

## トピックス

# 東京大学高輝度光源計画 (VSX 計画) —1 GeV 回折限界光源の概要—

神谷 幸秀, 中村 典雄

東京大学物性研究所・軌道放射物性研究施設 (SOR 施設)\*

## High-brilliance Synchrotron Light Source Project of the University of Tokyo, the VSX Project —Overview of 1 GeV Diffraction-limited Source—

Yukihide KAMIYA and Norio NAKAMURA

*Synchrotron Radiation Laboratory, the Institute for Solid State Physics, the University of Tokyo*

The high-brilliance synchrotron light source being planned by the University of Tokyo, the VSX Light Source, can produce unprecedentedly bright synchrotron radiation in the vuv and soft x-ray regions. Indeed, it is a true diffraction-limited source in the vuv region and becomes the brightest vuv source in the world at the beginning of the 21th century. It may then provide the Japanese synchrotron radiation community with competitive scientific opportunities than ever and open up new scientific frontiers almost impossible to predict. Further, it is also a unique project challenging to accelerator science and technology, since the electron emittance is one order of magnitude smaller than that of any other light source. With the ultra-low emittance as well as a low beam energy of 1 GeV, the intra-beam scattering effect is probably most serious among all electron rings.

Even with much effort and intense interest, the project is not funded yet. It is however expected that the project be soon materialized at a new campus of the university, Kashiwa Campus. The VSX Light Source will be constructed and operated by a new center, the Center for High-brilliance Light Source.

Presented in this report are the overview and history of the project, the accelerator R & D, the research plans of synchrotron radiation, and so forth.

### 1. はじめに

現在、東京大学が千葉県柏新キャンパスに建設を予定している高輝度光源は、世界最高性能を有する(図1)、我が国唯一の第3世代真空紫外線・軟X線高輝度放射光施設であり、完成の暁には、全国共同利用施設して国内外からの数多くの研究者の利用が見込まれている<sup>1,2)</sup>。さらに、この施設は、1970年代前半、世界に先駆けて建設された第2世代光源、SOR-RINGの後継機としても位置づけられるものである。なお、このSOR-RINGは、施設の老朽化、原子核研究所の高エネルギー加速器研究機構への転換等の諸事情に鑑みて、1996年度末にその共同利用を停止した。

東京大学の将来計画がここで解説するような案になるま

では、幾多の変遷を経ているが(第2章を参照のこと)、現計画の大きな特徴は、光源がVUV(真空紫外線)領域における回折限界光源(diffraction-limited ring)であり(図2)、ある意味で究極の光源とも言えるものである。また、加速器という観点からは、超低エミッタンスであるサブナノ・エミッタンスをもつリングであり、かつそのビーム・エネルギーが低いことによって、いわゆるIBS(intra-beam scattering: 内部ビーム散乱)効果が顕著になる世界初の電子リングでもある。このようなことから、まさに、加速器科学の限界に挑むチャレンジングな計画であると言っても過言ではないであろう。この計画の特徴及び加速器自体としての特徴を簡条書きすると以下のようになる<sup>3)</sup>。なお、光源の性能等の概要を表1に、施設の

\* 東京大学物性研究所・軌道放射物性研究施設 〒106-8666 港区六本木7-22-1  
TEL 03-3478-2074 FAX 03-3478-2075 e-mail kamiya@issp.u-tokyo.ac.jp

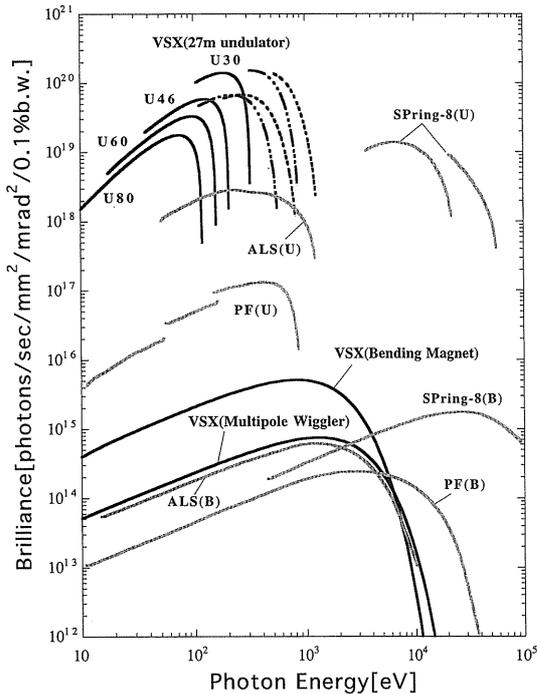


Figure 1. Brilliance versus photon energy. B and U in the parentheses mean that the sources are bending magnets and undulators, respectively.

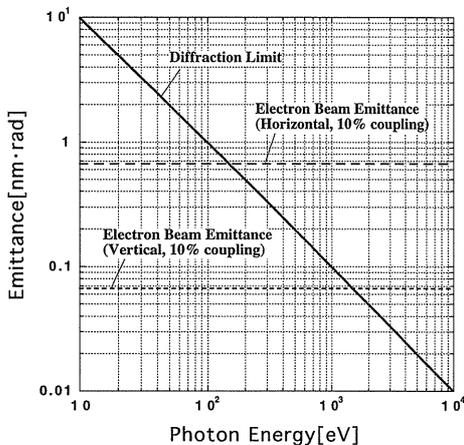


Figure 2. Diffraction limit and electron beam emittances of the VSX ring. When both horizontal and vertical beam emittances of a light source are below the line of diffraction limit in the figure, the source is called a diffraction-limited source. The diffraction limit is determined by the inherent emittance of a photon  $\epsilon_{ph} = \lambda_{ph}/4\pi$ ,  $\lambda_{ph}$  being the wavelength of the photon.

鳥瞰図及び平面概念図を図3, 4に示す。

#### 計画の特徴

##### 世界最高の輝度が供給可能である

アンジュレータの1次光のエネルギー領域 (100 eV~200 eV) において  $10^{19} \sim 10^{20}$  [photons/s/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%b.w.] の輝度が得られる。

表1 光源の性能等

光源の性能	
電子エネルギー	1 GeV
ビーム・エミッタンス	約 1 nm·rad (最小値: 約 0.5 nm·rad)
リング周長	約 230 m
ビーム電流	約 200 mA
挿入光源のタイプ	直線, 円偏光及び可変偏光アンジュレータ マルチポール・ウィグラー (X線用)
利用可能な光子エネルギー	数 eV~約 1 keV まで (アンジュレータ) 数 keV まで (偏向電磁石) 約 10 keV まで (マルチポール・ウィグラー)
長直線部	2×30 m
ビームライン数	2本 (挿入光源用) 約 10本 (偏向電磁石用)
実験ステーション数	約 8基 (アンジュレータ・ビームライン) 1基 (ウィグラー・ビームライン) 約 20基 (偏向電磁石ビームライン)
放射光輝度	最大 $10^{20}$ photons/s/mm <sup>2</sup> /mrad <sup>2</sup> /0.1% b.w. 以上
エネルギー分解能	最大 $10^5$ 以上
入射器	ライナック (エネルギー: 1 GeV, 長さ: 約 100 m)

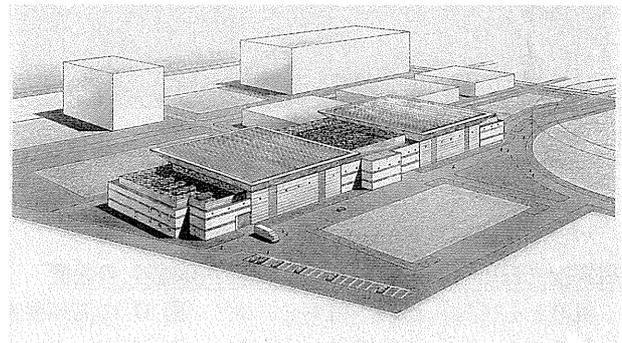


Figure 3. Bird eye's view of the VSX Light Source facility.

#### 最先端の研究成果が期待できる

光物性 (基礎面) や顕微鏡 (応用面) などの幾つかの分野で最先端の研究成果が期待できる。

#### 新しい研究分野が開かれる可能性

世界における既存及び計画中の第3世代光源が有する、輝度最大の波長領域とは異なる領域で、輝度が最大 (世界最高) となる。

#### 加速器科学の限界に挑む

キーワード: 回折限界, IBS [Intra-beam scattering], 超低エミッタンス, ビーム不安定性, 軌道安定性, 超高真空, 加速器コンポーネントの開発 (高周波加速, ビーム制御及び診断, 電磁石, 真空, アンジュレータ等々)

#### ビームライン, 測定器への挑戦

キーワード: 超高分解能 ( $10^5$  以上), ビームライン・コンポーネントの開発 (光学素子, 検出器, 光ビーム・

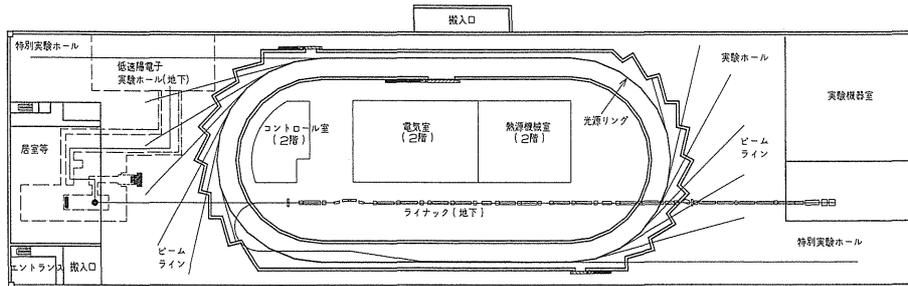


Figure 4. Schematic plan view of the facility.

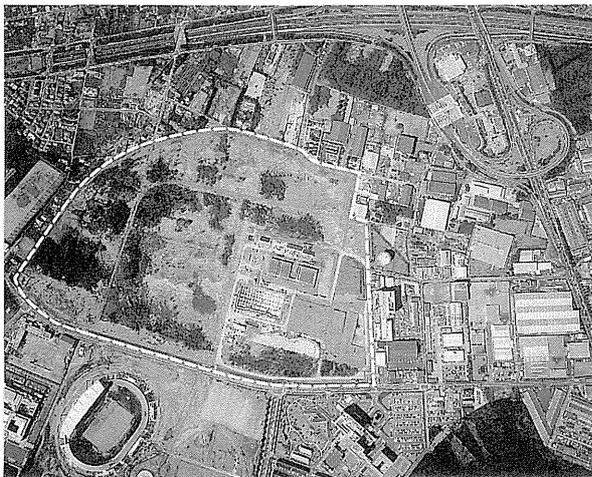


Figure 5. Aerial photograph of the Kashiwa Campus.

ハンドリング等々)

#### 高輝度光源研究センター (全国共同利用施設) の設置

組織としては、当初、柏キャンパス (図5) に高輝度光源研究センターを設置し、将来的には加速器センターの設置を目指す。

#### 加速器の特徴

加速器としての特徴を列挙する以下ようになる (表1を参照のこと。)

#### 世界最小のエミッタンス (図6)

光源リングのアーチ部 (リングの円弧の部分) のラティスに theoretical minimum (理論最小) 型を採用することにより、比較的短い周長でサブ・ナノメートルのエミッタンスを実現する。

#### 顕著な IBS 効果

低エネルギー、低エミッタンスのため、エミッタンス増大に寄与するバンチ内での電子同士の多重散乱効果 (IBS 効果) が顕著になるので、この効果を電子ストレージリングで初めて検証することが可能になる。

#### 30 m の長直線部

ここに30 m級のアンジュレータを設置して、VUV (真空紫外線) 領域で、 $10^{20}$  [photons/(sec $\cdot$ mm $^2$  $\cdot$ mrad $^2$  $\cdot$ 0.1

%b.w.]以上の輝度を達成する。

#### 極小ビームサイズ

偏向電磁石の中心ではビームが水平、垂直方向とも約10ミクロン程度に細く絞られているので、これからの放射光輝度も偏向電磁石を利用したものとしては世界最高となる。

#### 高安定性

高周波加速空洞、BPM (ビーム位置検出器)、軌道フィードバック・システム等のR & D (開発研究)の成果を生かして、(1)低エネルギー・リングにも拘わらず、ビーム不安定性が発生しない、(2)超低エミッタンスにも拘わらず、電子ビームの位置が変動しない、光源リングを実現する。

#### 超高真空

低エネルギーかつ超低エミッタンスであるビームの寿命を確保するために、通常の光源リングより1桁高い真空 (平均真空度:  $10^{-10}$  Torr 以下) を実現する。このため、真空チャンバーにユニークな構造を採用する。

#### 高輝度低速陽電子ビーム

光源リングへの短い入射の時間を除いて、大電流の電子ビームをライナックで加速し、低速陽電子ターゲットに当てることにより、それから発生する世界最高レベルの高輝度低速陽電子ビームを利用研究に提供することが可能となる。

以上のことからわかるように、本計画は、既に稼働を開始している硬X線用のSPring-8とは互いに相補的であり、決して競合するものではない。また、すべての波長領域をカバーする汎用型光源で、第2世代光源の代表的光源とも言えるフォトンファクトリーとも相補的であると言える。

本解説では、第2章で、計画の経緯、進捗状況及び推進体制等について簡単に述べた後、3章で加速器の設計及び開発研究の現状について比較的詳しく述べるつもりである。また、4章でビームライン、利用計画についても簡単に触れるが、著者らは加速器を専門としているので、適当な時期にこれらに関する解説が本誌に掲載されることを期待したい。

Table 2. Principal parameters of the 1 GeV Ring.

ビームエネルギー	1 GeV
周長	230.2 m
エミッタンス	0.73 nm·rad (最小0.56 nm·rad)
ビーム電流	200 mA
ビーム寿命	数時間以上
30 m 長直線部の数	2
ノーマルセルの数	22
挿入光源ビームライン数	2
偏向電磁石ビームライン数	10
光子の臨海エネルギー	967 eV
光源点でのビームサイズ・角度発散*	
30 m 長直線部中心	$\sigma_x=95.9 \mu\text{m}$ , $\sigma_x=6.9 \mu\text{rad}$ $\sigma_y=44.2 \mu\text{m}$ , $\sigma_y=1.5 \mu\text{rad}$
偏向電磁石中心	$\sigma_x=9.7 \mu\text{m}$ , $\sigma_x=68.8 \mu\text{rad}$ $\sigma_x=10.6 \mu\text{m}$ , $\sigma_x=6.3 \mu\text{rad}$

\* カップリング10%假定

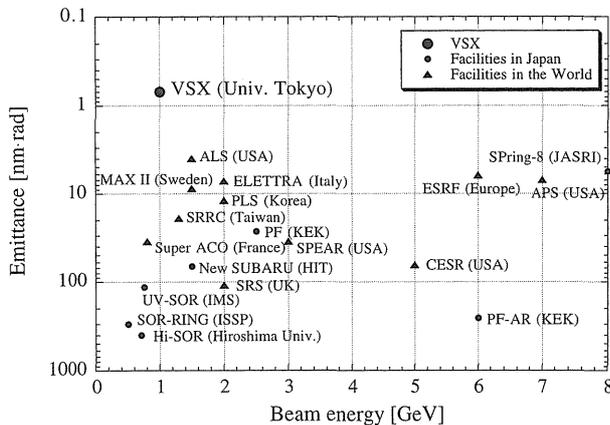


Figure 6. Emittance versus beam energy for typical light sources.

## 2. 計画の経緯、進捗状況等

1974年、INS-SOR 同好会及び原子核研究所関係者を中心とする作業グループによって、世界最初の放射光専用リング、SOR-RING が完成し、翌年、物性研に移管されたが、その後、それほど時間をおくことなく、次期計画についての検討が開始されている。次に、高工研（現 高エネルギー加速器研究機構、以下では KEK と略称）でフォトンファクトリー（KEK-PF）が1982年に完成したこと、物性研単独では計画を実現する用地の確保が困難であること等の事情を勘案して、物性研と KEK との共同で KEK の敷地に VUV 専用光源を建設することが検討された。しかし、KEK の他計画との整合性等の諸事情により、この計画は事実上、暗礁に乗り上げたままとなってしまった。このような状況の下、SOR-RING の諸設備の老朽化による最先端の研究からの遅れを一時的に回避するため、物性研はフォトンファクトリーに1基のアンジュレータと3基の実験ステーションを建設することとなった。現在ま

で、これらを全国ユーザの利用に供するとともに、アンジュレータ放射を利用したスピン偏極光電子分光、高分解能分光、発光分光実験等を行っているが、これら設備も既に10年を経過し、先端的研究を行うことは困難な状況となっている。

一方、1980年代後半になると、政府から物性研への移転要請、東大の新キャンパス取得の動き等があり、将来計画の用地取得が現実味を帯びてきた。また、全国の研究者からの高輝度放射光へ強い要望、その必要性の認識の高まりとともに、物性研計画は我が国を代表する VUV・軟 X 線領域の高輝度光源計画として広く認められるようになってきた。1991年には、日本放射光学会から「高輝度光源に関しては、物性研と高工研の計画を全国の研究者の意向を反映させた1つの計画にまとめて推進すべきである。その際、物性研の計画を中心にして、高工研の協力のもとで現実的に対処することが望ましい」との報告がなされている。このようなことと、KEK では放射光関連だけでも、トリスタン・リングを利用した超高輝度 X 線放射光利用、フォトンファクトリーの高輝度化、AR 放射光高度化と、計画が目白押しというような事情も重なって、その後は、全国的な規模の VUV・軟 X 線領域の高輝度光源計画は主に物性研を中心に推進されてきたと言ってよい。ただし、この計画の設計及び R & D に関しては、KEK、主にフォトンファクトリーの協力のもとに推進されてきたということを強調しておく。

1995年6月、文部省の加速器部会の下に設けられた「放射光科学に関するワーキンググループ」により次のような報告がなされた。

### [今後の整備の基本方針]

VUV・軟 X 線領域の放射光科学の推進にとって最も緊急な課題は、全国共同利用の VUV・軟 X 線用第3世代高輝度光源の建設である。我が国において、VUV・軟 X 線領域の研究が X 線領域の研究と並んで発展し、放射光科学における我が国の国際競争力を確保するために、大学において、全国共同利用の VUV・軟 X 線用第3世代高輝度光源の建設計画を早急に具体化する必要がある。

### [東京大学の計画について]

（東京大学が計画している全国共同利用の極紫外・軟 X 線用第3世代高輝度光源は）、我が国には皆無であり、超高分解能分光学や物質の動的特性の研究等、放射光科学の先端的研究のために必要である。我が国の放射光科学が国際競争の中で重要な役割を果たすためには、この種の高輝度光源が不可欠であり、その計画を（全学的支援の下に）具体化することが強く望まれる。

なお、以上の文章は、報告書からの抜粋であるが、カッコ（ ）内は読みやすいように加筆してある。

この報告書が出されるのとほぼ同時期に、東京大学では、本計画の施設を建設し、これを運営していくためには、全学的支援が必要であるとの認識の下に、1995年7月の評議会において、学内の加速器関連の諸計画及び施設

を柏新キャンパスにおいて統合すべく、「加速器科学研究センター設置に関する懇談会」を設置することを決定し、同懇談会の下に「加速器科学研究センター設置に関する検討小委員会」を設け、センター構想に関する具体的作業を開始した。1996年2月には、懇談会において検討小委員会の報告が承認され、同年3月の評議会において、このセンター構想が承認されるとともに、「高輝度光源施設については、他の施設に先んじて設置されることが期待される」との結論に達している。さらにその後、検討小委員会のもとに「加速器科学研究センターに関するWG」、「放射線安全に関するWG」を設置して検討を進め、1997年3月の評議会において、加速器科学研究センター構想のうち、放射光に関わる部分に相当する高輝度光源研究センターを「先行して設置することは適切である」との懇談会及び検討小委員会の結論が了承された。

一方、1995年7月、物性研に学内及び全国の放射光関係者から構成される「高輝度光源計画推進委員会」が設置された。また、同年には、学内の放射光関係者からなる「放射光科学研究推進懇談会」から計画への全面的な支援を得ている。

さらに、1995年には、高輝度光源計画の推進とその利用を促進するために、全国のユーザ及び加速器関係者からなる「VUV・SX高輝度光源利用者懇談会（略称：VSX利用者懇談会）」<sup>4)</sup>が発足している。また、入射器のライナックを用いた低速陽電子利用を目的とする全国利用者懇談会「低速陽電子ビーム利用者懇談会」も1996年に発足している（図7）。1996年には、「東京大学放射光施設建設協力室」に関する協定が物性研所長とKEK所長との間で交わされている。

このような推進・支援体制のもとに、1997、1998年度の概算要求を行ったにもかかわらず、本計画は認められるに至らなかった。しかしながら、1997年度には、学内的では調査費的経費であると認識されている「次世代放射光科

学のための基礎研究経費」が認められ、次年度以降も継続となっている。

以上のように推進してきた計画は、ビームエネルギー2 GeV、周長約400 m弱、エミッタンス約5 nm・rad、挿入光源が設置可能な長直線部14箇所をもつ光源リングを中核的設備とし、これから発生するVUV・軟X線領域の光の利用を目的とする比較的大規模な高輝度光源計画であった<sup>5)</sup>。その加速器に関する基本設計は、1995年11月に、約350ページの「加速器の概念設計 (Conceptual Design Report)」としてまとめられている<sup>6)</sup>。また、1997年2月に、「ビームライン・分光光学系の概要」<sup>7)</sup>、1997年6月に、「ビームライン利用計画」<sup>8)</sup>が出版されている。

しかしながら、昨今の財政悪化、諸外国の状況、計画実現の遅れ、学内事情等の状況を勘案して、1997年秋頃より、計画の規模見直しについて検討が開始された。新たに策定された1 GeV高輝度光源計画は、ユーザ・コミュニティ、学内の委員会等での検討を経て、1998年3月、評議会において、「財政構造改革などの諸事情から、世界各国の研究状況、国内の整備状況をも考慮し、緊急度の最も高い、真空紫外領域に重点を置いた計画が適切である」との懇談会及び検討小委員会の報告が承認された。

この計画は、それまでの2 GeV計画に比べ、規模は約3分の1に縮小されているが、VUV領域では他の施設を凌駕する世界最高の輝度をもち、1 keV以下の軟X線領域でも世界最高水準の輝度をもつものである。さらに、長年にわたって行われてきたR & Dの成果が計画に十分活かされるような計画ともなっている。逆に、これらのR & Dなくしては、世界最高輝度、世界最小エミッタンスをもつ光源計画を立案することは出来なかったであろう。

1999年度の概算要求は、この1 GeV計画に基づいてなされ、さらには、8月には日本放射光学会長から文部大臣宛に真空紫外・軟X線放射光施設整備に関する要望書が提出されるという力強い支援があったにもかかわらず、依然として計画が認められるには至らなかった。ただし、1998年度の第3次補正予算で、田無のSOR施設の柏キャンパスへの移転費と新実験棟の経費が認められたので、SOR施設は、1999年度中に田無の施設を閉鎖して、柏に移転する予定である。

### 3. 1 GeV 加速器の概要及び R & D

この章では、1 GeV 加速器の概要とこれに関する R & D について紙面の許す範囲で述べることにする。これらについては、既に、1998年8月、「1 GeV 加速器の概要」<sup>3)</sup>として出版されているが、ここでは、その後の R & D の進展も含め、光源リングのラティス設計について比較的詳しく報告することとしよう。

#### 3.1 加速器の構成

加速器は、入射器 (1 GeV ライナック)、ビーム輸送系

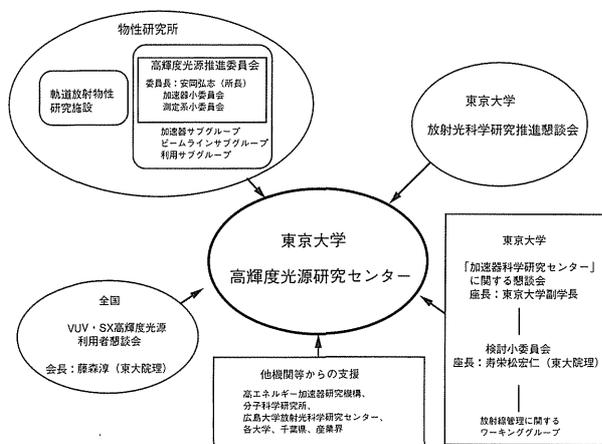


図7 建設支援体制

と1 GeV 光源リングとから構成される。ライナック (全長: 100 m 弱) は光源棟地下に、光源リング (周長: 約 230 m) は地上に設置されるので、ライナックからのエネルギー1 GeV の電子ビームは、ビーム輸送系で向きを180度反転した後、地上に送られ、リングの内側から入射される。

光源リングは、エネルギー1 GeV でエミッタンス約 $0.7 \text{ nm}\cdot\text{rad}$ をもつ超低エミッタンス・リングで、2ヶ所に30 m の長直線部があるレーストラック型をしている。表2に主なリングのパラメータを示す。また、ライナックは、高周波パルスを圧縮して高加速電界を得る SLED 方式を採用しており、パルス巾1ナノ～数十ナノ秒の電子ビームを最大エネルギー1 GeV まで加速することができる。また、低速陽電子利用のために、パルス巾約2マイクロ秒までの電子ビーム (最大ビーム・パワー: 約15 kW) を供給することができる。このため、ビームダンプと「直列に」陽電子発生ターゲットが配置されている。ライナックについては、その主なパラメータを表3に示すのに止め、ここでは詳細は省く。また、建物及びユーティリティについては、フォトンファクトリー等での経験を踏まえ、細心の注意を払って設計を行いつつあり、既に柏キャンパスの地盤振動調査とそのデータ解析等も行われているが、ここではそれについては述べない。

### 3.2 光源リングのラティス及びビームダイナミックス ラティスの基本構造

光源リングのラティス構造は、24個の基本構成単位 (セル) からなる24回対称のリングを、対向する2つの偏向電磁石の中心で二分し、そこに長直線部を挿入したようなレーストラック型を採用しているが、その構造は次のような点を考慮して決定されたものである。(1)可能な限り、建物面積を小さくする、(2)出来るだけ小さなエミッタンスを実現する、(3)光のある波長領域で回折限界光源となるものを目指す、(4)超高輝度光が発生可能なこと、(5)ある程度のビーム寿命が確保できること等である。原理的には、(1)と(2)を満たすためには、ビームエネルギーを低くすればよい。エネルギーを1 GeV 付近に設定することになると、

VUV 領域では(3)も満足される。また、(4)のためにはアンジュレータ用の長直線部を長くすればよいが、(1)の要請からその個数は限られてきて、このことから2つが望ましいということになる (後で述べる非線形効果の「透明化」を考えると(1)の制約がある限り、個数をこれより増やすことが実際上、不可能であることがわかる。) 以上までの点であれば、つまり(5)の点を考慮に入れなければ、どのような (第3世代用の) ラティスを採用しても実現可能なラティスを設計することはできるであろう。

しかし、この(5)を低エミッタンスで、かつ1 GeV と低いビームエネルギーで満足しようとするると忽ち困難にぶつかることになる。低エミッタンス・リングの場合、よく知られているようにビーム寿命は主に2つの要因によって決まっている。一つは、真空チェンバー内の残留ガスとの散乱 (Coulomb 散乱) によるもので、真空度が同じであれば、ビームエネルギーが低いほど、寿命が短くなる (エネルギーの二乗に逆比例する。) もう一つは、いわゆる Touschek 効果と呼ばれる、ビーム内 (パンチ内) での電子同士の衝突による散乱効果であり、エミッタンスが低いほど、エネルギーが低いほど寿命が短くなる。この後者による寿命は、散乱によって電子に大きな運動量のずれが生じ、このため運動量方向 (縦方向) の運動が安定な領域 (RF-bucket height) を越えてしまうことによるものである。通常の大さのエミッタンスをもつリングであれば、高周波加速電圧を上げることによって、この後者の効果は軽減することが可能である。しかし、このような大きなエミッタンスのリングの場合には、一般に (ベータトロン振動について) 大きなダイナミックアパーチャ (電子の運動が安定な領域) をもつので、さして問題にならないのであるが、この散乱には、大きな運動量のずれによって大きな (水平方向の) ベータトロン振動が誘起されるという現象が伴っている。(衝突前後の電子の位置及び傾きの差を無視すると) 運動量のずれによって、ベータトロン振動が、

$$\begin{aligned}\Delta x_{\beta} &= -\eta \Delta p/p, \\ \Delta x'_{\beta} &= -\eta' \Delta p/p,\end{aligned}$$

だけ誘起されることになる。ここで、 $\eta$  は分散関数である。この現象は、(放出される光子のエネルギーが  $\Delta p$  であると考えたと) 丁度、電子が放射光を光子という形で放出した時のベータトロン振動の励起と全く同じ形をしているということがわかる。これから、もし衝突前のベータトロン振動を無視すると (実際上も相対的に小さい)、Touschek 効果によって励起されるベータトロン振動のエミッタンスは、

$$A_{\beta} = (\gamma\eta^2 + 2\alpha\eta\eta' + \beta\eta'^2) (\Delta p/p)^2$$

Table 3. Main parameters of the Linac.

ビームエネルギー	1 GeV 230 MeV (低速陽電子利用)
全長	約100 m
最大繰返し パルス幅	50 Hz 1 ns (ショート)
	10-30 ns (セミロング)
	0.5-2 $\mu\text{s}$ (ロング)
パルス電流	400 mA (ショート)
	400 mA (セミロング)
	300 mA (ロング)

と与えられる。ここで、 $\gamma, \alpha, \beta$ はベータトロン振動の Twiss パラメータである。ただし、垂直方向については、(大抵の場合、設計上の)分散関数はゼロであるので、ベータトロン振動は励起されない。上の結果から、Touschek 効果だけに着目すると、ビーム寿命を確保するのに必要な(RF-bucket height)を与えた時、それに対応する運動量のずれの大きさに比例した広いダイナミック・アパーチャがないならば、寿命は延びないということになる。つまり、ダイナミック・アパーチャが非常に狭い低エミッタンス・リングでは、高周波加速電圧を上げただけでは必要な寿命が確保できないので、(5)を満足しようとする、大きな運動量のずれをもつ電子の振動に対しても十分広いダイナミック・アパーチャがあるようなラティスを採用することが必要となる。

ところが、(少なくとも著者らが知る限り)その理由は今のところ定かではないが、どうも、理論的最小(theoretical minimum)エミッタンス型のラティスは、大きな運動量のずれに対してもダイナミックアパーチャが広いということが、最近、わかってきた。このようなことから、本計画では、リングの円弧部(アーク部)でのラティスの基本セルとして理論最小型を採用し、これにオプティックスのマッティング部と挿入光源用の30 mの長直線部(2カ所)をつけた構造を採用することになった。一般に、エミッタンスは、

$$\varepsilon[\text{nm}\cdot\text{rad}] = F \frac{E^2[\text{GeV}]}{J_x N_B^3},$$

のようにスケーリングされることが知られている。ここで、 $F$ はラティス構造に依存する因子、 $E$ はビームエネルギー、 $N_B$ は偏向電磁石の数、 $J_x$ はdamping partition numberである。理論最小型のラティスで、エミッタンスがその最小値をとる場合、 $F$ は $7.84 \times 10^3$ である。

これは、偏向電磁石の数が同じ場合と比較すると、高輝度光源でよく用いられるラティス、DBA (Double Bend Achromat)の場合より1/3ほど小さい。本計画では、偏向電磁石の数を24としているので、エミッタンスの最小値は1 GeVで約0.6 nm·rad弱となる。しかし、次に述べるダイナミック・アパーチャの検討から、本計画で採用したラティスでは、エミッタンスを最小値より少し大きくして、約0.7 nm·radに設定してある。また、この理論的最小エミッタンスを(ほぼ)実現するアーク部のセル構造のオプティックスは、偏向電磁石の中心で(水平、垂直方向とも)ビームが非常に細く絞られており、ビームサイズは約10ミクロン程度になっている。このため、図1からもわかるように、偏向電磁石から発生する放射光の輝度は、ビームエネルギーが1 GeVであるにもかかわらず、数keV以下では他施設のものよりかなり高い。

### 長直線部における非線形効果の透明化

一般に、このような低エミッタンスのラティスでは、色収差が大きく、さらに分散関数が小さいために、この色収差を補正する六極電磁石の強さが非常に大きくなり、ダイナミック・アパーチャが狭くなるという困難な問題にぶつかる。一方、いろいろな設計計算の結果、この理論最小型エミッタンスのラティスでは、実際に、その理論的最小値をとることが可能であり、また、長直線部がなく、ノーマル・セルだけからなるような高い対称性をもつ場合には、二種類の六極電磁石だけでも、大きな運動量のずれと大きなベータトロン振幅をもっている電子の運動が安定であるということがわかった。しかしながら、対称性が少しでも破れると、DBAなどの他の低エミッタンス・ラティスと同様に、六極電磁石の大きな非線形効果のために、忽ち安定領域が狭くなってしまおうという結果になった。

そこで考えられたのが、座標変換に対する六強電磁石の磁場の対称性から、長直線部でのベータトロン振動の位相進みを特定の値にすると、長直線部に対して六極電磁石の非線形効果を「透明」にすることができるという方法である。六強電磁石の場所における電子の運動方程式は、

$$\begin{aligned} x'' &= -\lambda(x^2 - y^2), \\ y'' &= 2\lambda xy, \end{aligned}$$

と与えられるが、容易にわかるように、この方程式は、 $x \rightarrow x$  及び  $y \rightarrow \pm y$  の変換に対して不変である。これをベータトロン振動の言葉で表すと、もし、ラティスに、あるセクションを挿入したとき、その両端で $\beta$ と $\alpha$ が挿入前と同じで、かつベータトロン振動のチェーンの進み(位相進み/ $2\pi$ )が水平方向に整数(整数の整数倍)、垂直方向に半整数の整数倍になっていたとすると、このセクションの外では、電子の運動の様子は挿入前と全く等価となるということである。つまり、これを長直線部に適用すれば、六極電磁石の非線形効果に対し、長直線部があることによる影響を「透明化」することができ、ダイナミック・アパーチャが狭くなることをさげることができると考えられる。正確に言えば、運動量がずれていない粒子についてのみ、長直線部が透明化され、ラティスは24回対称性を回復することができる。ただし、実際は、長直線部で発生した色収差をアーク部の六極電磁石で補正することになるので、あまり長直線部の色収差が大きいと、ダイナミックアパーチャが狭くなる。また、運動量のずれが大きくなると、色収差のため長直線部のチェーンがずれて、必ずしも長直線部が「透明」にならなくなる。このような事情のために、ダイナミック・アパーチャが広いラティスの具体的な設計計算は困難を極めたが、最近、上述のような方針に基づいて、大きな運動量のずれに対してもダイナミック・アパーチャが大きなラティスが得られている。なお、本計画では、他の第3世代光源とは異なり、2種類の六極電磁石の

みが用いられる。

以上に概説したような検討結果が、表2に示す光源リングのパラメータである。図8に、アーク部のノーマルセル及び(長直線部を含む)マッチング部のラティス構造とオプティクスを示す。また、図9にビームサイズを、図10にダイナミックアパーチャの計算を示す。

ビーム電流ゼロでのエミッタンス(設計値)は0.7 nm·radであるが、最大電流200 mAでは、エミッタンスは約1.4 nm·rad程度になると予想されている。これは、先に述べたIBS効果によるものである。この効果は、一回の電子同士の散乱であるTouschek効果の多重散乱版と言えるもので、この多重散乱により電子の(水平, 垂直, 進行方向)の運動が揺さぶられ、それぞれの方向のエミッタンスが増大する効果である。図11にビーム電流とともにエミッタンス及び運動量幅がどのように増大するかを示す。なお、この計算の中に入ってくる因子、Coulomb logarithm 因子に不確実性があるため、実際には増大がどの程度になるかはよくわかっていないが、施設が完成すれば、これを実験的に検証することが可能となろう。このIBS効果を考慮したTouschek寿命を図12に示す。

さて、ビーム寿命を決めているもう一つの要因、残留ガ

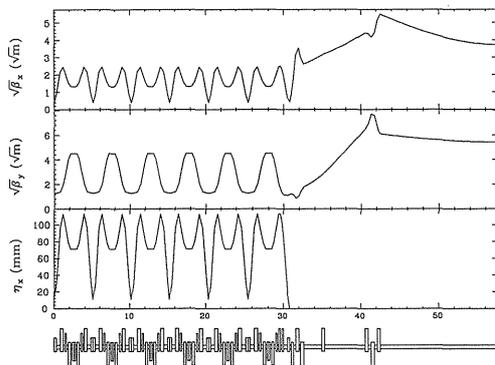


Figure 8. Beam optics in a quadrant of the VSX ring.

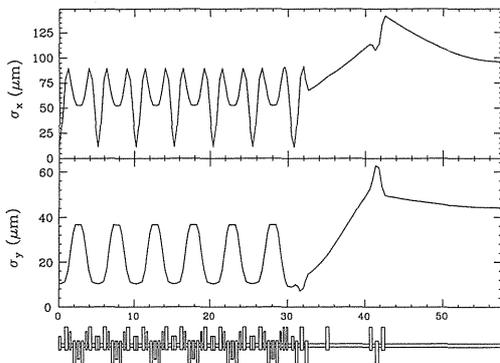


Figure 9. Beam sizes in a quadrant of the VSX ring. 10% emittance coupling is assumed here.

スとの散乱を減らすためには、真空度を上げるしか方法はない。そこで、本計画では、最大ビーム電流での平均真空度を $10^{-10}$  Torr以下にすることを目標としている。この真空度は、ビーム・エネルギーが1 GeVであることを考慮すると、真空チャンバーの十分な前処理、真空排気速度の

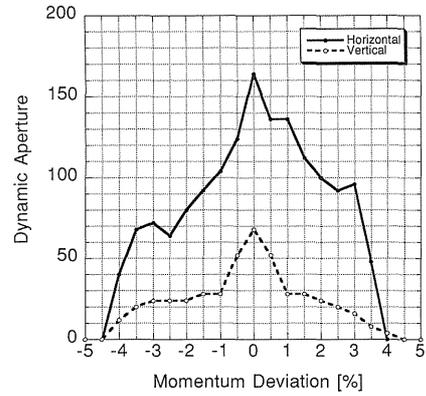


Figure 10. Dynamic aperture versus momentum deviation. The dynamic aperture is shown in a unit of the beam size with zero coupling.

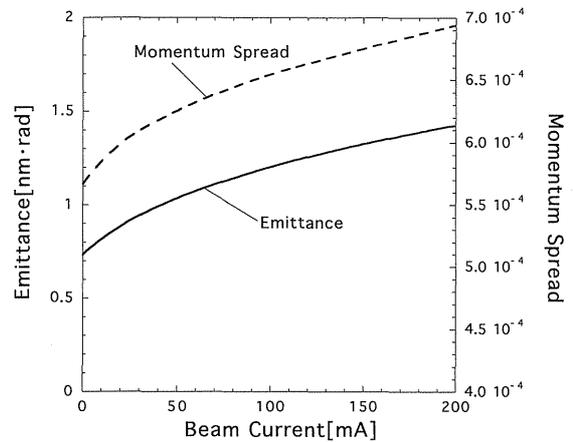


Figure 11. Effect of intra-beam scattering.

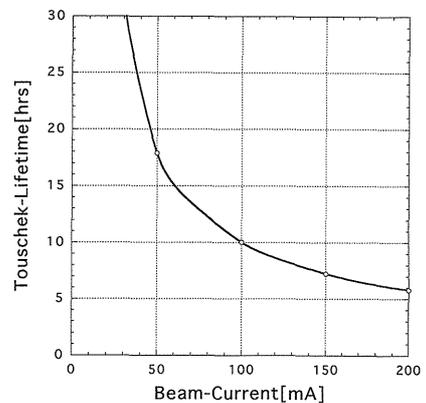


Figure 12. Touschek lifetime.

向上を図ることにより、実現できると考えている（次節を参照のこと。）

以上の検討から、今のところ、ビーム寿命として、200 mA で約3時間、100 mA では約6時間程度が確保できるものと考えている。

また、本計画では、30 m 級のアンジュレータをリングに挿入する予定であるが、ビームエネルギーが低いため、これがビームに与える影響が非常に大きい。アンジュレータのもつ収束力はエネルギーの二乗に逆比例するので、例えば SPring-8 と比較すると、本計画では、ビームに64倍の影響があるということになる。このようなことから、本計画では、アンジュレータの影響を如何にして補正するかが重要な課題となっている。現在までの検討結果によれば、長直線部の四極電磁石の値をギャップ変更に関連して変えることにより、長直線部を「透明化」したまま、この影響を何とか補正できるということがわかっている。

なお、施設建設直後は、より安定性が高くビーム寿命が長い、比較的大きなエミッタンス（それでも既存の第3世代光源程度のエミッタンス、3 nm・rad 程度）で運転を始める予定にしている。

### 3.3 加速器コンポーネントの設計及び R & D

現在、加速器の各コンポーネントについて、設計の見直し、詳細設計及び R & D が精力的に進められている。以下では、紙面の都合上から、これらについて簡単に紹介するのにとどめる。

#### 電磁石

既に、2 GeV 計画用として、偏向、四極、六極電磁石及びフィードバック用ステアリング電磁石の実機モデルが製作されて、これらの磁場測定が行われ、予期した性能を満足していることが確認されている。図13に偏向電磁石の磁場測定の様子を示す。本計画の四極電磁石は、2 GeV 用と同様に、鉄心が接着された積層鋼板からできているが、ビームラインとの干渉を避けるために、そ

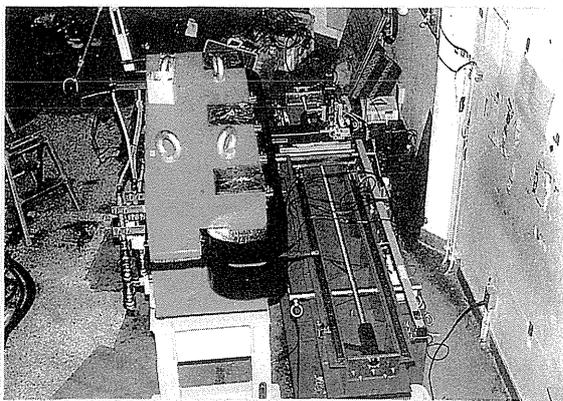


Figure 13. Field measurement of a bending magnet. The magnet is a model for the 2 GeV project.

の構造をC型とし、磁石側板（材質：SUS）に真空排気用の大きな開口をもつような構造を採用している。また、六極電磁石には、DC ステアリング用の補正コイルが取り付けられる。現在、本計画用の偏向、四極電磁石及びフィードバック用ステアリング電磁石の実機モデルを製作するための作業を進めている。

また、電源についても、同様に検討が行われており、四極及び六極電磁石については電磁石と電源を一対一とする方式を採用する予定にしている。

#### RF

長年にわたり、KEK と共同で高次モード減衰型高周波加速空洞の開発が行われてきた。フォトンファクトリーの高周波空洞は、既に、4 台とも、このタイプのものと交換されて、成果を上げている。本計画でも、同じタイプの高周波加速空洞1台を設置することにしている。図14に高周波加速空洞の断面図を示す。

#### 真空

2 GeV 計画用の偏向部及び直線部の真空チェンバー一式が既に製作され、真空排気試験が終了している。2 GeV 計画では、in-situ でのベーキングを行わない方式をとっていたが、本計画では、平均真空度の目標値が  $10^{-10}$  Torr 以下であることなどから、in-situ でベーキングを行う。また、真空チェンバーの断面が小さいこと（直線部は直径60 mm の円形パイプ）、アーク部では各種電磁石が密に配置されていることから、四極電磁石の側板を利用して、排気速度を上げることを目指している。図15にアーク部ノーマルセルの真空システムの概念図を示す。

真空チェンバーの材質については、現在、SUS とアルミの2種類について検討を行っている。もし、SUS を採用する場合には、resistive wall impedance の点からチェンバー内壁に銅メッキを施す必要があるため、これについての R & D が進行している。

#### モニタ

SOR-RING を用いた高精度ビーム位置モニタ及びシングルパス・モニタの R & D では、期待以上の成果が得

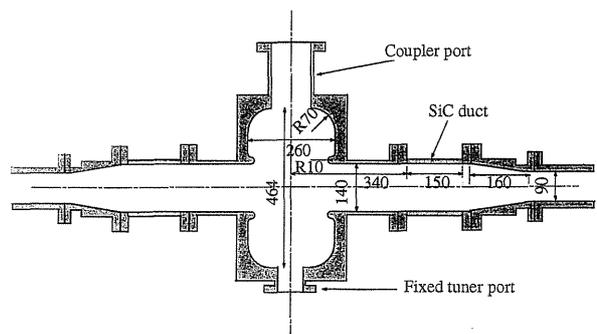


Figure 14. Cross-sectional view of the RF accelerating cavity.

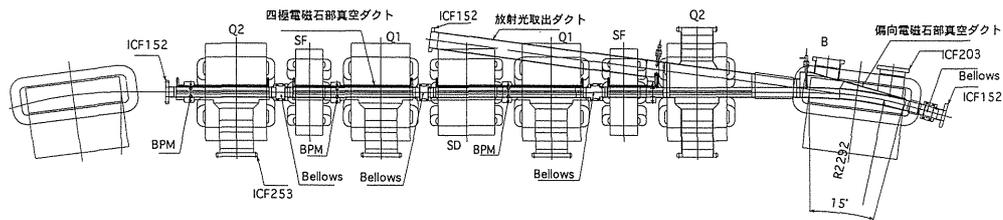


Figure 15. Schematic view of the vacuum system.

られている。前者については非常に高い位置分解能、約0.3ミクロンが得られており(図16)、後者についても当初の予想をはるかに上回る位置分解能、0.1 mm 以下が得られている。なお、その他の各種モニタについては、2 GeV 計画用に検討したものを適用する予定であり、特別な開発は行わないことにしている。

### 制御

数量等を変更するだけで、2 GeV 計画用に検討してきた制御システムを、ほぼそのまま適用することができる。ハードウェアの設計については、概念設計が出来上がっており、全体のシステムは、ワークステーションと各所に配置されたVME、これらをつなぐ基幹ネットワーク(ファースト・イーサネット)から構成されている。また、各種機器の直接制御に関しては、その多くにPLCが組み込まれ、台数の多い四極電磁石等の電源には廉価な制御ユニットが採用される予定である。

また、フォトンファクトリーの物性研ビームライン、BL-19を用いて、ビームライン制御に関するR&Dが行われており、本計画のビームライン制御にそれを反映させるつもりである。

### フィードバック

軌道フィードバックについても、2 GeV 計画用に設計及び開発したものを、ほぼそのまま適用することができる。現在、軌道フィードバックの制御システムのモデル構築が行われており、フィードバック・サイクルの時間の目標値、0.5 msec に向けて開発が進められている。また、軌道補正方式の開発及び関連のソフトウェアの開発も同時に進められている。

さらに、真空チャンバーのresistive wall impedanceによって引き起こされるビーム不安定性は非常に大きいのではないかとということが計算によって示されているので、このビーム不安定性に対するフィードバックを行うことも予定している。

### 挿入光源

当面は、アンジュレータの最小ギャップは、2 GeV 計画と同じ20 mm とする予定であるので、挿入光源自体については、2 GeV の時の設計検討をほぼそのまま活かすことができる。しかし、真空チャンバー(特に30 m 級アンジュレータのもの)の製作方法については、まだ完全には確立されておらず、今後とも引き続き検討

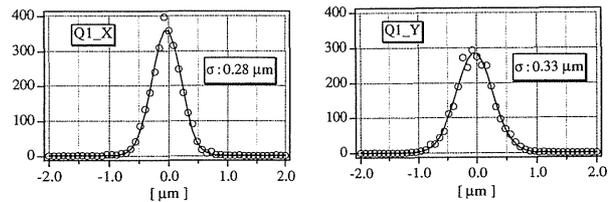


Figure 16. Position resolutions of a high-precision beam position monitoring system. The left figure is for horizontal position resolution and the right for the vertical one.

を要する課題となっている。なお、30 m 級アンジュレータは、約10ユニットで構成され、当初は1ユニットから始めて、少しずつユニットを追加することで最終的な長さにもっていくことにしている。

また、2 GeV 用に開発していたマルチポールウィグラーの1/2モデル(図17)が3テスラの磁場発生に成功している。実機ではギャップ20 mm で2.3テスラの磁場を発生することができるので、これを本計画に適用すれば、光のエネルギー8 keV までのX線が利用可能となる。なお、将来的には、ビーム・スタディの結果を見ながら、挿入光源の最小ギャップを10 mm 程度まで狭くする予定である。

その他、ビーム入射関係では、パルス電磁石及び電源の設計が進行中で、今年、パルス・スイッチとしてサイロトロンの代わりに半導体素子IGBTを用いるための開発を行う予定である。また、ライナックについては、2 GeV 計画用の設計の見直しと詳細設計が進行中であり、今後は、新型加速管の試作・試験や初期ビーム負荷を補正するための開発研究を行うことを予定している。

## 4. ビームラインと利用計画

これについては、冒頭でも述べたように簡単に触れるのにとどめる。現在、ビームライン基幹部及び分光光学系の設計、回折格子等のR&Dが精力的に行われている。また、共同利用実験をどのような体制で遂行するのかということについても、検討が進められている。どのようなビームラインを建設し、どのような利用実験を行うかについて、いろいろな場で検討が進められている段階であり、近いうちに、これに関してまとまった報告がなされるであろう。

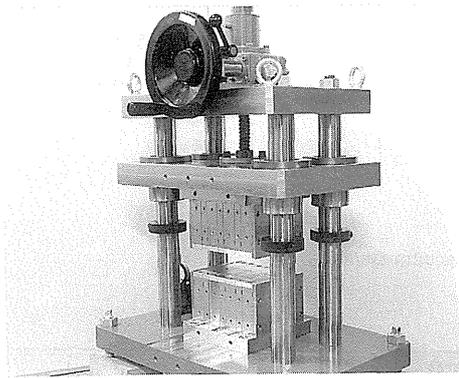


Figure 17. A half-scale model of a 3 T multipole wiggler.

#### 4.1 放射光利用

本高輝度光源の完成により、SOR-RING等で従来から行われていた利用実験が著しく進展すると期待されることは勿論であるが、なんと言っても、この施設の超低エミッタンス・ビーム、また30 m級のアンジュレータから発生する超高輝度の放射光という、画期的な特徴を生かした新しい放射光利用が、この施設の目玉となるであろう。これには、超高分解能光電子分光、光電子顕微分光、軟X線顕微分光、軟X線発光分光などがある<sup>9)</sup>。その他、高磁場マルチポール・ウィグラーを挿入して、約8 keV(将来的には10 keV程度)までのX線を利用することも計画されている。

この施設では、挿入光源を設置する長直線部が2カ所しかないので、一つの長直線部には約4台のアンジュレータを設置し、もう一つには30 m級のアンジュレータを1台設置し、それぞれの長直線部に約4本の分岐ビームラインを設けて、これらをタイムシェアリングで運用する予定である。しかし、将来的には、長直線部に置かれたアンジュレータをわずかに傾け、発生する放射光の角度を違えることによって、これらアンジュレータからの光を同時に利用することも計画している。

以下に、この施設によって拓かれるであろう利用研究の新しい可能性について列挙する。

##### 超高分解能の世界

本計画の分光器光学系では、これまでの放射光利用では実現することのできなかつた高分解能(100 eVで1 meV)を達成することを目指す。

##### ナノメータの世界

約0.5 nm・radの低エミッタンスは他の高輝度光源よりも1桁以上小さいので、世界最小のスポットサイズが実現される。これによって、10 nm以下の微小な世界を詳細に解明することができる。

##### 世界最高強度

30 m級のアンジュレータから発生する放射光は分解能、約1000の分光器に匹敵する単色性をもっているので、分光器なしの大強度利用実験が可能になる。

##### 光のコヒーレンスの利用

本計画では、放射光のコヒーレンスを利用した実験が可能になり、ホログラムや非線形光学を利用した新しい研究分野が開かれる。

なお、図18に、ビームライン利用の現在案を示すが、これについては、ビームライン計画の策定、詳細設計の進展等に伴い、今後、変更がなされることになろう。

#### 4.2 低速陽電子利用

一方、この計画では、光源リングへビームを入射している短い時間を除いて、大電流の電子ビームをライナックで加速し、これをビーム・ダンプの間に置かれた重金属ターゲットに当て、そのときに電子陽電子対生成により生じる大量の低速陽電子を用いて、世界最高レベルの測定効率と精度で低速陽電子利用実験を行うことを目指している。このため、低速陽電子実験室がライナックと同一レベルの光源棟地下に配置される。

発生した低速陽電子は直流化または短パルス化して、数カ所の実験ポートに供給される。直流化したビームは、2次元2光子角相関法による表面研究、陽電子消滅法による表面・界面・薄膜の電子状態の研究等に利用される。一方、短パルス化したビームは、2次元2光子角相関法と陽電子寿命法の組み合わせによる表面近傍の格子欠陥や界面の詳しい研究、定エネルギーの陽電子照射による清浄表面の種々の反応ダイナミクスに関する研究、陽電子オージェによる表面研究、TOF法による陽電子・気体分子散乱断面積の測定等に利用される。

#### 5. 結び

本記事で解説した、東京大学高輝度光源計画は長年の検討と推進にもかかわらず、未だ実現の運びとはなっていない

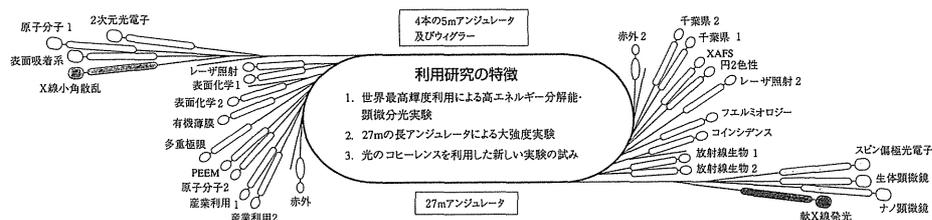


図18 ビームライン利用計画(案)

いが、硬 X 線専用の高輝度光源、SPring-8 がその利用を開始した今、急速に発展しつつある放射光科学の分野において、我が国が国際競争の中でその地位を維持し、さらに先端的研究分野を開拓していくためには、是非とも、我が国にも VUV・軟 X 線専用の高輝度光源を早期に建設することが必要であろう。この計画の実現は、これを推進して関係者及び利用者グループの夢であるばかりでなく、21世紀の我が国の科学・技術に多くの貢献をなすものと確信している。

一方、柏キャンパスでは、キャンパス第 I 期計画として物性研、宇宙線研の建物の建設が行われており、一部は既に完成している。2000年3月までには、両研究所の移転が終了する予定である。さらには、1998年度の第1次及び第3次補正予算で、第II期の新研究科の用地と建物が認められている。このようなことから、現在、関係者は、早い段階で第III期の土地取得がなされ、施設建設に着手することができるようになるのではないかと大いに期待しているところである。

なお、この計画に関する研究会、検討会、打ち合わせ等が今までに相当数、重ねられてきている。これらには物性研の研究会<sup>10,11)</sup>、VSX 利用者懇談会の研究会<sup>12)</sup>、加速器検討会<sup>13)</sup>、ビームライン・分光光学系検討会、放射線安全に関する検討会、柏放射光陽電子ビーム実験室建設WG等々があり、その他にも、会社と数多くの打ち合わせが行われている。

## 6. 謝辞

東京大学高輝度光源計画に多大のご支援とご協力を頂いている多くの方々（東大本部及び関係の諸先生、歴代の物性研所長、所員並びに事務部、高エネルギー加速器研究機

構、VSX 利用者懇談会、低速陽電子ビーム利用者懇談会、協力民間会社）に感謝いたします。また、現在、加速器に関する設計・開発を行っている高輝度光源加速器グループ、特に物性研 SOR 施設の加速器グループに深く感謝します。なお、ラティス設計に関する計算は、SOR 施設の高木宏之助手と大学院生の原田健太郎君によって精力的に行われたことをここに付記します。

## 参考文献

(参考文献としては、計画に直接関係する比較的新しいものだけに限る。また、文献のタイトルにつく、東京大学高輝度光源計画は省略した。また、発行元が明記されていないものは、すべて、東京大学物性研究所によるものである。)

- 1) 一般向けパンフレット〈夢の光〉(1996年)。
- 2) 計画のパンフレット(1998年度版)(1998年)。
- 3) 1 GeV 加速器の概要(1998年8月)。
- 4) VSX 利用者懇談会 News Letter No. 1~4, VUV・SX 高輝度光源利用者懇談会(1996年6月, 1997年12月, 1998年7月, 12月)。
- 5) 計画の概要(1997年8月), 2 GeV 計画全体をまとめたもの。
- 6) 加速器の概念設計(1995年11月)。
- 7) ビームライン・分光光学系の概要(1997年2月)。
- 8) ビームライン利用計画(1997年6月), 2 GeV 計画についてまとめたもの。
- 9) ビームライン利用計画II(1998年6月)。
- 10) 最近、開催されたものとして、例えば、物性研究所短期研究会「高分解能光電子分光が拓く物性研究」(1998年6月)。
- 11) Proc. of the Todai Symposium 1997 and the 6th ISSP International Symposium on Frontiers in Synchrotron Radiation Spectroscopy, J. Electron Spectroscopy **92** (1997)。
- 12) 例えば、「高輝度光源がめざす戦略的応用研究」シンポジウム, 同シンポジウム実行委員会(1998年3月)。
- 13) Accelerator Design Note (内部資料, 約300篇), 物性研究所 SOR 施設。