

解説

極紫外・軟 X 線放射光源計画

極紫外・軟 X 線放射光源計画検討会議世話人会

佐藤 繁¹, 福山秀敏², 木村嘉孝³¹東北大学大学院理学研究科, ²東京大学物性研究所,
³高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所

New Synchrotron Radiation Facility Project

Panel on New Synchrotron Radiation Facility Project

Shigeru SATO (Vice-Chair)¹, Hidetoshi FUKUYAMA (Vice-Chair)² and Yoshitaka KIMURA (Chair)³¹Graduate School of Science, Tohoku University²Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo³Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

The project for constructing a new synchrotron radiation facility dedicated to the science in VUV (or EUV) and Soft X-ray (SX) region has been discussed for these two years at the Panel on New Synchrotron Radiation Facility Project. The Panel together with the Accelerator Design Working Group (WG), Beamline Design WG and Research Program WG suggested to the Ministry of Education, Science, Culture and Sports the construction of a 1.8 GeV electron storage ring suitable for "Top-Up" operation and beamlines and monochromators designed for undulator radiation. The scientific programs proposed by nationwide scientists are summarized with their requirements of the characteristics of the beam.

1. はじめに

今日, 世界各地で第3世代の光源加速器を持つ放射光施設が建設され, 赤外線から極紫外・軟 X 線, 硬 X 線にいたる広いエネルギー範囲の高輝度放射光が基礎科学, 応用技術, 産業利用などの広範な分野に利用されてその発展を支えている。光源加速器から得られる硬 X 線は物質の構造を調べることに利用され, フラウレンなどの新物質や蛋白質の構造解析に威力を発揮している。国内では1997年に高輝度放射光施設 SPring-8 が完成し, 硬 X 線領域の高輝度放射光を実現して, 物質の構造解析を中心とする分野で多くの優れた成果をあげている。一方, 極紫外から軟 X 線にいたるエネルギー領域の放射光は, 超伝導の起源や生体物質の情報伝達機構など, 物質の機能発現を原子・分子レベルで解明するためのツールとして重要な役目を果たしており, 未来の学術や産業の創成に繋がる重要な研究領域の開拓にも大きく貢献すると期待されている。しかし, 物質の性質を調べるのに最適な極紫外・軟 X 線領域の第3世代放射光源は, 長期にわたる検討にもかかわらず国内ではまだ実現していない。この状況を打開するために, 平成13年5月から極紫外・軟 X 線放射光源計画検討会議(議長: 木村嘉孝・物構研)(以下, 検討会議)のもとで, 第3世代の光源加速器を備えた共同利用施設計画を策定する作業がスタートし, 本学会の将来計画特別委員

会からのサポートも得て, 極紫外・軟 X 線領域の高輝度光源が実現にむけて動き出すことになった。

検討会議では, 放射光科学研究者の代表による世界の放射光施設の現状分析と光源加速器のレビューに基づいて, これから建設すべき高輝度光源の仕様と設置形態などが約1年間にわたって議論され, 平成14年5月, 検討会議は極紫外・軟 X 線放射光源計画の最終案を取りまとめて文部科学省にその早期実現を提案した。その後, 全国のエキスパートで構成した加速器仕様策定ワーキンググループ(WG)(世話人: 熊谷教孝・SPring-8), ビームライン仕様策定 WG(柳下明・物構研)および利用計画 WG(谷口雅樹・広大)によって, 光源加速器, アンジュレータ・ビームラインと分光系の概念設計が策定され, 高輝度放射光の利用計画がまとめられた。WGの検討結果は昨年9月に「極紫外・軟 X 線放射光源計画 デザインレポート」(編集担当: 柿崎明人・東大)として本学会から出版されている。また, それぞれの WG では, 実現に向けた広範な検討と詳細な設計を進める作業が続いている。

以下では, 極紫外・軟 X 線高輝度光源計画の概要について紹介する。本稿には, デザインレポート後の WG の検討結果も含まれる。

* 本稿への問合せは下記へお願いします

柿崎明人 東京大学物性研究所 〒277-8581 千葉県柏市柏の葉5-1-5

TEL: 04-7136-3400 FAX: 04-7134-6083 E-mail: kakizaki@issp.u-tokyo.ac.jp

2. 加速器の構成と基本性能

加速器システムは、エネルギー1.8 GeVの蓄積リングとこれに電子を供給する入射器系で構成される。蓄積リングは周長280.55 mの2回対称のレーストラック型で、電子ビームのエミッタンスは1.8 GeVで8 nmrad、1 GeVで2 nmrad（エミッタンスは直線部の運動量分散関数を少し工夫することで半分程度まで下げることが可能）程度である。その基本パラメータをTable 1に示す。蓄積ビームの寿命は、1.8 GeVの標準運転モードで蓄積電流400 mA、カップリング3%としてリングに一樣に電子を蓄積しタウシエック効果が最も緩やかな場合でも8時間程度と短い。そのため、積分輝度を改善するために利用開始時から、IDのギャップによらず常時入射が可能なトップアップ運転を導入することを想定している。トップアップ運転は、積分輝度の改善だけでなく、放射光パワーの一定化によりビーム診断系をはじめとする加速器構成機器、およびビームライン光学素子が受けるビーム強度の変動による影響を大幅に軽減させ、より安定なビーム軌道の制御とビームラインへ高品質な放射光を供給することを可能にする。

Fig. 1に加速器系の全体図を示した。

蓄積リングの磁石配列は、チャスマン・グリーン型で、6.2 mの直線部を持つノーマルセル12セルと、17 mの長直線部を持つ長直線セル2セルで構成される。このうちhigh β sectionの直線部に入射機器が、low β sectionに400 mAのビーム電流を安定に蓄積するために3台のHOM ダンプドキャビティーが設置され、残り12カ所の直

Table 1 Characteristic Parameters of Storage Ring

Energy	1.8 GeV (max. 2 GeV)
No. of Cell	14
Straight Section	6.2 m \times 12, 17.0 m \times 2
Magnet Lattice	Chasman-Green type
Circumference	280.55 m
Natural Emittance	8 nmrad (@1.8 GeV), 6 nmrad (@1.6 GeV), 2 nmrad (1.0 GeV)
Energy Spread	0.07% (@1.8 GeV), 0.06% (@1.6 GeV), 0.04% (1.0 GeV)
Momentum Compaction (α)	10^{-3}
Tune	14.12 (hor.), 5.18 (vert.)
Chromaticity	-39.8 (hor.), -15.5 (vert.)
x-y Coupling Ratio	0.01
Beam Current	400 mA
Magnetic Field	1.12 T (radius 5.34 m)
Critical Photon Energy	2.42 keV
Energy Loss per Turn	174 keV
Radiation Damping Time	19.3 msec (hor.), 19.4 msec (ver.), 9.7 msec (long.)
Revolution Frequency	1.068 MHz
RF Frequency	500.1 MHz
Harmonic Number	468
RF Voltage	1.4 MV
RF Bucket Height	2.9%
Bunch Length	3.94 mm
Beam Life Time	ca. 8 hours (@1.8 GeV), ca. 1 hour (@1 GeV)

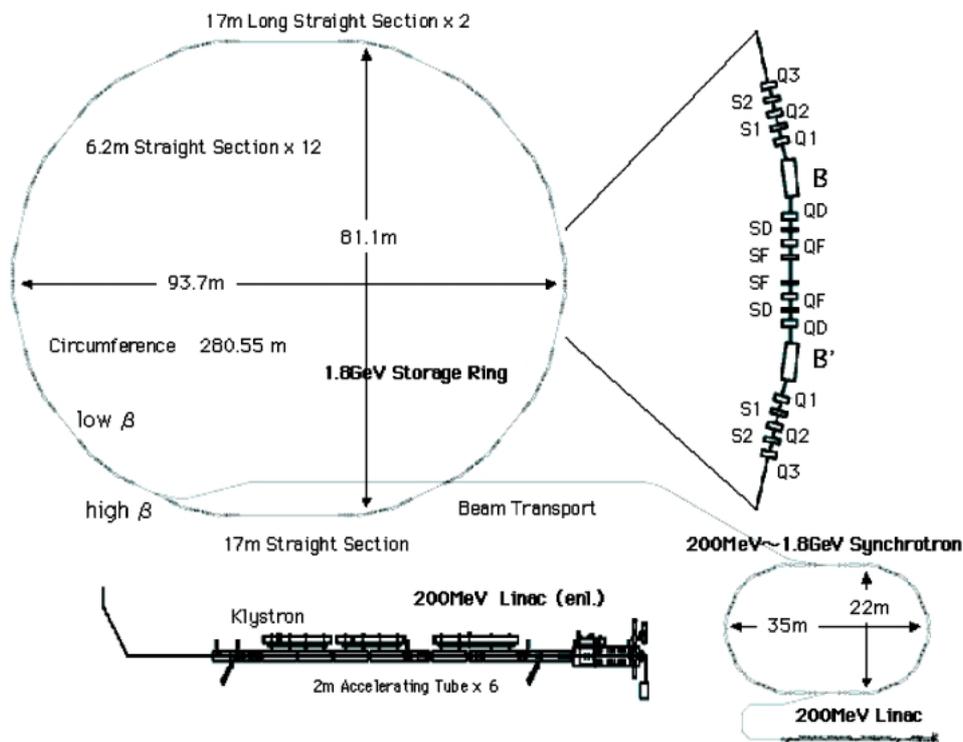


Figure 1. Accelerator system of the New Synchrotron Radiation Facility Project.

線部に挿入光源が設置される。軌道の安定化等のビームの性能の高機能高精度化の要求に対して柔軟に対応できるように、電磁石（偏向電磁石、四極電磁石、六極電磁石）間に20 cm 程度の空間を確保している。また、直線部の長さは、

1. 入射機器と加速空洞
2. 通常セルで 10^{18} から 10^{19} レベルの輝度を実現する4.5 m 長の挿入型光源
3. 長直線セルでは1.8 GeV の標準モードで 10^{20} レベルを越える輝度、あるいは1 GeV の低エネルギー運転時に、100 eV の放射光エネルギー領域で300程度のエネルギー分解能 ($E/\Delta E$) を実現する15 m 長程度の挿入光源
4. 挿入光源 (ID) の多種多様な運転に対して、ID の独立チューニング（軌道およびエミッタンスのIDギャップ幅依存性が無いこと）を実現する各種補正電磁石や診断系

等が設置できるように決めている。長直線セルの導入は、レーザーと電子ビームの相互作用を利用した極短パルス光の生成、ポンプ・プローブ法の利用、FEL 光の発生など、新しい放射光の生成と利用技術と将来の発展性を確保することにもなる。Fig. 2 に光源加速器で得られる放射光スペクトル（エネルギー1.8 GeV、ビーム電流400 mA）を示す。図中の U100 と U60L などは、それぞれ6 m 直線部と17 m 直線部にそれぞれ周期長100 mm と60 mm のアンジュレータを入れた時に予想されるスペクトルである。

蓄積リングのトップアップ運転を想定しているため、入射器系には200 MeV 線型加速器と1.8 GeV シンクロトロンで構成した全エネルギー入射システムを採用し、安定か

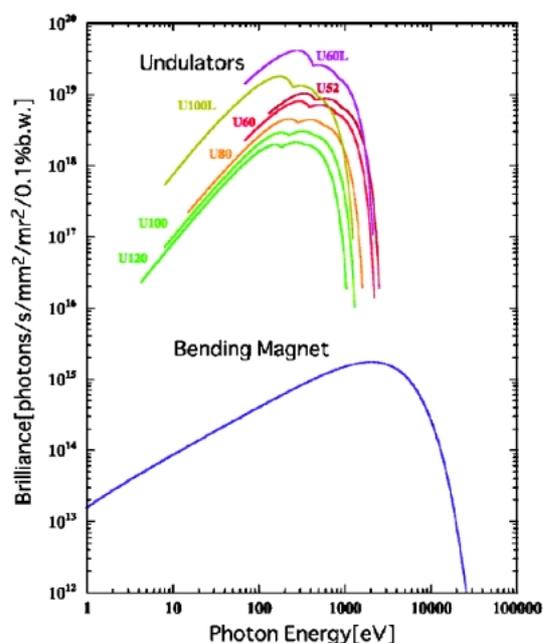


Figure 2. Brilliance of undulators and bending magnet radiation.

つ高品質なビームを蓄積リングに供給できるようにしている。線形加速器とシンクロトロンの基本パラメータを Table 2 に示す。線型加速器は、トップアップ運転時にシンクロトロンへ高安定化されたビームを高い信頼性（使用部品数の低減等）で供給するために、長さ2 m の加速管6本と50 MW クライストロン2本（SLED 1台）で構成される。一方、シンクロトロンはトップアップ運転時に挿入光源のギャップを閉めた状態ではほぼ100%の入射効率を実現できるように設計されており、周長93 m、8セルの変形 FODO 型磁石配列で構成され、エミッタンスとして50 nrad、エネルギー拡がり0.1%程度を実現する。

ビームラインは、各セルの直線部のアンジュレータから12本、偏向電磁石からは上流側および下流側からそれぞれ1本、合計28本取り出すことが可能である。Fig. 3 にビームラインの配置案を示す。基幹チャンネルとビームラインの構成要素と配置、種々の挿入光源からの熱負荷の除去、トップアップ運転時の効率的な放射線遮蔽など、SPRING-8 や PF で得られたノウハウを生かした設計作業がビームライン仕様策定 WG での検討作業と共同歩調をとりながら進められている。

低エミッタンス高輝度リングでは電子ビームと放射光の性能は、加速器およびビームライン構成機器の性能、そして地盤や建て屋構造および冷却水、空調等の付帯設備の性能で決まる。特に軌道安定化に対しては後者の寄与が大きく、建物の設計段階で十分考慮し対策を施しておくことが

Table 2 Parameters of Injection System

- (1) Linear Accelerator
Elements: Electron Gun, Sub-harmonic Buncher, Pre-buncher, Buncher Accelerating Tube (2m×6)

Energy	ca. 200 MeV
Beam Current	1 A@1 nsec/single bunch 400 mA@30 nsec/semi-long pulse
Emittance (90%)	130 nrad (@200 MeV)
RF Frequency	2856 MHz
Repetition Frequency	50 Hz (max.)
Length	ca. 25 m

- (2) Booster Synchrotron

Energy	200~1.8 GeV
Magnet Lattice	modified FODOtype (FMC lattice), 8 cell
No. of Q Family	6
Circumference	93.516 m
Emittance	ca. 55 nrad
Energy Spread	0.07% (@1.8 GeV)
Beam Current	ca. 10 mA (storage ring equiv. ca. 3 mA)
Repetition Frequency	0.5-1 Hz
RF Frequency	500.1 MHz
RF Voltage	0.5 MV
Radiation Loss	193.5 keV/turn
Injection Time (@500 mA)	ca. 150 sec

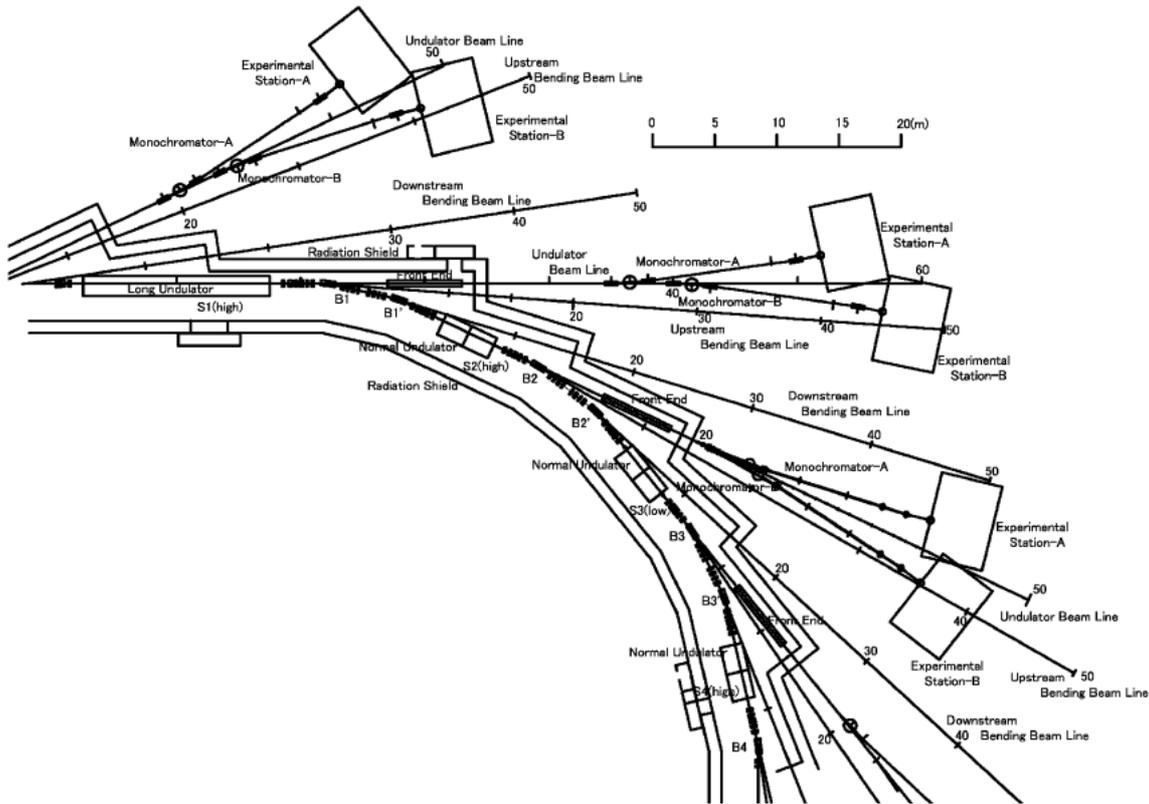


Figure 3. Layout of the beamlines (tentative).

重要である。現在、WGのメンバーを核として世界最高性能の極紫外・軟X線光源の加速器建設を目指した詳細設計が進められている。

3. アンジュレータ・ビームラインの仕様と性能

光源加速器には、挿入光源用の直線部が12本あり、利用目的に応じたエネルギー領域や偏光特性をもつアンジュレータを多数設置することができる。また、超高輝度放射光、コヒーレンス、高速偏光スイッチング、マイクロビームなど、アンジュレータ放射の特徴を最大限生かした利用も可能となる。いずれの場合も、アンジュレータ・ビームラインの分光光学系の設計にあたっては、加速器仕様策定WGが策定した光源の仕様を基本にして、挿入光源や光学素子の最近の進歩、利用研究の動向を十分考慮にいった検討が重要である。

ビームライン仕様策定WGでは、高輝度光源の特徴を生かし最先端の放射光技術・光学素子を利用して、

1. 入射スリット無しで、ハイ・スループットにすること
2. 一枚の回折格子が広いエネルギー範囲をカバーすること
3. エネルギー分解能10000で光子数 10^{12} 個/秒を標準とすること
4. サンプル上でのスポット・サイズは $50\ \mu\text{m}$ 以下にす

ること

を目標に9種のアンジュレータ・ビームラインと分光光学系が設計・検討された。その結果、上の1から4の条件を満足し、数 $10\sim 1000\ \text{eV}$ のエネルギー領域をカバーする斜入射分光光学系として、3種類の平面回折格子(PG)を用いた偏角可変型分光器を検討・考案した。そのほか、 $40\ \text{eV}$ 以下の低エネルギー領域で100,000の超高エネルギー分解能を目指す不等刻線間隔球面回折格子(VLS-SG)を用いた10 m Off-Plane-Eagle 直入射分光器についても検討を重ねた。Table 3にWGでとりあげた分光光学系のうちのいくつかをあげる。また、Fig. 4とFig. 5に、収束光を不等刻線間隔平面回折格子(VLS-PG)に照射する新たに考案された斜入射分光器(雨宮健太・東大)と、早くから検討が進められてきている10 m Off-Plane-Eagle 直入射分光器(溝川貴司・東大)を示す。分光性能の定量的な評価には、光学素子の表面荒さやアライメントの不完全性などを考慮した。また各種のアンジュレータの仕様が具体的に決定されていないため、一部を除いて標準的な4.5 m長の直線偏光アンジュレータ光源の仕様を前提にしたものであるが、設計・検討された分光光学系はいずれも目標値を上回る優れた性能をもっている。

ビームライン仕様策定WGでは、分光光学系の高性能を維持しメンテナンスを容易にすることも考慮して、上の設計目標を達成する標準的なビームラインとともに、利用

Table 3 Monochromators discussed and designed by the Beamline Design WG

Monochromator	Type	Energy range (eV)	Resolution ($E/\Delta E$)	Photon flux (photons/s)	Spot size ($\mu\text{m}(h) \times \mu\text{m}(v)$)
Normal incidence monochromator (Fig. 4)	10 m Off-Plane-Eagle	10~40	100,000以上	10^{12} 以上	25×35
Grazing incidence monochromator (Fig. 5)	VLS-PGM	50~1000	10,000以上	10^{12} 以上	20×30
Ultra-high photon flux grazing incidence monochromator (Fig. 6)	VLS-PGM	70~1000	6,000以上	10^{13} 以上	6.3×3.4

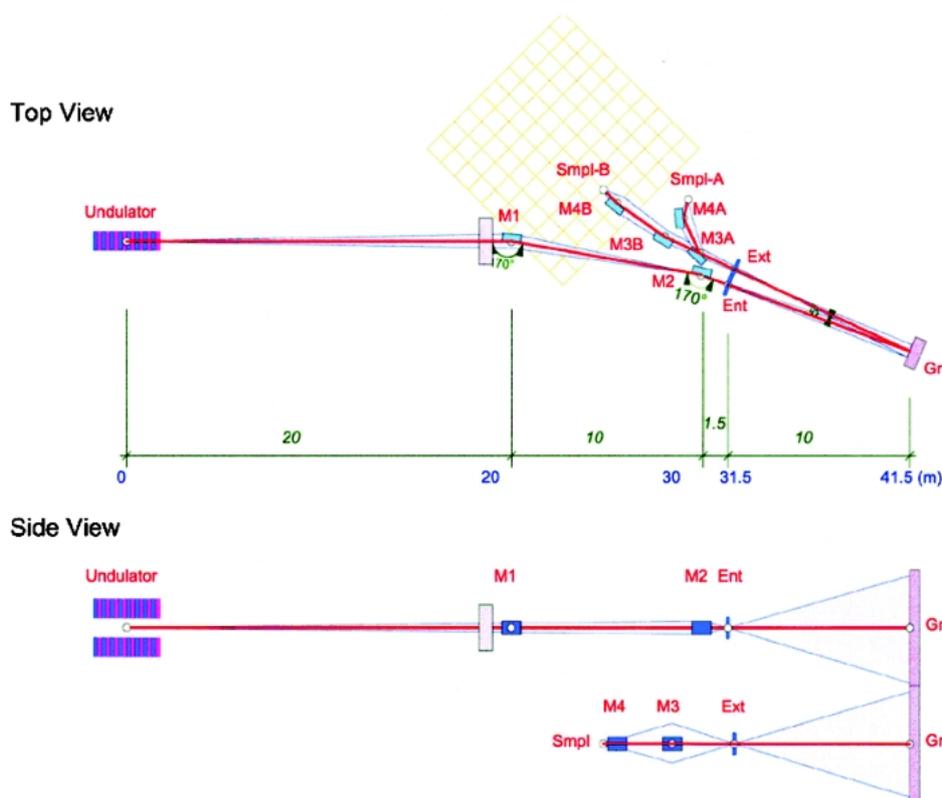


Figure 4. Optical layout of the 10 m Off-Plane-Eagle type monochromator.

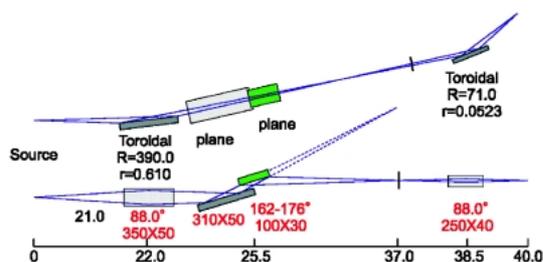


Figure 5. Optical layout of the varied line spacing plane grating monochromator.

目的に特化したビームラインのための光学系のバリエーションについても検討している。Fig. 6はその一例（齋藤・原研，江島・東北大）で，後置鏡として楕円鏡を K-B 配置して小さなスポット・サイズを得ることをねらった光学系である。長尺アンジュレータに設置された場合の性

能を Table 3 に示した。

基幹チャンネルとビームラインの配置，放射線遮蔽や実験ホールのさまざまなユーティリティの問題など，光源加速器および建物の設計と密接に関連する事柄については，加速器仕様策定 WG と共同で検討作業が進められており，ここでも既存の放射光施設で得られたノウハウを取り入れ議論されている。

4. 放射光利用計画

Table 4 は，検討会議が集計したアンジュレータ放射を利用する研究計画を，利用計画 WG が研究内容に応じて「ナノ・材料科学」，「生命科学」，「物性科学」，「基礎光科学」の4つの研究分野に分類し，各研究課題が必要とする放射光の性能と一緒にまとめたものである。Table 5 には，長尺アンジュレータから高輝度放射光利用について関連する研究課題をまとめた。放射光科学研究においては，

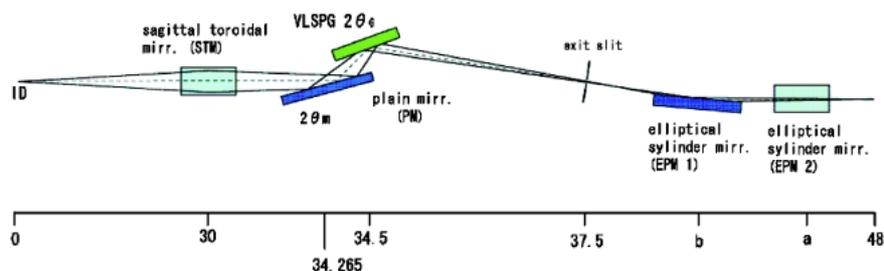


Figure 6. Sdhematics of the optical layout to obtain a small optical image.

Table 4 List of required perfomance to beamlines

Field of Study	Subject of Study	Energy Range	Resolution (E/ΔE)	Photon Flux at Sample Position (photons/sec)	Spot Size at Sample Position	Polarization
Nano-Material Science	1. Photoelectron spectroscopy of quantum nano-materials	20~1,000 eV	100,000	10 ¹³	< 10 μm	variable
	2. Photoelectron microscopy of magnetic nano-materials	20~1,000 eV	7,000	10 ¹⁴	10 μm	variable
	3. Real-time photoelectron spectroscopy	50~1,000 eV	10,000	10 ¹²	1 μm~1 mm	v
Life Science	4. Rariation biology	10~1,000 eV	1,000~5,000	10 ¹²	10 μm	variable
	5. Soft X-ray imaging of biol. materials	100~2,000 eV	10,000	10 ¹³ ~10 ¹⁶	< 100 μm	linear
Condensed Matter Science	6. Ultra-high resolution photoelectron spectroscopy	15~40 eV	40,000	10 ¹²	20 μm × 300 μm	variable
	7. Bulk-sensitive Fermiology	8~1,500 eV	20,000<	10 ¹² <	< 10 μm	variable
	8. Soft X-ray emission spectroscopy of complex materials	50~1,000 eV	10,000	10 ¹³ ~10 ¹⁴	1 μm	variable
	9. Spin-resolved photoelectron spectroscopy	10~400 eV	10,000	10 ¹² ~10 ¹⁴	10 μm	variable
	10. Soft X-ray magnetic/chiral dichroism spectroscopy	50~1,600 eV	10,000	10 ¹³	10~20 μm	variable*
	11. Two dimensional photoelectron spectroscopy of surfaces and interfaces	10~1,000 eV	10,000	10 ¹³ ~10 ¹⁴	1~10 μm	variable
	12. Dynamics of surface reaction and surface magnetism	100~1,000 eV	10,000	10 ¹³ ~10 ¹⁴	10 μm	variable
	13. Electronic structures of organic materials	20~1,000 eV	10,000	10 ¹³	10 μm	variable
14. Time-reslved pectroscopy and non-linear spectroscopy	100~1,000 eV	1,000~2,000	10 ¹⁶	1 μm 以下	linear	
Fundamental Optical Science	15. VUV/Soft Xray spectroscopy of atoms, molecules and clusters	30~1,000 eV	100,000(max.) 10,000(av.)	10 ¹⁰ 10 ¹²	10 μm	variable
	16. Reaction dynamics of photoexcited molecules	30~300 eV	60,000~20,000	10 ¹²	100 μm	variable
	17. Two-photon spectroscopy with laser	10~40 eV	70,000~20,000	10 ¹⁴	100 μm	variable

Table 5 Subjects of study (please refer number for subjects in Table 4) utilizing long undulators with required perfomance to the beamlines

	Related Subjects of Study	Energy Range	Resolution (E/ΔE)	Photon Flux at Sample Position (photons/sec)	Spot Size at Sample Position	Polarization
High-flux and coherence	1, 2, 3, 5, 9, 11, 12, 14	50~900 eV	1,000~10,000	10 ¹² ~10 ¹⁶	< 10 μm	linear
High quality polariztion switching	2, 9, 10	50~1,600 eV	10,000	10 ¹³	< 10 μm	variable

ナノ・材料科学 (ナノ構造物質の創成, 特性評価, 新機能解明, 強相関物質テクノロジー), 生命科学 (染色体構造, 分子モーター観察, 細胞組織の放射線応答), 物性科学 (磁性, 表面・界面, 触媒, 高分子・ソフトマテリアル), 基礎光科学 (原子・分子, 環境) などの諸分野を中心に, マイクロビーム, コヒーレンス, 高フラックスなど, 極紫外・軟 X 線高輝度放射光の特長を最大限活用した先端研究の急展開が予想される。Table 4 のそれぞれの研究課題は, WG によって学術的意義や将来の発展性, 諸外国の

研究施設を視野に入れた場合の国際競争力, 計画の実施可能性などが検討され, すべてにわたって優れた評価を与られている。一方, 表の研究計画の中には今すぐ研究に着手可能なものも多い。その点からも, 極紫外・軟 X 線放射光源計画をできるだけ早く実現することは重要である。

5. これから

極紫外・軟 X 線放射光源計画の実現の見通しは, 多くの方々の熱心な活動にもかかわらずまだ確実なものではな

い。設計の概要がデザインレポートとして取りまとめられたあとも、それぞれのWGではより詳細な検討とR&Dが繰り返されている。電子ビームと放射光の性能を決定づける真空チェンバーと挿入光源の詳細設計、地盤と建屋構造および付帯設備の性能、トップアップ運転時の放射線遮蔽、ビームラインの規格化、実験ホールのユーティリティなど、計画実現にむけて精力的に議論がされている。一つの放射光源計画の策定にこれほど多くの方々が参加し、全国的な視野に立って議論を重ねたことはこれまでなかったと思う。WGで活躍している多くの人々、とくに20代、30代の若手の努力が実を結ぶことを願ってやまない。

おわりに、各WGメンバーとWGの議論に参加していただいている方々を紹介する。

○加速器仕様策定WG

鈴木章二、濱 広幸、渡邊 誠 (以上、東北大)、伊澤正陽、小林正典、小林幸則、原田健太郎、本田 融、山本 樹 (物構研)、柿崎明人、阪井寛志、高木宏之、中村典雄 (東大)、小関 忠 (理研)、加藤政博 (分子研)、大熊春夫、熊谷教孝、高雄 勝、田中 均、中村 剛

(SPring-8)

○ビームライン仕様策定WG

江島丈雄、鈴木章二、波多野忠、柳原美廣 (東北大)、足立純一、伊藤健二、小出常晴、斉藤裕樹、仲武昌史、東 保男、間瀬一彦、柳下 明、山本 樹 (物構研)、雨宮健太、奥田太一、柿崎明人、木下豊彦、中村典雄、藤沢正美、溝川貴司 (東大)、繁政英治 (分子研)、遠藤勝義、佐野泰久 (阪大)、小池雅人、斎藤祐児 (原研)、北村英男、田中隆次 (理研)、大橋治彦、熊谷教孝 (SPring-8)、平谷篤也 (広大)

○利用計画WG

上田 潔、高桑雄二、柳原美廣、渡邊 誠 (東北大)、小出常晴、小林克己、柳下 明 (物構研)、上野信雄 (千葉大)、尾嶋正治、柿崎明人、木下豊彦、辛 埴、末元 徹、藤森 淳 (東大)、伊藤 敦 (東海大)、小杉信博、見附孝一郎、横山利彦 (分子研)、大門 寛 (奈良先端大)、今田 真、菅 滋正 (阪大)、木村昭夫、谷口雅樹 (広大)