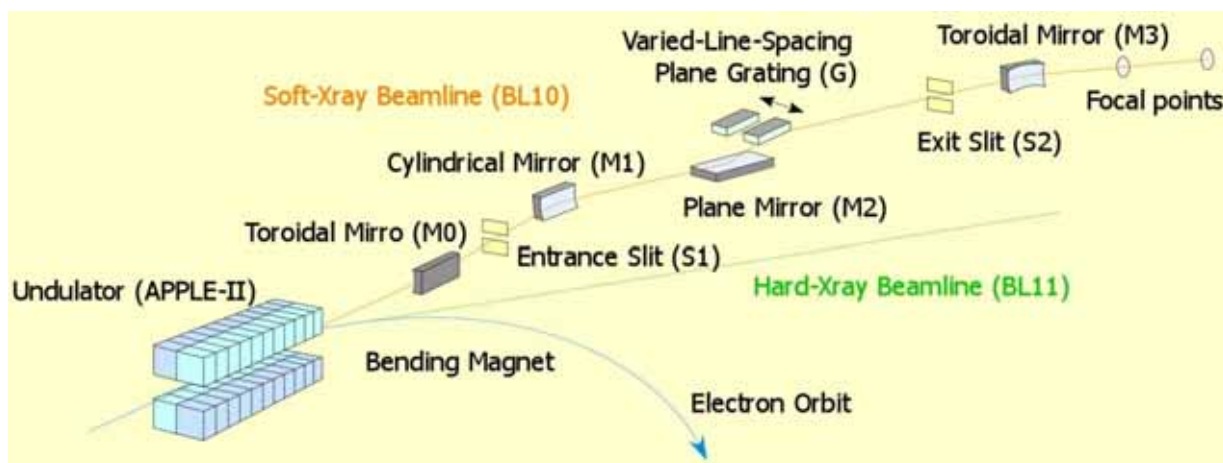


図1 BL10の光学系と機器構成の概要。同時に建設した硬X線ビームライン（BL11）との位置関係が緑色の点線で示してある。

用することのできるビームラインである。本アンジュレータを採用することにより、水平直線偏光、垂直直線偏光、円偏光、楕円偏光等、実験の目的に応じた様々な偏光特性を利用することが可能となった。

図1に、BL10のこのビームラインで採用した光学系ならびに機器構成の概要を示す。光学系は、広いエネルギー範囲で高フラックス、高分解能が期待できる不等刻線間隔平面回折格子ミラーを用いた偏角可変型不等刻線間隔平面回折格子分光器（偏角可変VLS-PGM）を採用した。広範囲のエネルギーの利用を可能にするため、パラメータの異なった2枚の回折格子（G1、G2）を用意し、G1は主に低光エネルギー側で、G2は高光エネルギー側で用いる。光源からのシンクロトロン光は、トロイダルミラー（M0）で縦方向を入手スリット（S1）上に集光され、このスリットが仮想光源となる。入射スリットを通過した光は、円筒ミラー（M1）、平面ミラー（M2）、G1またはG2を通過し、出射スリット（S2）に集光される。S2を通過したシンクロトロン光は、後置ミラー（M3）で再び集光される。実験装置は光電子顕微鏡（PEEM）装置、角度分解光電子分光（ARPES）装置の2台が設置され、それぞれの実験装置の試料上に焦点を結ぶよう、M3にはM31、M32の2枚のミラーが用意されている。2台の実験装置はタンデムに設置され、上流側にPEEM装置が下流側にARPES装置設置されている。図2はこれらの装置の上面図である。

BL10の建設は、隣り合うBL11と同時に進められ

た。また、施設の増築工事との関係や光学素子の製作状況とも絡み3期に分けて建設を行った。第1期工事期間中（4月15日～7月10日）には、光のオン、オフのスイッチの役目を行うビームシャッター、ビームライン下流に余分な光を流さないように光の取り込み角度を制限するマスク（固定マスク、可動マスク）などの遮蔽壁内の機器や遮蔽壁外に設置した光学ハッチ、ならびに光学ハッチ内にM0ミラーを装着するチャンバーなどの機器が設置された。増築工事が完了した7月28日～9月6日の期間で第2期工事が行われた。第2期工事では、光学ハッチ以降の、ミラーチャンバー、スリットチャンバー、分光器チャンバーなどの機器が、増築で広がった実

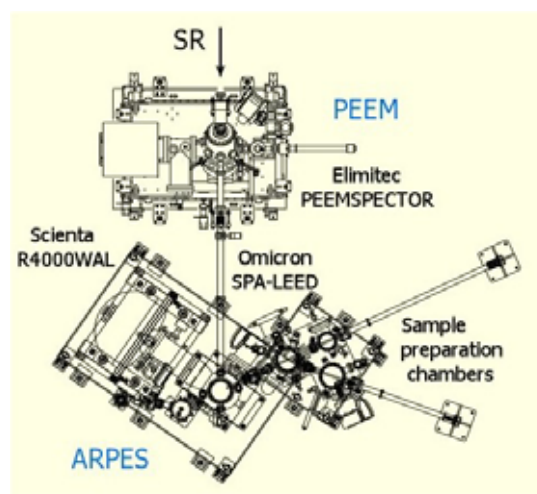


図2 BL10にタンデムに設置された2つの実験装置の上面図。シンクロトロン光は図の上側（↓）から装置に入ってくる。ARPES装置を使うときは、PEEM装置のチャンバーの中を光が通過する。



出射スリット
(S2)
後置集光鏡
(M3)

偏角可変型不等刻線間隔
平面回折格子分光器

入射スリット
(S1)

光学ハッチ
および
前置集光鏡
(M0)

図3 完成したBL10の全体写真。偏光可変型アンジュレータからのシンクロトロン光は図右側より入ってくる。

験ホール内のエリアに設置された。光学素子の完成を待って、10月28日から12月28日の期間で第3期工事が行われた。この期間では、全てのミラーと回折格子のチャンバー内への装着が行われ、ベーキングを経てビームラインのすべてのセクションを超高真空中に置いた。図3は完成したBL10の全体を写した写真である。ただし、遮蔽壁内の基幹部機器はこの写真の中に写っていない、写真中、平面回折格子分光器と示した機器以降が、増築により増えた実験ホール内に設置されている。これにより全長30mものビームラインを設置することが可能となり、分光された軟X線の分解能の向上が十分期待で

きるものとなった。また、図4、5にこのビームラインに設置された実験装置の写真を示す。

年明けの2009年1月より、ビームラインの立ち上げが行われたが、アンジュレータからのシンクロトロン光を用いた、全ての光学素子(ミラー:5枚、回折格子:2枚)の光焼き出しと、それと並行して可動マスク、スリットを含めた光軸の調整を行った。今回の光焼き出しにおいては、アンジュレータからのシンクロトロン光の輝度が、従来よりも3ケタ以上高い領域があるため、光学素子等に光を初めてあてた場合に、問題となる脱ガスによる真空劣化と光学素子の汚染に十分な注意を払いながら行った。



図5 BL10に設置した光電子顕微鏡(PEEM)装置の写真



図5 BL10に設置した角度分解光電子分光(ARPES)装置の写真

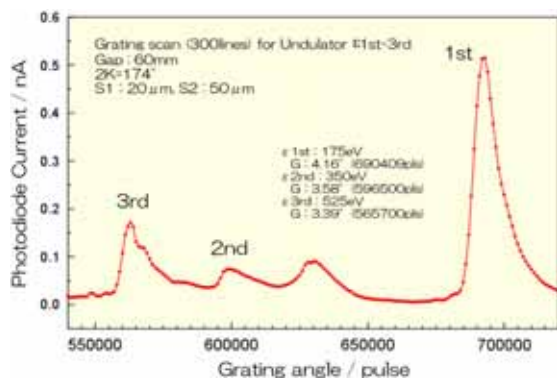


図6 Gap幅60mmのときにアンジュレータから放射されたシンクロトロン光の強度分布。横軸は回折格子の回転角度を表すパルス値で示してある。1次光から3次光までが観測されており、パルス値から求めた1次光のエネルギーは175eVである。

図6はアンジュレータのGapを60mm(最少Gap:30mm)まで狭めた時の、アンジュレータ光の強度分布である。横軸は回折格子の回転角をパルス値で示したものである。縦軸は、M3ミラー下流にフォトダイオードを設置し、そのフォトダイオードに流れる電流を検出したものである。1次光から3次光まで検出されており、パルス値から換算した1次光のエネルギー値は175eVである。

(2) BL11 [2]

BL11は偏向電磁石を光源とする硬X線ビームラインである。BL15と同様にSi(111)結晶を用いた2結晶分光器を設置することにより2.1から23keV程度のX線を利用することができる。本ビームラインは利用者が多く、外部ユーザーに十分なマシンタイムを提供できないBL15の状況を改善し、BL15の



図7 BL11第1実験ハッチと設置したXAFSスペクトル計測システム

機能の一部を移設することを目的として建設したビームラインである。ビームラインの建設は、BL10の建設と並行して行い、第1期工事の期間内に遮蔽壁内の基幹部機器とBL10光学ハッチ内に設置される4象限スリット、分光器、第1実験ハッチ等の設置・建設が行われた。施設増築完了後の第2期工事期間内においては、第2実験ハッチの建設が主に行われた。ビームラインは年明けより、第1実験ハッチでXAFS測定が行えるよう調整を行った。その結果、わずか3週間で光学系の調整と評価を完了し、2月24日からパイロットユース利用、3月3日からは一般ユーザーへの利用が始まった。図7はBL11、第1実験ハッチの外観および計測システムの写真である。この実験ハッチでは透過法、蛍光法、転換電子収量法などの手法を用いてXAFSスペクトルの測定が可能である。図8は第1実験ハッチに設置したXAFS測定システムを用いて測定した各エネルギーに対する光子強度の分布を示したものである。5~12keV程度の範囲で $1E9$ (photons/sec)以上の光子強度が得られている。

先に示したように、硬X線を利用するためのBL11の実験ハッチは、第1実験ハッチと第2実験ハッチの2つの実験ハッチに分かれていることを特徴に持つ。このような配置をすることで、第1実験ハッチで実験中に第2実験ハッチで次の実験準備が進められるなど、ユーザー利用の効率的な運用を行うことを可能とする。また、これら実験ハッチの間には次年度に集光ミラーを設置する予定で、第2実験ハッチにおいては集光したX線を利用することが可能である。本ビームラインでは主にXAFSや小角

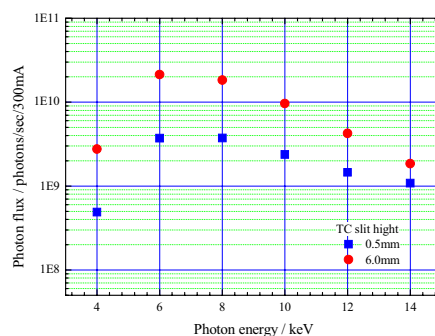


図8 BL11第1実験ハッチで測定した光子強度分

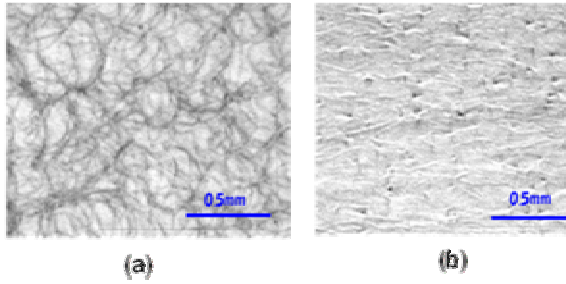


図9 白色トポグラフ装置で観察したSiC ウェハの顕微像。(a)透過配置、(b)反射配置。

散乱等のX線を利用した汎用的な実験が行えるようになる。また、2つの実験ハッチの間に設置された真空パスを利用して、カメラ長が10m以上の超小角散乱実験が行えるようになるもの一つの特徴である。

2-3 既設ビームラインの状況

BL09A、BL12、BL15においては昨年度に引き続き、各種実験装置がユーザー利用に供されるとともに、測定手法等の開発や高度化も行われた。その一例を以下に示す。

(1) BL09A [3]

BL09Aでは前年度に整備した白色トポグラフ装置の立上、および実証試験を行った。図9は、SiCウェハー（2インチφ、0.38mm厚）を用いて透過



図10 BL12で開発した試料搬送導入装置の外観

配置と反射配置で得られた顕微像である。透過配置で観測した-100回折斑点の顕微像（図9(a)）では、多くの転位が、分離または絡み合って網目状に分布している様子が観測されている。これらの転位は、膜の成長時に導入されたgrown-in混合（らせん、刃状）転移であり、マイクロパイプ欠陥も所々観察されている。反射配置（入射角度：3°）での004回折斑点の顕微像（図9(b)）からも線状と小さなドット模様が観測されている。透過配置と反射配置で観測された顕微像の違いは、前者が試料の厚さ方向全体の転位を投影しているのに対し、後者は表面のごく浅い領域の転位を観察していることによる。

(2) BL12 [4]

図10は、BL12で開発した試料搬送導入装置の写真である。BL12ではXPS、NEXAFSなどの表面分析手法により試料表面における化学結合状態の解析を主に行っている。しかし、従来の手順では、大気中に存在する酸素や水分により試料表面が酸化し、正確な情報が得られないなどの問題が生じている。

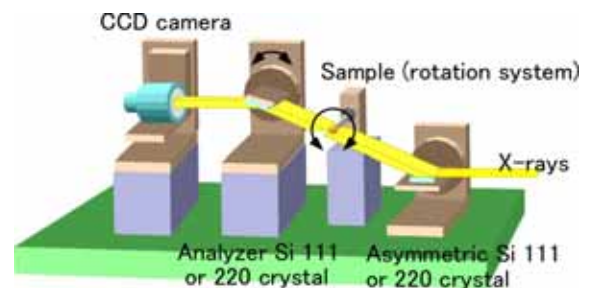


図11 BL15で開発したDEI測定システムの模式図

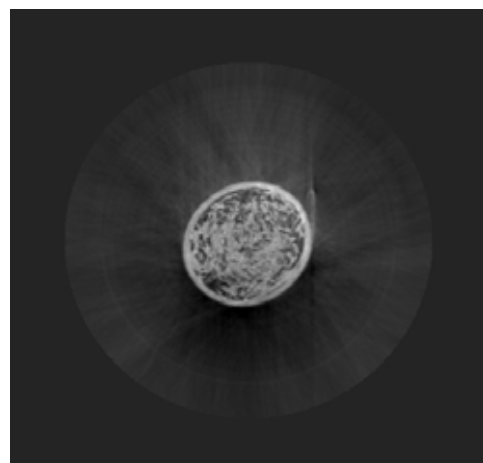


図12 DEI-CT法で得られたビニール紐の断面図

そこで、試料を大気にさらすことなく、真空を保ったまま、あるいは不活性ガスを封入したままの状態、利用者が自分の研究室で作製した試料をビームラインの試料導入チャンバーにまで移送し、測定することが可能となった。

(3) BL15 [5]

図 11 は、BL15 に整備した回折強調イメージング (Diffraction Enhanced Imaging: DEI) 法の測定システムの模式図である。従来の透過型 X 線撮像法は物質の吸収差をコントラストとして像を得るのに対し、DEI 法では、物質内の X 線の透過による位相シフトを測定する手法で、吸収の非常に少ない軽元素からなる物質において高感度な測定が可能となる。図 12 は DEI-CT (Computed Tomography) 法で得られた梱包用ビニール紐の断面像である。内部の繊維の様子が明瞭に可視化されている。

3. まとめ

2008 年度においてビームライングループでは、施設として初めての挿入光源を利用する軟 X 線ビームイラン BL10 を建設し、ユーザー利用に向けた調整を始めた。また、硬 X 線ビームライン BL11 の建設も行い、年度内にユーザー利用への開放を行った。既存のビームライン BL09A、BL12、BL15 においても、ユーザー利用を行いながら、シンクロトロン光利用の高度化のために、新しい計測手法、実験装置の開発を引き続き行っている。

参考文献

[1] 吉村大介, 大谷亮太, 石地耕太朗, 隅谷和嗣, 河本正秀, 瀬戸山寛之, 小林英一, 岡島敏浩, “SAGA-LS 新設ビームラインの建設状況”, 第 22 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム講演予稿集, p.112.

[2] 岡島敏浩, “新 X 線利用ビームライン (BL11) の立上状況”, 第 3 回九州シンクロトロン光研究センター研究成果報告会予行集, (2009), p.33.

[3] 石地耕太朗, 大谷亮太, 岡島敏浩, 川戸清爾, 平井康晴, “SAGA-LS での白色 X 線トポグラフィ導入と性能評価”, 第 22 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム講演予稿集, p.88.

[4] 小林英一, 瀬戸山寛之, 岡島敏浩, “In-situ 測定用の試料搬送導入機の開発”. 2008 年度応用物理学会九州支部学術講演会講演予稿集, p.130.

[5] 隅谷和嗣, 米山明男, 河本正秀, 岡島敏浩, 平井康晴, “SAGA-LS BL15 における DEI 測定システム”, 第 22 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム講演予稿集, p.134.

ビームライングループ
岡島 敏浩

3 佐賀大学ナノスケール表面界面ダイナミクスビームライン (BL13)

佐賀県知事より佐賀大学長への支援要請により平成13年に設立された佐賀大学シンクロtron光応用研究センターは、佐賀県シンクロtron光応用研究施設整備事業への協力の一環として、佐賀大学ナノスケール表面界面ダイナミクスビームラインを文部科学省補正予算により、平成15年度末に実験ホールのBL13に設置した。県有ビームラインが共用の産業利用を目的に掲げているのに対して、佐賀大学のビームラインは、主として教育研究と最先端の科学技術開発・学術研究や人材育成を目指したものであり、平成18年のシンクロtron光の供給開始とともに利用実験が開始されてきたが、本報告では、本ビームラインの主な特長と性能について紹介する。

佐賀大学ナノスケール表面界面ダイナミクスビームラインは、地球上に存在しないが、学術研究上も実用上も有用な、真空紫外線ならびに軟X線と呼ばれるエネルギー領域の光を利用するために建設された。この領域のシンクロtron光を利用するために、光源の加速・蓄積リングから試料までのすべての光路を超高真空下にしている。本ビームラインは不等刻線間隔平面回折格子型分光器を利用するVLS実験ステーションと平面回折格子型分光器を利用するPGM実験ステーションから構成されており、VLSおよびPGM実験ステーションは、それぞれアンジュレーターならびに偏向電磁石からのシンクロtron光が利用できる。

図1は、VLS実験ステーションの下流側から撮影した写真である。光源点は、写真遠方のコンクリート遮蔽されたリング室内にある。その下流にあるビニールシートで覆われた部分の中に不等刻線間隔平面回折格子型分光器が設置されている(3番の付近)。試料は、光源点から約30m下流になり、4番の標識の辺りになる。一方、PGM実験ステーションでの試料位置は、図1中の3番の標識付近であり、分光器を格納しているビニールシートの右手にある。

図2は、エンドステーションに設置された高分解

能光電子分光システムの拡大写真であり、試料準備槽と試料導入槽の様子が良く見える。

下流に見える小屋の中にチタンサファイヤレーザーと再生増幅器が格納されている。レーザーの基本波は、750nm から 850nm を駆動可能であり、再生増幅器は1KHzの繰り返しである。これらにより、また、図1の右手のクリーンブースの中には、別のフェムト秒レーザーと 300KHz までの高繰り返しが可能再生増幅器が設置されている。これらにより、フェムト秒領域からナノ領域までの時間分解光電子分光実験や、シンクロtron光とレーザーの組合せ実験などが可能になっている。^{1,2)}



図1. ビームラインの全体写真



図2. 高分解能光電子分光システム.

図3は、加速・蓄積リングの直線部に設置した平面型アンジュレーターの模式図である。周期長84mm、周期数24の永久磁石からなる周期磁場に

よって電子軌道が規則的に曲がることによってシンクロトロン光の位相が揃い、偏向部電磁石からのシンクロトロン光よりも数百倍もの強いアンジュレーター光が発生する。その計算したスペクトル分布も図に示した。

図4は、このアンジュレーターからの130eVの光のスポットを斜め45度からのCCDカメラで撮影したものである。実測の値は縦140 μm 横350 μm となっているが、調整により、さらに2分の1程度に小さくなると期待している。

アンジュレーター光は、偏向電磁石からのシンクロトロン光に比べて5倍も指向性の良いことが期待されるが、図5に示したように、アンジュレーター光(344eV)の角度分散の計算(右)と実測(左)

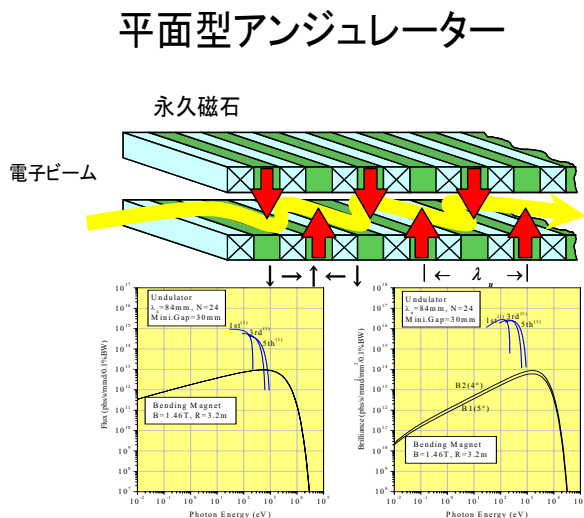


図3. 平面型アンジュレーターとそのスペクトル

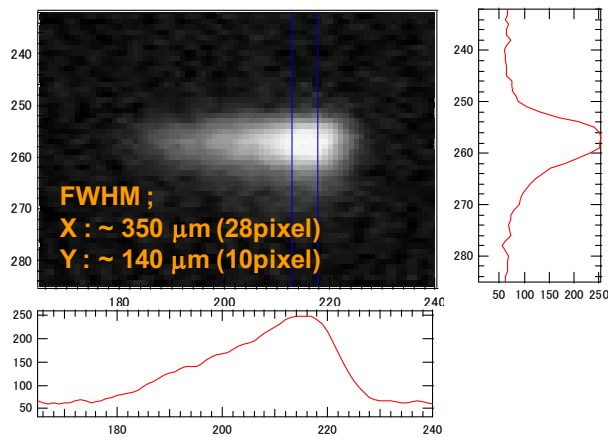


図4. 試料位置での光スポット

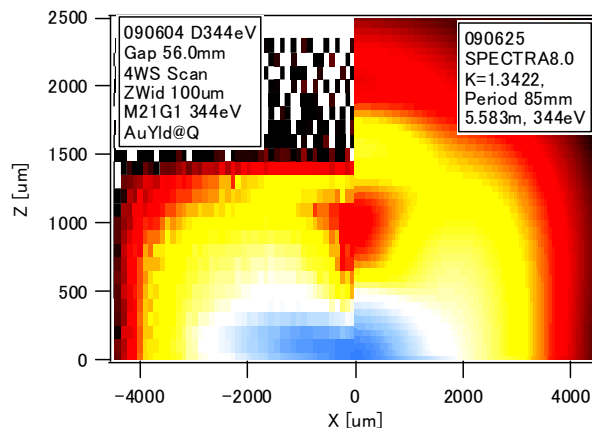


図5. アンジュレーター光の角度分散。右は計算、左が実測。

は、良く一致しており、期待通りとなっている。

以上、佐賀大学ビームラインは、ほぼ設計通りの性能を発揮しており、すでに教育研究に利用されている。特に平成19年度からの文部科学省ナノテク支援ネットワーク事業ならびに平成20年度からの文部科学省特別教育研究経費地域連携融合事業などの推進に供され、その性能を存分に発揮している。紙面の都合で研究成果について述べられなかったが、佐賀大学シンクロトロン光応用研究センターのActivity Reportを参照頂きたい。3)

最後に、アンジュレーターについてご厚意を頂いたUVSOR施設ならびにアンジュレーター導入にご協力頂いたKEK-PFの山本樹先生とSPリング8の大熊春夫先生はじめ、関係各位にこの場を借りて感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 鎌田、極限状態を見る放射光アナリシス(尾嶋編、日本分光学会、測定法シリーズ 40, pp. 49-58, 2002)
- 2) 鎌田、光物性の基礎と応用(光物性研究会編、オプトロニクス社 pp. 171-182, 2006)
- 3) Activity Report 2005-2007, Synchrotron Light Application Center, Saga University (2008)

佐賀大学シンクロトロン光応用研究センター
鎌田雅夫、高橋和敏、東純平、
杉山陽栄、小川浩二、守谷清

4 ニコンビームライン (BL18)

1. はじめに

九州シンクロトロン光研究センター (SAGA-LS) BL18のニコン専用ビームライン設置工事を2008年4月に開始し、2008年9月より試験運用、2009年4月本格的なビームライン運用に入った。本報告において専用ビームラインの設置目的、BL18の構成及び実験内容について報告する。

2. BL18概要

2-1 ビームライン設置

1980年にニコンはステッパー (半導体製造装置/半導体回路パターンをウェハに縮小転写露光する露光装置)の一号機を出荷して以来、露光装置累計出荷台数は全世界で8,500台以上になる。その間半導体パターン微細化に伴い、ステッパー用光源は、水銀g線436nm、i線365nm、KrFレーザー、ArFレーザーとへ、短波長化が進んでいる。現在開発中のEUV露光装置はさらに短波長の極端紫外光 (EUV13.5nm)を露光波長としている。従来の露光装置とは違い、空気の光吸収を避けるため、真空中での露光が必要となる。EUV波長領域の光源の選択肢は少なく、露光装置では放電等のプラズマ発光からのEUV光を使用するが、性能維持に手間が掛かり、基礎研究用光源としては扱い難い。一方装置は大規模になるが、シンクロトロンからの放射光 (SR光)は研究用光源としても実績あるが、EUV露光研究用光源としても発光安定性など有効な特性を持っている¹⁾。実際にEUV露光装置開発 (EUVAプロジェクト) に於いて、NTT厚木Super ALIS放射光施設ビームラインSBL2 (照度: 2.4W/cm²) と兵庫県立大学ニュースバル放射光施設アンジュレータビームラインBL9 (照度: 25W/cm²) が使用されてきた。両ビームラインとも共用であるためマシンタイムの制限があった。さらにSuper ALISが閉鎖 (2008年3月) となり、新規ビームラインが必要となった。その中、九州シンクロトロンに専用ビームライン設置

が認められ、EUV露光装置研究用ビームライン設置が可能となった。2008年4月設置工事を開始、9月試験運用、2009年4月に本格的稼動を開始した。

2-2 BL18構成

- BL18の配置図及び全体写真を図1、図2に示す。シンクロトロンからのSR光は、2枚のトロイダルミラー (図1、M1、M2) により平行光となり、M3ミラーにて照射試料上に集光される。

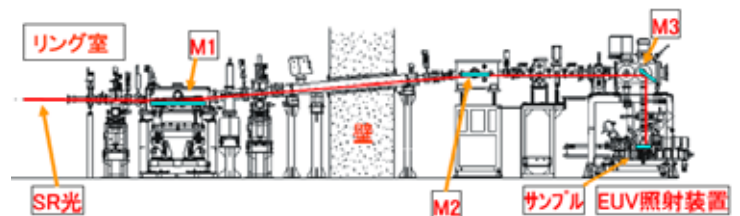


図1 BL18配置図 /光学系: 2枚ミラー構成



図2 BL18全景 (実験ホール側)

図3にEUV照射装置を示す。SR光は照射装置の上部の分岐チャンバーから、トロイダル多層膜折り曲げミラー (M3) によって下部照射チャンバー内に設置された試料上へ集光される (最大9W/cm²、ビーム径0.4x0.6mm)。SR光は多層膜ミラーM3とZrフィルターによって、波長13.5nm (半値幅1.1nm) に分光される。照射チャンバーは常に高真空度状態 (<5x10⁻⁷Pa) に保持さ、試料はロードロック室を通して照射チャンバー

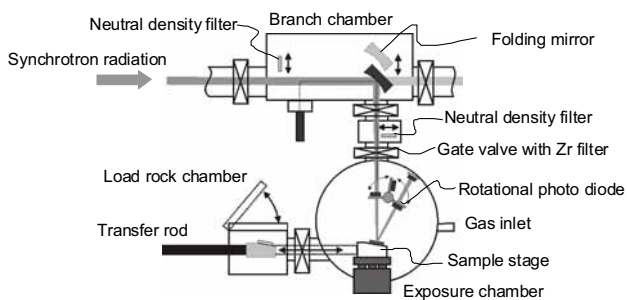


図3 EUV照射装置

に導入される。試料照射強度(試料への入射光と試料からの反射光)は照射チャンバー内の同一フォトダイオードにて測定され、検出器の経時変化等の影響を受けず、EUV照射による反射率変化を測定することが出来る。照射チャンバーには、水蒸気や有機ガス等を導入できるガス導入系が設けられているため、試料の照射雰囲気を変えながら、EUV光(SR光)照射による反射率変動の測定が可能である。本ビームラインでは、EUV露光装置開発に必要な基礎研究及び技術開発が行われるが、露光装置課題の一つであるコンタミネーションの研究(露光光学系が曇る問題)が当面の最重要テーマである²⁾。

3. 実験

EUV 光学系のコンタミネーション量は EUV 照度に比例すると考えられていたため、これまでの実験では比較的照度の高い条件(2.4-25W/cm²)で試料照射を行い、EUV 露光装置上でのコンタミネーションによる反射率低下を予想してきた³⁾。しかし、実際の露光装置でのコンタミネーションによる光学系の透過率低下はSR光照射実験からの予想とは一致せず、実験予測よりもかなり速いものであることが分かってきた。露光装置での状態を再現するため、減光フィルターを用いて露光装置に近い低照度(1W/cm²以下)のEUV光の照射実験を行った。減光フィルターを組み合わせることにより、2x10⁻³W/cm²から8W/cm²の範囲の照度実験が可能である。試料にはSi-cap Mo/Si多層膜ミラーを用いた。照射装置にはコンタミネーション源としてC6F14(perfluorohexane)を5x10⁻⁵Pa導入した。EUV光を照射したときの多層膜ミラーの反射率変化を図4に示す³⁾。従来の実験結果とは大きく異

なり、同じ照射量でも照度によって反射率低下(コンタミネーション付着)が著しく異なることが観測された。C6F14の場合、照度が低いほど、少ない照射量でコンタミネーションが成長することを示している。この結果は、露光装置で観測されているカーボンコンタミネーション付着傾向、即ち低照度でもカーボンコンタミネーション付着が起こることを示すものである。従来とは違った新しいコンタミネーション付着過程の存在を示しているものである。2009年度はさらに実験を進め、露光装置内で起こるコンタミネーション付着プロセス解明をしたいと考えている。

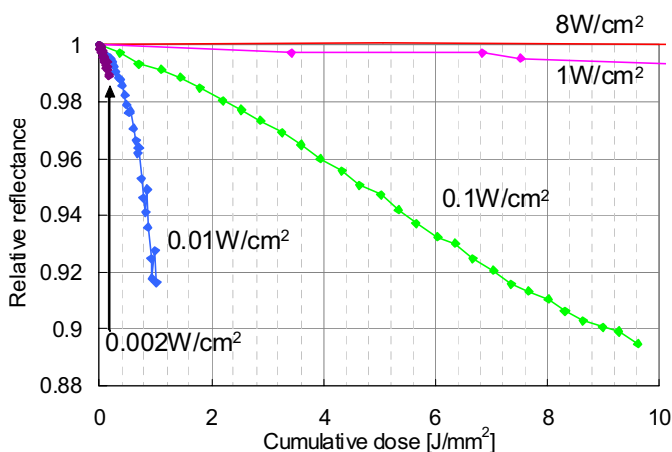


図4 C6F14 雰囲気中での EUV 光照射による多層膜ミラーの反射率変化 C6F14 圧力: 5x10⁻⁵P

4. まとめ

BL18にニコン専用ビームラインを設置、2009年に本格的な運用を開始した。露光装置条件に適合した環境下での試料のEUV照射実験が可能となった。コンタミネーションによる光学系反射率の低下を解明する実験を開始した。

本発表で用いている実験データはNEDO資産を利用して得られたものである。

参考文献

[1] S. Matsunari, Y. Kakutani, T. Aoki, S. Kawata, K. Murakami, "Durability of capped multilayer mirrors for highvolume manufacturing extreme ultraviolet lithography tool", Proc. SPIE 7271,

72713R (2009) .

[2] S. Yulina, M. C. Schürmannb, S. Matsunari,
V.Nesterenkoa, M.Schürmanna, T.Feigla, N.Kaisera,
“Optics lifetime under pulsed and synchrotron
radiation”, 8th International Symposium on Extreme
Ultraviolet Lithography, Prague, Czech Republic
(2009)

[3] .K. Murakami, T. Yamaguchi, A. Yamazaki, N.
Kandaka, M. Shiraishi, S. Mastunari, T. Aoki,
S. Kawata,”Contamination study on EUV exposure
tools using SAGA Light Source”, Proceeding of SPIE
Mircolithography (2010).

株ニコン 材料・要素技術研究所
河田 真太郎

5 九州大学ビームライン (BL06)

(1) ビームラインの設置

1. はじめに

高強度、高指向性、エネルギー連続性の特徴を持つシンクロトロン光を利用した分析、微細加工技術は、最先端の材料科学、物質科学、分析科学等の分野において不可欠となっている。九州大学に所属する教員の多くは、従前より利用申請/採択方式に基づき、高エネルギー加速器研究機構(つくば市)、高輝度光科学研究センター(SPring-8、兵庫県佐用郡)、分子科学研究所(岡崎市)のシンクロトロン光設備を活用して研究成果をあげている。そのような活動の中で、距離的、時間的制約から九州大学独自のシンクロトロン光設備に対する根強い要求があった。平成20年度国立大学法人施設整備費補助金(大型特別機械整備費)により「高輝度放射光利用実験装置」として九州シンクロトロン光研究センター内に九州大学ビームライン建設することが予算承認された。さらに学内のスタートアップ経費の援助を得て、2008年度内に九州大学ビームラインと物質のナノ構造解析装置としてのX線吸収微細構造測定システム(XAFS)、メソ構造解析装置としての小角X線散乱測定システム(SAXS)を設置した。以下にその設計指針および建設経過を報告する。

2. 設計

九州大学内には、多数の研究者が多様な手法を用いてシンクロトロン光実験を行っている。そのような多様性を考慮し、エンドステーションである実験ハッチ内には、2つの異なる実験架台が設置可能なスペー

スを確保した。本ビームラインで行う実験手法については、現状で最も多くの学内利用者が想定されるX線吸収分光(XAFS)法、および小角X線散乱(SAXS)法を採用した。

ビームライン設置にあたり、建設を主体的に行うメンバーを学内教職員より6名選出した。2008年春よりこのメンバーで協議を開始し、具体的なビームラインレイアウトおよび各装置の仕様詳細を決定した。

ビームラインでは、蓄積リング偏向電磁石からの光を利用し、Si(111)平板結晶を用いた二結晶分光器により、2.1 ~ 23 keVのエネルギー範囲での実験が可能である。これにより、XAFSでは、*K*吸収端P~Ru、*L*吸収端Zr~の測定が可能となる。

実験装置2機に対して最適なビームを導入するには、実験ハッチ内の前方、後方のどちらでも十分なビーム強度が得られ、適切な集光角となる必要がある。そのためにビーム集光位置の異なる集光ミラーを輸送部に2基設置した。ビームライン輸送部の光学系レイアウトを図1に示す。ミラー集光点は、SAXS法での利用を目的とした場合の後方の検出器位置、XAFS法での利用を目的とした場合の試料位置に設計した。集光ミラーには、擬似トロイダル型を採用し、縦横集光が可能である。また、2つのミラーのコーティングをPt、Rhと異なる素材にして使い分けることで、XAFSの測定エネルギーにミラー材の吸収端が影響することを回避できるようにした。

ビーム強度についてのレイトレースによる検討か

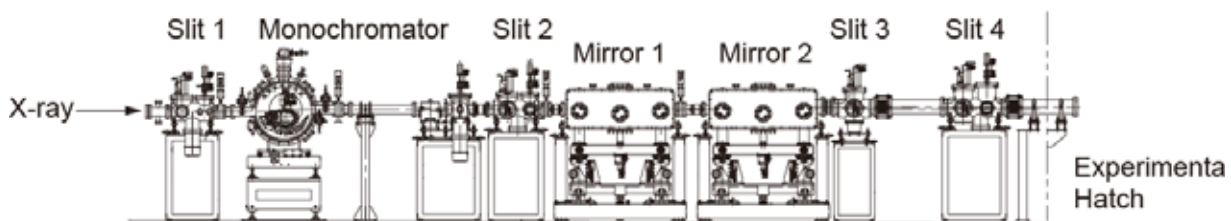


図1 ビームライン輸送部(光学系)配置

ら、集光ミラーを利用しない場合には 1×10^9 台であったものが、集光ミラーを利用した場合には、 1×10^{10} 台の Photon Flux が得られると推定される。

3. 建設

現地工事では、2008年10～11月のシャットダウン期間中に蓄積リングからX線を取り出す基幹部の設置を行った。その後、2009年1月～3月に光学機器などの輸送部および実験ハッチを設置した。放射線防護のための遮蔽体、インターロック機構も装備し、2009年3月に当初の計画通り完成した。ビームラインの概観を図2の写真に示す。写真右手の蓄積リングよりX線を取り出し、写真中心付近の実験ハッチまでビームを輸送する。



図2 九州大学ビームラインの概観

ビームラインの建設と平行して2009年3月に、実験ハッチ内のエンドステーションにXAFS実験装置、およびSAXS実験装置を設置した。図3にXAFS装置の写真を示す。写真中央上方の実験ハッチ側壁の出射ポートより下方へX線が進行する。

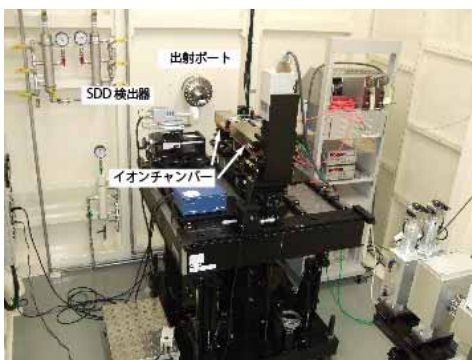


図3 XAFS 実験架台

XAFS実験では、イオンチャンバーによる透過法、ライトル検出器およびSiドリフト (SDD) 検出器による

蛍光法の測定を行うことが可能である。また、薄膜等の試料にも対応した位置決め自動ステージを設置している。

図4にSAXS装置の写真を示す。SAXS実験では、カメラ長を0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 mから選択して利用する事が可能である。また、薄膜形状に対応したh試料自動ステージを設置している。検出器にはイメージングプレートを用いている。



図4 SAXS 実験架台

4. 今後の展望

2009年度初頭にビームラインにX線を導入し、コミッショニングを開始する予定である。さらにその後、ハッチ内測定機器の調整を行う予定である。その後は、標準試料の測定などによる評価を行い、ユーザー利用に供する予定である。

また、ビームライン運用、研究面では、その中心となる九州大学シンクロトロン光利用研究センターを設立し、学内ユーザーの利用、研究体制を整える予定である。

5. まとめ

九州大学が設置した専用ビームラインBL-06の建設概要を示した。設置は、当初の計画通り進み2009年3月に完成した。今後は、ビーム調整および実験機器調整を経て、エンドステーションでの実験を開始する予定である。

九州大学 ビームライン建設グループ
吉岡 聡、石岡寿雄

(2) クリーン実験ステーションの設置

1. 研究施設の設置及び運用の目的

九州大学「クリーン実験ステーション」は、平成20年度文部科学省施設整備予算の支援により、佐賀県シンクロトロン光研究施設（以下SAGA-LSと略記）内に、九州大学「硬X線ビームライン」とともに設置された。SAGA-LSは九州初のシンクロトロン光施設として佐賀県が設置し、佐賀県立九州シンクロトロン光研究センターにより運営・管理されており、産学官共同研究を推進することを重点目標として活動している。九州大学「硬X線ビームライン」と「クリーン実験ステーション」はシンクロトロン光を活用して、国家科学技術戦略に直結するバイオ、ナノ、環境分野において世界をリードする先端技術を切り開く上で必要不可欠な施設で、九州大学学術研究推進部学術研究推進課が一元的に管理・運営を行っているが、運用に関しては、学術的な利用を中心とする全国共同利用化を将来構想としている「硬X線ビームライン」と、産学連携プロジェクトの推進を目的とする「クリーン実験ステーション」は、連携はしつつも、それぞれ別個に行うことにしている。特に、「クリーン実験ステーション」は先端「ものづくり」を通じて地域に貢献することを主たる目標として運用する。

2. 研究施設の先端性と特色

「クリーン実験ステーション」は、ナノレベルで「ものづくり」を行うための設備で以下の機器を含んでいる。

1. クラス1000 クリーンルーム
 2. 化学処理用ドラフトチャンバー
 3. 超薄膜形成装置
 4. 走査型プローブ顕微鏡
 5. Agilent Scanning Microwave Microscope
 6. 超高精度電子ビーム描画装置
- これらのうち、1－4は先端ものづくりのための基

本的な汎用設備として利用されるが、5は最新鋭の測定器で、国内では、現時点で、九州大学のみが所有している設備である。また、6は2009年度に九州大学「稲盛フロンティア研究センター」内に設置予定のもので、最小線幅8ナノメートルのナノスケール描画が可能な最高水準の性能を有する設備である。

本施設の最大の特長は、ナノレベルで「ものづくり」を行うための設備がSAGA-LS内に設置されていることにある。これにより、ナノレベルで物質を解析できるシンクロトロン光の利用とナノレベルでの「ものづくり」が同じフロアで行えることになり、連携により極めて能率的な先端「ものづくり」が可能となる。日本には7つの公的なシンクロトロン光施設が存在するが、このような特徴をもつ施設は他に存在しない。

3. 中核となる研究プロジェクト

九州大学は、高分子材料科学の世界拠点形成のための文部科学省COEプログラム事業：九州大学21世紀COEプログラム「分子情報科学の機能イノベーション」（代表者：九州大学大学院工学研究院新海教授）および九州大学グローバルCOEプログラム「未来分子システム科学」（代表者：君塚九州大学大学院工学研究院教授）を推進してきており、これまでに数々の成果をあげてきている。本研究施設は、これらの事業により得られている最先端の研究成果を「ものづくり」や「産学連携」に活かして行くことに主として利用される。具体的な研究テーマの例として、以下を実施予定である。

1. 新規DNAシーケンシングデバイスの作製と事業化
2. 基板上に配列させたDNAによるナノスケール集積電子回路の作製
3. 単層カーボンナノチューブの配向と組織化によるスピントロニクスデバイス等の作製

4. 地域産業界におけるニーズ

九州はシリコンアイランドと呼ばれるほどにシリコン産業を中心とする多くの半導体関連企業が集積している。この特徴に、九州大学の強みである有機高分子材料の研究ポテンシャル（九州大学グローバルCOE事業）を組み合わせ、有機-無機材料の融合による新素材開発に関する産学連携を、今後、活性化して行く予定である。この様な産学連携を活発に進めるために、九州大学、佐賀大学、企業からのメンバーにより「クリーン実験ステーション」アライアンスコア(下図)を組織しており、このメンバーを核にして産学連携プロジェクトを遂行しつつ、平成25年度に「九州先端ものづくりセンター(仮称)」の構築を目指している。さらに、北部九州に研究開発拠点を置く代表的な企業：新日鐵化学株式会社機

能材料研究所(有機材料)、株式会社SUMCO 技術開発部(半導体材料)、日本タングステン株式会社開発技術センター(金属材料)からも賛同メンバーとしてアライアンスコアに参加して頂いている。

5. おわりに

九州大学「クリーン実験ステーション」は、2009年度より事業開始予定である。

今後、本施設が産学共同研究や地域産業界からの積極的な利用に供されることを期待している。

九州大学大学院工学研究院材料工学部門
本岡 輝昭

