

## 次世代大型高輝度放射光施設計画に 関する調査報告書

日本放射光学会

### 要 旨

日本放射光学会は1989年7月に将来計画特別委員会を設置して、わが国で現在進行中の大型高輝度放射光施設建設計画につき検討した。

この結果、

1. 科学技術庁が日本原子力研究所と理化学研究所を建設主体として兵庫県播磨科学公園都市に建設を予定している8 GeV光源計画 (SPring-8),
2. 高エネルギー物理学研究所のトリスタン主リング (MR) を放射光用の光源として利用する計画,

の二つの計画は、いずれもわが国の次世代の放射光学の発展を担う、きわめて価値の高い研究計画であると判断した。SPring-8は高度の先進性を持つとともに、産官学に広く開放される大規模共同利用施設を志向し、先端技術開発に大きな貢献を期待できる。一方、MR放射光施設は放射光発生技術の極限を目指し、基礎科学の未踏領域を開拓するほか、高度の加速器技術の開発にも大きな寄与を期待できる。これら二つの計画は、それぞれの研究課題、技術的アプローチにおいて独自性をもち、相互に補完しあう性格を持つ計画と認め、両者ともに学会として支援、推進すべきものと結論した。

## 「次世代大型高輝度放射光施設計画に関する調査報告書」 の作成の経緯について

将来計画特別委員会委員長 菊田 惺志

放射光科学は他の諸科学と著しく性格を異にし、研究場所が光源施設に集中しており、これなしには研究活動はできない。また放射光科学の進歩発展は光源の高性能化と密接に関連している。従って、将来的に放射光科学の一層の発展を目指すとき、利用研究についての展望を持つとともに、放射光光源の建設計画に重大な関心を持たざるを得ない。放射光科学の発展は将来計画の成否にかかっているとんでも過言ではない。

周知のように、日本放射光学会は放射光に関連する科学技術の発展を目指して1988年4月に設立され、学術情報の交換や研究交流などの事業が活発に行われている。そしてまた、学会はわが国における放射光の将来計画に適切な取り組みを行うことが期待されている。そのような経緯で第6回評議員会(1989年7月)において佐々木会長(1989年度)から「将来計画特別委員会」設置の提案があり承認された。委員会は2年間の時限であって、1989年度中の委員は次のように放射光施設関係者、将来計画立案関係者、学識経験者などから構成されている(五十音順)。

安藤 正海\* (高工研・放射光)  
 石井武比古 (東京大・物性研)  
 遠藤 裕久 (京都大・理)  
 太田 俊明 (広島大・理)  
 勝部 幸輝 (大阪大・蛋白研)  
 上坪 宏道\* (理研・大型放射光推進室)  
 菊田 惺志\* (東京大・工) 委員長  
 木村 克美 (分子研・UVSOR)  
 木村 嘉孝 (高工研・加速器)  
 佐々木泰三\* (高工研名誉教授) 1989年度会長  
 佐藤 繁 (東北大・理)  
 下村 理 (無機材研・超高压)  
 菅 滋正 (大阪大・基礎工)  
 谷口 雅樹 (広島大・理) 1989年度 庶務幹事

千川 純一\* (高工研・放射光)  
富增多喜夫 (電総研・量子放射)  
林田 俊明 (三洋電機・研究開発)  
原田 仁平 (名古屋大・工)  
藤井 保彦\* (筑波大・物質工) 1989年度 渉外幹事  
松井 純爾 (日本電気・研究開発)  
松下 正 (高工研・放射光)  
宮原 恒昱 (高工研・放射光) 1989年度 編集幹事  
森 肇 (九州大・理)

1989年11月9日に開かれた初回の委員会において、わが国の次世代大型高輝度放射光施設計画に関して調査が行われ、

- 1) 科学技術庁が日本原子力研究所と理化学研究所を建設主体として兵庫県播磨科学公園都市に建設を予定している8 GeV光源計画 (SPRING-8),
- 2) 高エネルギー物理学研究所のトリスタン主リング (MR) を放射光用の光源として利用する計画,

について論議が行われた。検討を具体的に進めるために大型計画に関する起草委員会 (委員は上記名簿の\*印) が設けられ、1989年12月7日、1990年1月5日、1月22日に調査報告書の案が検討された。さらに2月3日の第2回特別委員会での議論を踏まえて、3月10日の起草委員会で修正し、4月7日の第3回特別委員会で再度検討を行った。これをもとに4月16日の起草委員会でとりまとめた最終案を4月26日の第8回評議員会に提出、基本的に承認された。

この報告書によって会員各位の次世代大型高輝度放射光計画に対する関心が高まり、わが国の次世代放射光研究が輝かしい成果を挙げる契機になれば幸いである。

## 目 次

§ 1 大型高輝度放射光施設の必要性	6
1.1 次世代大型高輝度放射光施設について	6
1.2 大型になる理由	7
1.3 放射光研究の歴史	8
1.4 放射光利用研究の動向	10
1.5 低エミッタンス光源加速器の問題点	12
1.6 世界の大型高輝度放射光計画	12
図1-1~2	14
§ 2 科学技術庁大型放射光施設SPring-8計画	16
2.1 はじめに	16
2.2 基本仕様	16
2.2.1 要求される性能	16
2.2.2 SPring-8の概要	16
2.2.3 ビームライン	17
2.3 SPring-8の特徴	17
2.4 利用計画	18
2.4.1 利用形態	18
2.4.2 研究課題	18
I. バルク固体	19
II. 表面・界面	22
III. 生体	23
IV. 気体	24
V. 原子核	25
VI. 応用分光学	25
2.5 建物及び建設場所	26
2.6 年次計画	27
2.7 建設及び運営体制	27
表2-1~4	28
図2-1~5	30

§ 3	高エネルギー物理学研究所トリスタン主リングMRの放射光利用計画	35
3.1	計画の背景と目的	35
3.1.1	PF2.5GeV光源	35
3.1.2	トリスタン入射蓄積リングARによる放射光利用	35
3.1.3	MR利用への期待	35
3.2	MR光源の概要とX線領域自由電子レーザー	36
3.2.1	低エミッタンス化	36
3.2.2	挿入光源	36
3.3	利用研究	37
3.3.1	放射光励起メスバウアX線光源	37
3.3.2	マイクロクラスター	38
3.3.3	蛋白質のピコ秒の時間分解構造解析	38
3.3.4	極限環境下の物質の構造と物性	39
3.3.5	X線干渉光学：X線ホログラフィ	40
3.4	まとめ	41
	表3-1~2	42
	図3-1~3	43
§ 4	次世代大型高輝度放射光施設計画の意義 (学会の見解)	46
4.1	次世代大型高輝度放射光施設計画の意義と現状	46
4.1.1	SPring-8計画	46
4.1.2	トリスタンMR利用計画	47
4.2	計画推進にあたっての課題と現在の問題点	47
4.2.1	SPring-8計画	47
4.2.2	MR放射光利用計画	48
4.3	むすび	49
付録1	輝度について	50
付録2	安定性について	51



## § 1 大型高輝度放射光施設の必要性

日本放射光学会はその定款(第2条)に“放射光科学、放射光技術およびこれらに密接に関連する学問(放射光学)の進歩発展を図ることを目的とする”と記している。

放射光学は他の諸科学と著しく性格を異にし、研究場所が光源装置を有する施設に集中しており、これなしには研究活動は不可能である。現存の各施設はその設立以来多くの研究者に活動の場所を提供し、現在もなお活発な活動が続いているが、放射光学の進歩発展のためには現存施設の拡充発展にとどまらず、新たなより高度な施設の建設が強く要望されている。このような将来計画の建設主体は放射光学の推進を目指す官民の研究機関であって学会ではないが、その主体が何であれ、次に出来る放射光施設がどのようなものになるかが今後の放射光学の進展を直接左右することは明らかで、学会として新施設建設の動向に強い関心をもたざるを得ない。

現在、わが国では大型・中型・小型の各種の放射光施設建設計画が多数提案ないし推進されている。ここで大型というのは電子エネルギーが5~10GeVの蓄積リングで、以下に述べるように挿入型発光装置を用いて光子エネルギーで10~20keV程度のX線を1次光で発生することができ、偏向部を用いて20~100keVの硬X線をかなりの強度で利用できるような光源加速器を持つ施設を指す。

次に中型というのは1~2GeV程度のリングで、偏向部を用いて1~20keV程度のX線を発生するもの、ウィグラー型の挿入装置(後述)を用いてこれを更に硬X線側に延長するもの、あるいはアンジュレータ型の挿入装置(後述)を用いて極紫外・軟X線領域(20eV~2keV)を格段に高輝度化しようとするものが含まれている。

また小型というのは大体1GeV以下で、主に

偏向部を利用して数keV以下の軟X線を発生することを主眼とするものである。わが国では通産省研究機関や民間企業が開発の主体となっており、X線リソグラフィを中心とする産業利用目的のものが多い。

以上の分類はわが国で現在提案、建設中あるいは試験中の施設の状況に従って大まかに分類したもので、もちろん規模や目的に関してその中間や複合型があり得ないわけではない。

放射光施設は従来大は小を兼ねるという考え方で、異なる波長領域、異なる目的を持つ研究施設が同居しているものが多かったが、現在は世界各国とも利用波長領域や研究目的に従って、大中小各種施設を新設して住み分けをはかる、という傾向にある。

このように、わが国で進展している各種新設光源の計画については本学会が状況を把握し、正確な認識を持つだけでなく、わが国の放射光学の今後の進歩発展のために、これらの計画が多くの研究者に先進的な研究の機会を提供し得る優れた施設として逐次実現してゆくためにはどうすればいいのか、衆知を集めて公の場で討論し、支援してゆく必要があろう。

そのような目的のため1989年度、学会は第6回評議員会(7月29日)において「将来計画特別委員会」の設置を決め、作業を開始した。

### 1.1 次世代大型高輝度放射光施設について

将来計画特別委員会は多くの計画の中で、先ず「大型」についての討論から始めることとした。これはその計画の規模、先進性、関係研究者数のどの点においても、当面提案されている計画の中で、きわ立って重要性が高いからである。

「次世代大型高輝度放射光施設」とは何か、をここで定義しておく必要があるが、それは次の3つの要件を満たす放射光施設とする。

(1) アンジュレータ型の挿入装置(Insertion Device)によって発生するX線(基本波でh $\nu$

>10keV) を主として用いるもの。

(2) アンジュレータの発光が本来の高い輝度を實現できる程度に、電子ビームのエミッタンス  $\varepsilon$  が小さいこと。

(3) 専用光源施設であること。

そうすると現存の光源としては、この要件を満たすものは世界中どこにもなく、将来計画によってのみ實現されるものである。たとえば高エネルギー物理学研究所 (KEK) 放射光実験施設の2.5 GeVのフォトンファクトリー (Photon Factory, 以下PFと略記) は1, 2の条件を欠いており、6 GeVのKEKトリスタン入射蓄積リング (Accumulation Ring, 略称AR) は2, 3の条件を欠いている。

ここで次世代型の大型将来計画として取り上げるのは、

- (1) 科学技術庁が日本原子力研究所と理化学研究所を建設主体として兵庫県播磨科学公園都市に建設を予定している8 GeV光源計画 (Super Photon Ring 8, 略称SPRing-8)
- (2) 高エネルギー物理学研究所のトリスタン主リング (Main Ring, 略称MR) を放射光用の光源に転用する計画

の二つである。

それぞれの計画の内容は§2, および§3に述べる通りである。本報告では本学会特別委員会として、この二つの次世代大型高輝度放射光施設計画の意義をどのように考えるのかを述べる。

「中型」と「小型」についてもわが国内にそれぞれ多数の提案や実施中の計画があり、本学会としては「大型」と並行して各計画の当事者から報告を求め、調査、検討を進め、これらの計画に対する学会の見解および対応を含めた報告書を作成する予定である。

## 1.2 大型になる理由

放射光研究は世界中どこでも最初は高エネルギー物理実験用の電子シンクロトロンに「寄生」

する形で始まった。これが第1世代の形とすれば、次は専用の「光源加速器」としての電子蓄積リングをつくって高エネルギー実験とは独立に光を使う時代となった。これを第2世代と呼ぶことにする。また、現在差しかかりつつある第3世代とは、利用目的に最適化した高輝度光源加速器を用いて研究を行う時代をいう。

1980年代に放射光研究の主力となった第2世代型の2~3 GeV級専用電子蓄積リングの基本型は、ビーム偏向部を主な光源とするもので、ラティス (周期性を持つ磁石配列) の設計は従来の型を踏襲しており、エミッタンス (ビームサイズとビーム発散角との積、後述) は $10^2$  nmrad あたりのものが多かった。ところが80年代はじめ、スタンフォード大学の放射光施設 (Stanford Synchrotron Radiation Laboratory, SSRL) で開発された永久磁石型挿入光源装置 (アンジュレータ) が光源の輝度 (付録1参照) を一気に2~3桁高めることが証明された。そして、わが国でもPFでは1983年の共同利用開始と共に挿入装置が設置されて実用化し、以後他の各施設も競ってアンジュレータを導入するに至った。

さてアンジュレータ光はその基本波長  $\lambda_1$  が、平面蛇行型のものでは電子軌道の軸上で

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2}\right)$$

となる。 $\lambda_u$  は磁石列の基本周期長、 $\gamma$  は電子のエネルギーを静止エネルギー単位で表す量、 $K$  は磁場の強さで決まる蛇行軌道の最大偏角のパラメータである。磁石列の周期数を  $N$  とすると、アンジュレータ光は、

- (1) 光源の輝度が  $2N \sim N^2$  倍になる
- (2) 光の平行度が  $1/N$  になる
- (3) バンド幅が  $\lambda_1/\sqrt{N}$  の準単色光になるが、 $\lambda_1$  は可変でチューニングできる
- (4) 干渉性が高い

(5) 偏光特性を直線偏光から円偏光まで目的に従って設計, 制御できる

(6) 高次光も利用できる

など, 従来型の放射光に比し多くのはるかに優れた特長を持つ。この結果, 現存の世界各国の施設は従来型の光源の直線部に可能な限りの挿入装置を設置しつつあり, 今後放射光の光源の主力は次第にアンジュレータに移ろうとしている。

ところが, もう一つアンジュレータ光には通常の放射光と大きな違いがある。それは通常の放射光では光源の特性波長 $\lambda_c$ が電子エネルギー $\gamma$ の3乗に反比例するのに対して, アンジュレータ光では $\gamma$ の2乗に反比例する, ということである。また通常の放射光では $\lambda_c$ は偏向磁場の曲率半径 $R$ に比例するが, アンジュレータ光では $\lambda_c$ は周期長 $\lambda_u$ に比例する。現存施設, たとえば2.5 GeVのPFでX線のアンジュレータ光基本波を発生できないのは, このような原理的制約に加えて各種のハードウェアの技術的制約にもよる。アンジュレータ光を $h\nu > 10\text{keV}$ のX線領域で発生させようとするとき光源加速器はどうしても大型となり, 5~10 GeV級のものが必要になる。

さらにアンジュレータを主力光源として多数導入しようとするとき, これを挿入するための長い直線部がたくさん必要になる。従来型の電子加速器では直線部の役割は入射用のパルス電磁石, 高周波空洞, 軌道調整用の多極電磁石, 真空ポンプ, モニター類を設置する場所であった。たくさんの挿入装置を入れるためにはこれに加えて, 挿入装置用の長い直線部を多数つくる必要があり, 加速器の全周が長くなる。

また, アンジュレータ光の上述のような特性をフルに発揮するためには, 電子ビームのエミッタンスが従来よりも桁ちがいに小さくしなければならないことが理論的にも実験的にもわかっている。小さなエミッタンス (<10 nmrad) を実現するためには, 多くの軌道補正用多極電磁石が必要で, また磁石配列の基本単位 (セル) の数をなるべく

大きくした方が有利である。このことは, さらに軌道長を長くする。従って, 次の第3世代のX線源となる放射光加速器は,

(1) 電子エネルギーが5~10 GeV程度の高エネルギー加速器

(2) 大型で長い軌道長を持つ加速器  
という, 技術的制約を受ける。

このように, 次世代型のX線用放射光加速器が大型化する原因はアンジュレータを主力装置として採用することにあるが, 大型光源のメリットはそれだけではない。大型化に伴って必然的に偏向磁石で発生する従来型の放射光の特性波長 $\lambda_c$ はより短波長になり, 従来の2~3 GeV級施設では手の届かなかった重元素やその化合物が研究対象として取り上げられるようになる。そのような短波長領域で更にウィグラーの挿入によって輝度をあげる可能性も合せ持つことになる。

### 1.3 放射光研究の歴史

放射光施設の将来計画を考えるに当たって, 従来の研究の発展の流れの中でこれらの将来計画の位置づけをするため, 放射光施設発展のこれまでの経緯をふりかえって見ることにする。高エネルギー実験用につくられた電子加速器からのシンクロトロン放射が, それ自身を対象として研究され始めたのは, 1950年から60年頃である。60年代にはアメリカ, 日本, 西ドイツでこの光を用いた分光学的研究が大きな成果をあげた。60年代後半になると, 既存の加速器を利用あるいは転用するだけでなく, 放射光専用の加速器を建設するという考えが現れた。放射光用加速器はビームの安定性と高い輝度が強く求められる。初期の電子加速器の主流であった電子シンクロトロンに比べて, 60年代以後に開発された蓄積型の加速器は, 一定のエネルギーで電子を軌道に蓄えるので安定性の点でははるかに優れている。東京大学物性研究所のSOR-RING (INS-SOR II) は, この時代に世界で初めて光源として建設された電子蓄積リングで



ある。これは東京都田無市にある東大原子核研究所内に1975年に完成し、現在も固体物理学などの研究に活躍している。

図1-1は世界における電子(陽電子)蓄積リングの発展を年代を追って示したものである。時代とともにエネルギーが上昇してゆく様子ははっきりと読み取れるが、もう一つの傾向として高エネルギー物理実験用につくられた電子・陽電子衝突リングは、そのほとんどが遅かれ早かれ放射光研究にも利用されるようになったことがわかる。さらに進んで、1980年代には放射光利用を主目的とする2 GeV級蓄積リングが各国で建設されるようになり、英国ダレスベリ研究所のSynchrotron Radiation Source(SRS)、わが国の放射光実験施設(PF)、米国ブルックヘブン国立研究所のNational Synchrotron Light Source(NSLS)などが相次いで完成した。これらの専用光源施設のほかに、1970年後半以後、高エネルギー実験用の加速器に共用の形で多数の放射光研究施設が出現した。米国ではスタンフォード大学のSSRLとコーネル大学のCHESS、西独ハンブルクのHASY LAB(DORIS)、ソ連ではノボシビルスクのVEPP-II、VEPP-III、フランスではオルセイのDCIとACO、イタリアではフラスカチのADONEなどである。最初極紫外・軟X線の分光学用光源として利用され始めた放射光はこの時期に物質構造の研究にも利用できるX線源としての地位を確立した。図1-1は全世界の放射光用電子加速器の歴史を蓄積リングに限って示してあるが、上下2つの囲いに分けてあるのは主としてX線源として用いられているもの(上)、主に軟X線・極紫外領域で使われているもの(下)の区分である。

PFは1978年に建設が開始され、4年後の1982年に完成し、現在放射光科学研究のための最先端の施設として稼働している。ビームラインや実験ステーションは逐次増設されて、現在では約50件の実験が同時に実施できるようになっている。運

転時間は3,200時間を超え、その80%は共同利用実験に提供されている。現在全国の大学、官公庁の研究所からの共同利用実験の登録者は2,000人を越し、年間約500件の実験が行われている。また、民間企業からも年間20~30件の施設利用実験が申し込まれる。それらは半導体材料や触媒の研究が主である。このほか、民間4社がそれぞれにビームラインを建設し本格的な利用を行っている。

一方この間にPFの光源としての性能も著しく向上した。図1-2は波長0.1nmのX線の輝度が、PFが共同利用に公開された1983年以後の数年間にどのように向上したかを示している。図で見るとおり、83年に $10^{11}$ 程度であった輝度は87年までの4年間に4桁の伸びを達成した。この進歩の原動力はいろいろあるが、最も顕著なものは低エミッタンス化と挿入装置(多極ウィグラー Multipole Wiggler, MPW, 次節参照)の導入である。この図にはトリスタンARの光源としての達成値も記入してある。BMは偏向磁石 Bending Magnetからの放射光を示す。進歩は短期間で達成されたが、PF、AR共にこの到達点は限界に近い。PFではエネルギーが低いため、アンジュレータで0.1nmを発生することは殆ど不可能であるし、ARは専用光源でないため、これ以上エミッタンスを下げることは難しい。図の右上には日、米、欧の次世代大型光源が達成しようとする目標輝度( $10^{19}$ 台)と運転開始予定時期が示されている(1.6参照)。図の左下の曲線は1895年にレントゲンがX線を発見して以来、線源として用いられてきたX線管の輝度の向上の歴史が示してある。最近の冷却装置付の銅の回転対陰極X線管でかなりの向上はあったものの、X線の輝度の向上の歴史は放射光によって劇的な変化を遂げつつあることは明らかである。

わが国唯一のX線放射光実験施設としてのPFは、国内はもとより国外の研究者の強い要請に応じて短期間に施設を完成し、このように光源としての高度の性能を実現した。しかし一方、施設の

充実も急速に進み、早くも新規設備や拡充の余地は殆どなくなった。また利用者数・申請実験課題数の増加に伴い、利用者に割り当てられるビームタイムも年を追って窮屈になる一方で、要望に十分応えているとはいえない状況にある。このままで経過すればわが国のX線放射光の利用はまもなく限界に達し、長期の停滞を余儀なくされる恐れもある。

#### 1.4 放射光利用研究の動向

放射光利用研究はわが国においてはPFを中心に、東京大学物性研究所、分子科学研究所、電子技術総合研究所においても活発に展開しており、真空紫外線・X線領域での物性と物質構造の研究に多くの成果をあげた。また実験技術の面でもこの間に著しい進歩があり、従来は想像も及ばなかった高度な課題に挑戦しようとする研究者も少なくない。ところが研究課題が高度化するにつれて、現存の光源の能力の限界も次第に強く意識されるようになり、真空紫外線とX線、それぞれの領域で、格段に高い輝度をもつ光源の出現を期待する研究者の声も強くなっている。

ところで、このような研究ニーズに対応してシーズに当たる放射光発生技術にも、1980年代には目ざましい技術革新があり、未踏の領域を目指す研究者の期待に応える可能性もかなり成熟してきた。最も目ざましい進歩はすでに1.2で述べたように、挿入型光源装置の出現である。挿入装置には2種類あるが、いずれも電子軌道の直線部に周期的に電子を蛇行させる磁石列を挿入し、電子を繰り返して発光させるものである。そのうち強い磁場を用いて放射光の発散角よりも大きな偏角で蛇行させるものをウィグラー(あるいは多極ウィグラー)、比較的弱い磁場で電子の蛇行範囲を光の発散角の中に制限するものをアンジュレータと呼んでいる。アンジュレータの場合は干渉条件をみだす波長の光が選択的に増強され、輝度も指向性も著しく大きくなるが、ウィグラーの場合

は短波長の光が増強される。挿入型の発光装置はわが国ではPFが利用を公開した1983年にはウィグラー(1周期の超伝導磁石型ウィグラー。この種のを多極型と区別して波長シフターと呼ぶこともある)、アンジュレータともに実用機が稼働して多くの成果をあげたが、その後1988年になってトリスタンARには新たに円偏光X線を発生する新型のアンジュレータが挿入され、威力を発揮している。これらの技術革新の結果、放射光研究は更に格段の高輝度光源によって未踏の研究課題に挑戦しようという次の世代の展望が開けてきた。

放射光科学の今後の発展の方向としては、これまでの研究成果を踏まえ、従来の研究手法を格段に高度化するだけでなく、既設の光源(第2世代)では到達できない未踏の科学・技術の領域を探索することが求められている。このような研究課題は、次のように分類される：

- (1) 微小な散乱・吸収断面積を持つ系の研究；  
放射光(電磁波)と物質との相互作用が著しく小さいため高い光子束を必要とする研究。
- (2) 微量の系の研究；  
観測対象が極めて微小、微量、あるいは希薄であるため、高い輝度を必要とする研究。
- (3) 高輝度放射光のユニークな特性により可能となる研究；

既存の光源では到達できないエネルギー領域、あるいは著しく高い分解能(エネルギー、運動量、位置、角度、時間など)、偏光、干渉性などにより可能となる研究。

このような要求は、物性科学の新しい展開により一層切実なものになってきた。半導体や超伝導体にみられるように、単体から多元化合物、混晶、非晶質体から完全結晶まで、さらに超微粒子、超薄膜、人工超格子など、組成と構造の多様化によりエキゾチックな物性が創出されつつある。生体物質の研究においても、多彩な分子構造と生体機能の関係を探る、生命現象の解明と分子デザイン

の原理を探索する研究が進められている。このような新しい研究を展開するため、物質の構造と機能の関係を追求する高度な研究手法が要求されてきている。このニーズに呼応して、これまでの放射光による実験研究から、高精度に原子構造や電子状態を解明する新しい手法が芽生えている。それらには、時間分解X線回折、時間分解局所構造解析、角度分解・スピン分解光電子分光、表面・界面構造解析、コンプトン散乱、磁気散乱、超高分解能X線非弾性散乱などをあげることができる。

このような次世代型のX線光源とその利用に向けての提案や検討作業は1984年頃から公式の場で討論されるようになった。このきっかけを与えたのは1982年春に完成し、1983年度から一般公開利用を開始したPFの活動、とくに1983年春に運転を始めたアンジュレータとウィグラーの成功である。このような流れは欧米でも同時に進行していたが、わが国では、84年から86年にかけてフォトンファクトリーシンポジウム、学術振興会第145委員会、フォトンファクトリー懇談会、関西6 GeV-SR計画世話人会などがそれぞれ提案や検討の場を提供し、建設場所に関係なく技術的な可能性や施設の必要性の検討を進めていた。このうち、関西6 GeV-SR計画世話人会は、後述の科学技術庁大型放射光施設が兵庫県に建設される見通しがついた1988年に解散した。これらの討論や検討の結果は以下の資料に公表されている。

- 1) 第2回フォトン・ファクトリー・シンポジウム予稿集 (1984年11月, 筑波大)。
- 2) 第3回フォトン・ファクトリー・シンポジウム予稿集 (1985年11月, 東大教養)。
- 3) X線領域における放射光科学の展望, KEK Report 85-16, 編集: 菊田惺志, 下村理, 松下正 (1986年2月)。
- 4) 放射光将来計画の検討-ストレージ・リングの設計, KEK Internal 85-16, 編集: 神谷幸秀, 木原元央, 北村英男, 小早川久 (1986年2月)。

- 5) Basic Design Concept of a High-Brilliance X-ray Source, KEK Internal 86-15  
編集: 小早川久, 安藤正海, 神谷幸秀, 北村英男, 松下正, 中原和夫 (1986年10月)。

一方このような状況を背景に、科学技術庁は1985年に航空・電子等技術審議会に「新材料研究開発に係る計測及び制御技術の高度化のための重点課題及びその推進方策について」諮問(第9号)し、1986年3月に答申された。続いて1987年7月には「光科学技術の高度化に関する総合的な研究開発の推進について」(諮問第11号)の答申がなされた。これらの答申はその推進方策の一つの柱として放射光の利用をあげ、更に進んで6~8 GeV級の大型施設の建設を提案している。この答申を受けて科学技術庁は日本原子力研究所と理化学研究所を主体とする「大型放射光施設研究開発共同チーム」を発足させ、この施設の建設準備とこれに要する開発研究を行った。また、科学技術庁・文部省、および学識経験者からなる「大型放射光施設整備連絡協議会」(座長: 黒田晴雄東大教授)が、1987年この計画の意義と実施の方策について協議した。そして、同庁は1989年に正式に兵庫県播磨科学公園都市内を同施設建設候補地と決定した。§2に要約するSPring-8の計画はこの流れを汲む活動の現在の状況である。

他方PFでは1987年度から6 GeVのARの利用を開始した。現在2本のビームラインに5台の実験ステーションを設置して、高エネルギーX線の利用を積極的に実施している。この中には既に述べた円偏光アンジュレータのビームラインも含まれており、これらは第3世代型X線放射光の先駆となる研究といえる。その後さらに、次の段階としてのMRの放射光利用計画が日程にのぼってきたが、その検討結果は以下の資料に報告されている。

- 1) シンクロトロン放射光科学の将来計画の調査, 昭和61年度文部省科研費総合研究(B)

(代表者 千川 純一)報告書(1987年3月)。

2) 放射光科学の将来計画のための研究, 昭和62年度文部省科研費特定研究(1)

(代表者 千川純一) (1988年3月)。

3) トリスタン主リングの放射光利用計画, KEK Report 88-16, 編集: 安藤正海, 小早川久, 大隅一政 (1989年3月)。

このMR利用計画に関しては § 3 で述べる。

### 1.5 低エミッタンス光源加速器の問題点

以上述べたように大型高輝度放射光施設は、X線源としてのアンジュレータを中心とするものを志向しているため施設が巨大化する、という難点のほか、技術的にも多くの開発課題がある。そのうち最も厳しい制約は、上述のようにアンジュレータの性能をフルに発揮させるためには、従来に比べてはるかに低いエミッタンス(<10nmrad)の電子ビームを実現する必要がある、ということである。このような低エミッタンスの電子蓄積リングは従来なかったもので、1984~5年頃欧米諸国の大型光源加速器設計者が設計を始めてみると、ビームを入射蓄積できる安定な軌道領域(ダイナミックアパーチャー)が狭くなって極度に運転しにくい、ということが明らかになった。これを打開する努力はその後何年もかかって進められ、1988年初めまでに欧米の設計者はいずれも低いエミッタンスと十分大きなダイナミックアパーチャーとを両立させる解を見だし、少なくとも理論的には問題は解決した。また1987年暮れにはスタンフォード大学で、高エネルギー実験用の14 GeVの $e^-e^+$ 衝突リングPEPに若干の改造をおこなった後、7 GeVで運転して電流値は未だ不十分とはいえ5 nmrad程度の低エミッタンスのビームを実現した。このことは、低エミッタンス光源加速器実現に明るい見通しを与える結果となった。またトリスタンMR(現在30 GeVで運転中)を10 GeV以下で運転し、これにダンピングウィグラーを併用した場合、理論的には1 nmrad

以下の超低エミッタンスが得られる、という計算結果も示されている(後述)。ただし、以下に述べるように、理論的に可能な低エミッタンスビームを実際に安定にまわせるか、というのはまた別の問題である。(付録2参照)

このほか、ビームの安定性を確保するための計測・制御技術、高周波の発生と伝播、空洞共振器、真空技術など、研究開発を要する加速器技術課題は多く残されている。また放射光利用技術にとっては高輝度X線を受ける光学素子、光学系の熱負荷の問題は最も深刻で、現存技術を格段に超える新手法、材料の開発が求められる。そのほか検出器、分光素子、マイクロビーム光学系等の利用技術にも多くの革新が求められている。このような放射光発生技術・利用技術は、放射光研究全般に新たな概念と高度な研究段階を画するもので、現在の第2世代後に到来する一つの新しい世代誕生とあってよい。

### 1.6 世界の大型高輝度放射光計画

第3世代型の高輝度X線用放射光施設の建設は世界の潮流である。欧州連合(EC)は各国の放射光施設が活動の最盛期を迎えた1970年代の後半に、ECが共同建設する大型放射光施設に向けて準備を始めた。そして、1980年代に入ってその施設の性格は明確に第3世代型、つまり挿入型光源を主力装置とする最適化された光源加速器を志向するものとなった。政治的にも技術的にも多くの曲折を経て、この計画は1988年1月にEuropean Synchrotron Radiation Facility(ESRF)として加盟5ヶ国の参加のもとに承認され建設を開始した。参加国は1990年1月現在11ヶ国で、建設地はグルノーブル(仏)、利用開始予定は1994年後半、エネルギーは6 GeVである。

一方、米国でも次世代型の大型高輝度放射光施設計画は1980年代前半に複数の施設から提案があり、米国科学アカデミー、エネルギー省(DOE)等の調整を経てAdvanced Photon Source

(APS)として、イリノイ州のアルゴンヌ国立研究所内に設置が決まり、1989年10月から正式に活動を開始した。エネルギーは7 GeV (将来7.7 GeVまで増強可能)、利用開始予定は1995年後半である。米国にはこの他にスタンフォード大学のPEPを光源に転用する計画があり、すでに一部の長直線部にはバイパス方式で数本のビームラインが設置されている。前述のように光源用に磁石配列を組みかえて7 GeVで低エミッタンス運転を行い、アンジュレータの光を観測する実験が

1987年12月に試みられ、所期の成果を上げている。

わが国の大型高輝度放射光施設計画は科学技術庁のSPring-8とトリスタンMRの放射光利用の二つである。それぞれ上記欧米の施設と異なる特長があるが、第3世代型の施設を目指す、という点では共通である。次章以下、これら両計画の内容を示し、最後にこの両計画に関する特別委員会の評価と、その実施に当たっての学会の要望をまとめて述べる。

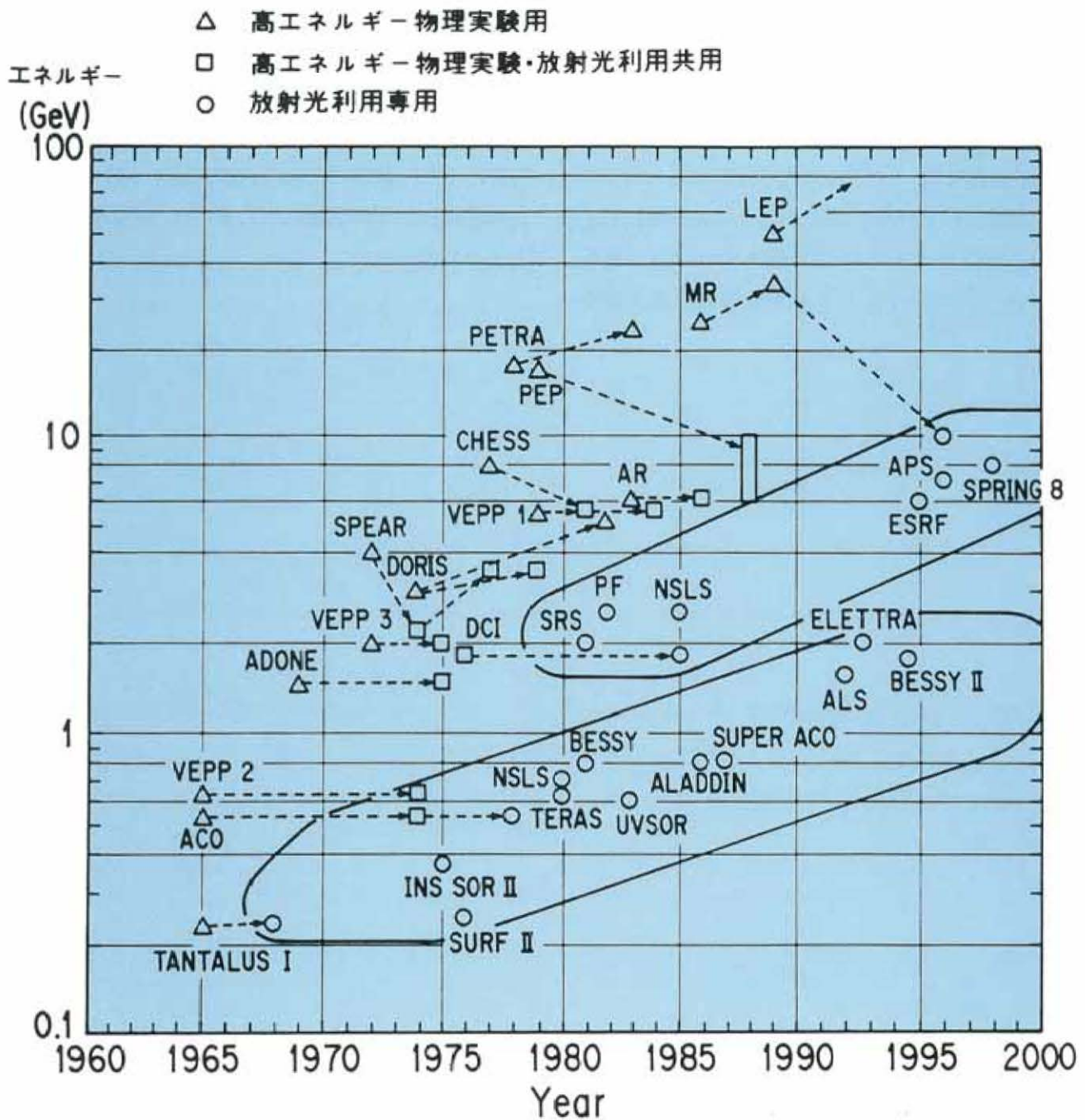


図1-1 世界の電子(陽電子)蓄積リング発展の歴史  
 実線の囲いの中は光源として運転(専用または共用)されているものを示す。



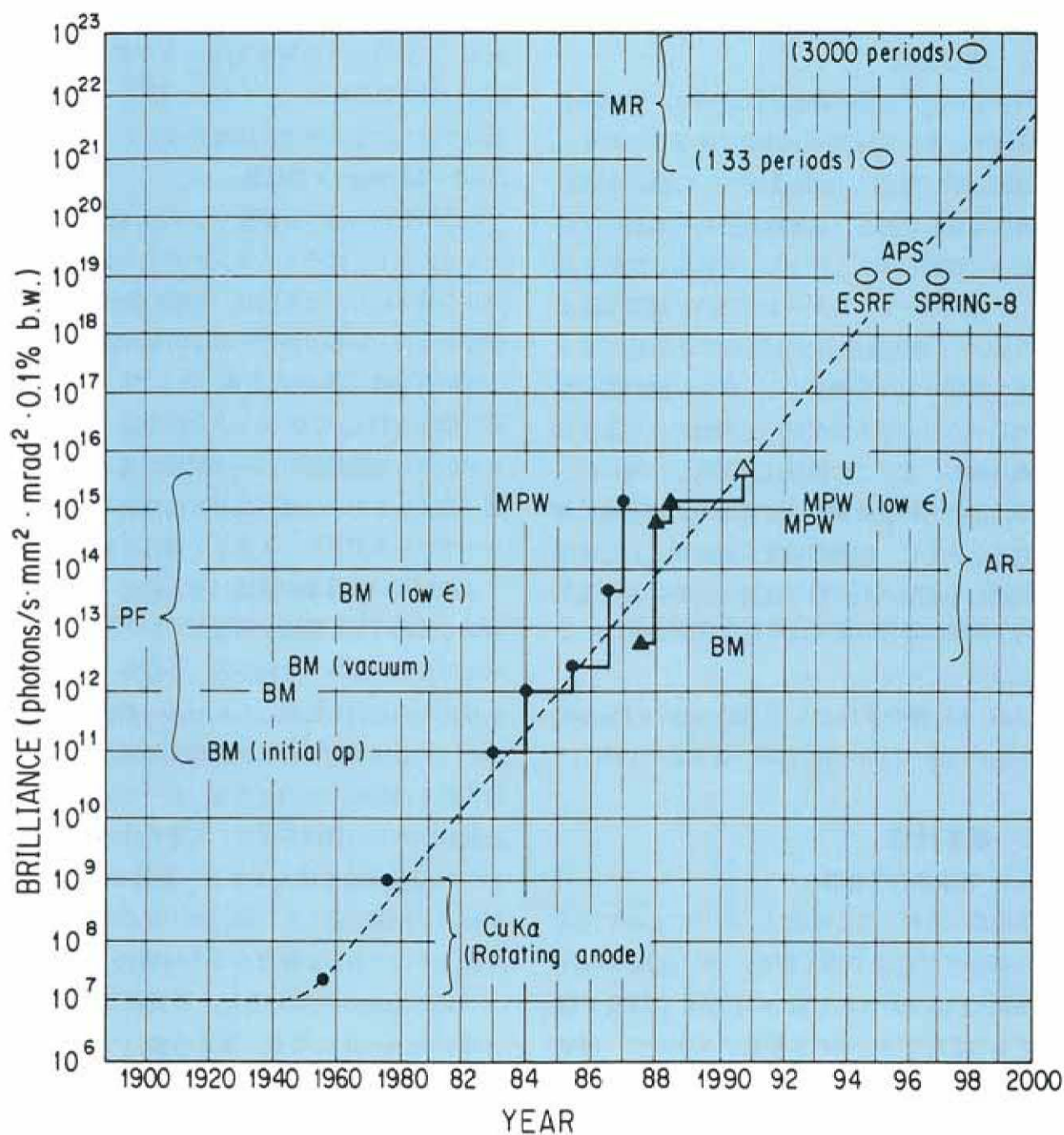


図1-2 PFにおける光源の輝度向上の歴史 (波長0.1 nm)

## § 2 科学技術庁大型放射光施設 SPring-8 計画

### 2.1 はじめに

科学技術庁の大型放射光施設計画は、日本原子力研究所と理化学研究所が共同で推進しており、短波長領域（波長 1 nm 程度以下）に重点を置いた高輝度放射光源を、兵庫県西播磨の播磨科学公園都市に建設しようというものである。放射光源としては、電子エネルギーが 8 GeV、蓄積電流が 100 mA で、挿入光源 36 本を装着できる低エミッタンス蓄積リングを建設する。なお、偏向磁石からのビームラインも 17 本以上を利用できるように計画されている。この施設は、完成した暁には、大学、国公立研究機関及び産業界の共同利用に供されるとともに、国際的研究交流の場として外国研究者にも開放され、科学技術の分野における基礎的、先導的研究の振興に重要な役割を果たすことを目指している。

なお、本計画の愛称として、SPring-8 (Super Photon ring-8 GeV) の名がつけられている。

### 2.2 基本仕様

#### 2.2.1 要求される性能

本施設の目標とする性能は、第 1 に 1 keV 付近から 25 keV 付近までの X 線を、 $10^{19}$  (photons/s · mm<sup>2</sup> · mrad<sup>2</sup> · 0.1% b.w.) 以上の輝度で提供することができ、それより高いエネルギー領域についても充分高い輝度の X 線を発生できることである。第 2 に、このような高輝度 X 線を発生する挿入光源を、できるだけ多数設置するという方針をとり、光源となる蓄積リングは、電子エネルギーが 8 GeV、蓄積電流が 100 mA、電子ビームのエミッタンスが 10 nmrad 以下になるように計画されている。標準的な挿入光源は 4 m 程度の長さのものが考えられている。特に輝度の高い X 線や軟 X 線のために、長い挿入光源 (30 m 程度) を装着できる長直線部が 4 ケ所に設置される。また、

不安定性を極力避けるための陽電子の利用を計画の初期から準備し、さらに多バンチ及び単バンチ運転が可能ないように加速器の設計が行われている。なお、このリングの特性光子エネルギーは 28.32 keV (特性波長 0.44 Å) である。図 2-1 にこの施設で得られる放射光の輝度スペクトルを示した。

#### 2.2.2 SPring-8 の概要

以上の要求に基づき蓄積リングは、磁石配列(ラティス)としてはチャスマン・グリーン型の単位セルを基本にし、セル数 48、周長 1436 m である。単位セルは、磁場の強さ 0.67 T の偏向磁石 2 基、4 極磁石 10 基、6 極磁石 7 基、そして 6.5 m の直線部で構成される。なお、リング全体では、隣りあった単位セルの直線部のベータ関数が交互に大きい値(高β)と小さい値(低β)になる、24 対称のハイブリッド型ラティスとして運転される。

4 本の長い直線部の構成は第一段階では基本形の 48 セルのうち 4 箇所単位セルから偏向磁石 2 基だけを取り除き、4 極磁石、6 極磁石はそのまま単位セルと同じ配置にしたセル(直線セル)を作り、それを基本にして長直線部を実現する。建設後暫くは直線セルのままで、ビーム光学的には 24 対称 48 セルの構成を保持して運転する。その後充分な運転実績を積んでから、直線セルの 4、6 極磁石を配置し直して、30.4 m の長直線部が実現するようにする。直線セル 4 本の場合のエミッタンスは 7.2 nmrad であるが、長直線部にしたときは 8.5 nmrad になる。後者の値はなお検討の余地があるが、すでに設計上目標とする低エミッタンスの領域に入っている。

加速空洞はシングルセル型を開発しており、周波数は高エネルギー物理学研究所トリスタンで使用している 508.58 MHz が採用される。加速空洞は通常セルの直線部 4 箇所に設置されるが、将来さらに、高周波加速空洞も 1 箇所設置することが検討されている。

蓄積リングへの入射は全エネルギー入射方式で行い、入射器として 1 GeV 電子リニアックと、

8 GeV 電子シンクロトロンが用いられている。リングには最終的に陽電子を蓄積する予定で、そのため、別に陽電子生成用の電子リニアックが建設される。入射用電子リニアックの主な仕様は、繰り返し周波数60Hzで、平均ピーク電流は電子で100mA、陽電子で10mAであり、パルス幅が1 ns~1  $\mu$ s である。陽電子生成用電子リニアックの主な仕様は、エネルギーが0.25GeV、繰り返し周波数が60Hzで、ピーク電流が10A、パルス幅が1 ns~10nsである。共に加速周波数は2856 MHzである。

電子シンクロトロンは、入射エネルギー1 GeV、最大エネルギー8GeVで、FODO型のセル40で構成されている。入射、取り出し用に、それぞれ偏向磁石を6個づつ抜いた直線部を2箇所設けてある。加速高周波の周波数は蓄積リングと同じく508.58MHzで、加速空洞は多連セル型を採用し、2箇所の直線部に分けて設置される。偏向磁石磁場の強さは0.106 T (1 GeV)/0.85T (8 GeV)で、1 Hzで繰り返す。周長は396mで、最大電流10mAである。

表2-1, 表2-2, 表2-3に、それぞれ蓄積リング、電子リニアック及び電子シンクロトロンの主要なパラメータをまとめてある。

### 2.2.3 ビームライン

蓄積リングには6.5m直線部が40本、長直線部が4本ある。このうち、通常の低 $\beta$ 直線部5本が高周波加速空洞の設置に使われ、高 $\beta$ 直線部1本が入射に用いられるので、実際に挿入光源に使用できるのは高 $\beta$ 直線部が19本、低 $\beta$ 直線部が15本の合計34本である。一方、長直線部は当初2本がマシンステタディに使われる予定で、挿入光源用として2本が初めから利用可能である。また、偏向磁石から取り出すビームラインの本数は、当面17本の予定である。このうち、蓄積リング完成時迄に建設整備するものは、挿入光源ビームラインが6本、偏向磁石ビームラインが4本の予定である。残りのビームラインは、その後逐次整備され

る予定となっている。

ビームラインの長さは、光源の出口から最後端まで80mである。さらに長いビームライン(長尺ビームライン)が必要になる場合に備えて、300m及び1000mまで延長可能なスペースを、それぞれ8本(挿入光源4本、偏向磁石光源4本)と3本(挿入光源2本、偏向磁石光源1本)が用意されている。このうち、長直線部からのビームラインが1本ずつとってある(図2-2)。各ビームラインの基幹チャンネルは、光源出口から約30mまでが遮蔽壁の中にある(図2-5参照)。

広い照射野が必要な場合や平行度の高いビームが必要な場合に、長尺ビームラインが用いられる。しかしこれ以外にも、幾つかの実験装置をシリーズに配置してビームラインの有効利用を図る場合や、大がかりな特殊実験設備あるいは特殊環境エリアのために、独立した建物が必要な場合にも、長尺ビームラインが使われるであろう。ただ現在のところ、第一期のビームライン建設計画には、長尺ビームラインの利用は入っていない。

### 2.3 SPring-8の特徴

現在、世界で建設中の大型高輝度高エネルギー放射光源は、ヨーロッパ連合のESRF(European Synchrotron Radiation Facility)、米国のAPS(Advanced Photon Source)、そしてSPring-8の3施設である。これらの性能を、設計値と比較したものが表2-4である。3施設の中でSPring-8は次のような大きな特徴を有している。

- 1) 挿入光源を設置できる直線部の数が最も多い。ESRFは29、APSは34、SPring-8は38である。
- 2) 挿入光源で得られるX線のエネルギーが最も高い。

例えば周期長3 cm、 $K=1$ のアンジュレータで得られるX線のエネルギー(第1次光)は、ESRF 7.6keV、APS 10.3keV、SPring-8 13.5keVである。さらにウィグラーにより最



も高エネルギーのX線が得られる。

### 3) 長直線部を持っている。

- ① 挿入光源で得られるX線の輝度が最も高い。  
例えば30mの長直線部に繰り返し数900の挿入光源を設置すれば $10^{20}$  (photons/s · mrad<sup>2</sup> · mm<sup>2</sup> · 0.1%b.w.) の輝度を実現できる。
- ② 軟X線用の挿入光源の設置、及びこの領域の自由電子レーザーの開発ができる。
- ③ 複数の種類、あるいは複合型の長い挿入光源を設置できる。

## 2.4 利用計画

### 2.4.1 利用形態

ビームラインの利用には4つの形態が考えられている。すなわち、(1)一般的な共同利用、(2)特別に推進すべき課題を対象にした特定研究、(3)特定のグループによる占有、(4)分析サービスの4つである。第1は、研究手段、測定手法などに従って整備されたビームラインを、研究課題を採択された研究グループが利用する方式で、これまでわが国で行なわれてきた共同利用の方式である。第2は、特別に推進すべき研究課題について研究チームが組織され、その研究チームがビームラインを一定期間占有、使用する方式である。先端的な研究や新しい測定法の開発などはこの方式で行なわれるであろう。この形態は欧米の放射光施設では最も一般的である。わが国でも同様の例がないわけではないが、第一の利用形態がほとんどで、研究活動が短期間に限定されるため、一つの研究領域・課題で長期的に研究を深める機会に乏しくまた技術的に困難な先端的課題への挑戦が難しくなるきらいがある。この方式を重視することにより研究の質を高める努力をすべきであろう。第3は、ある特定の機関が自己の費用でビームラインを整備し、一定期間占有してその機関の諸研究に利用する方式である。この方式は米国ブルックヘブン研究所のNSLSで全面的に採用されており、わが

国でも高エネルギー放射光実験施設PFで官民合わせて数本のビームラインで実施されている。強力な外部ユーザーの自主的な研究活動の展開をはかるという意味で概ね成功している。第4は、需要が恒常的に見込まれる特定の分析、解析について専用のビームラインを整備し、費用を徴収し分析サービスを行うもので、信頼のおける測定スタッフの確保が重要である。この方式は少なくともわが国では初めての試みで、従来から多くの民間企業から要望の強かったものである。運営主体が公益的な機関となることで、この方式が可能になると期待されており、成果が注目される。

### 2.4.2 研究課題

本施設のいわゆる次世代型の高輝度光源の特長をフルに生かした研究課題については、次世代大型X線光源研究会\*、ならびに大型放射光施設計画推進共同チーム(原研・理研)において調査・検討されている。現在研究課題の提案を行っているグループ名を次に掲げるが、これらは研究経緯の違いによってその名称に統一性はない。ここでは便宜上次のカテゴリーに分けておく。

\* 菊田惺志、藤井保彦、日本放射光学会誌「放射光」第2巻、第2号(1989)75；同誌第2巻、第4号(1989)83。

#### (1) 観測対象・事象別

1. 界面・表面
2. 極端条件
3. 構造相転移
4. 固体電子物性
5. 化学反応
6. 原子・分子
7. 生体高分子(結晶)
8. 生体高分子(非結晶)
9. 医学応用
10. アクチノイド

- (2) 相互作用別
  - 11. 核励起
  - 12. 核ブラッグ散乱
  - 13. 磁気散乱
  - 14. 非弾性散乱
  - 15. 光音響・光-熱分光
- (3) 観測方法別
  - 16. XAFS
  - 17. トポグラフ
  - 18. 散漫散乱
  - 19. 極小角散乱
  - 20. 分析
  - 21. X線顕微鏡
- (4) 利用エネルギー別
  - 22. 軟X線光化学
  - 23. 軟X線アンジュレータ (固体)
  - 24. 赤外物性

以下は、上記24グループにより提案されている課題を分類し直したものである。

## I. バルク固体 (主に無機物)

### I.1 結晶構造解析

#### I.1.1 平均構造

##### 1) 微小試料体積 [ $< (1 \mu\text{m})^3$ ]

- ① 自然界に極微量しか存在しない物質 (隕石中の鉱物等)
- ② 放射性, 高価 (アクチノイド系) な物質  
アクチノイド化合物はランタノイド化合物と同様, 重い電子系の物質として, 超伝導機構あるいは磁気的性質等に特異な挙動を示し, その電子構造の解明が重要である。アクチノイド化合物の化学結合状態, 混合原子価状態, 及び構造の解析を進め, 電子状態と諸物性との相関を追求する。
- ③ 極限状態下 (100GPa以上の超高压物性, 地球下部マントル物性)  
超高压により原子間距離を縮め, 原子間の

相互作用をコントロールすることにより起きる相転移や電子転移に伴う構造変化を測定する。超高压力発生のためには試料が微小にならざるを得ず, また, 圧力媒体や利用容器などによる吸収効果や試料の反応を避けるために, 高輝度・高エネルギー (100-150keV) X線の利用が不可欠である。

#### 2) 短寿命元素・化合物

たとえばアスタチン (半減期7時間) の圧力誘起金属化・相転移現象等

#### 3) 薄膜

高分解能, 高輝度の特長を利用して, 種々の薄膜の評価を行う。特にMBE法で作成した半導体, 金属, 酸化物等の人工格子における平均構造, 界面構造の研究, 及びその構造相転移の特異性を調べる。

#### 4) 高運動量分解能による相転移観測 (整合-不整合)

誘電体や合金等における整合-不整合相転移前後における平均構造の決定を行う。この場合, 不整合度が0.01以下のこともあり, またディスクコメンシュレーションも生じるので, 高運動量分解能の測定が必要である。

#### I.1.2 乱れた系

##### 1) 相転移に伴う構造的揺らぎ

金属, 誘電体, 半導体, 超伝導体, 分子性結晶, 液晶等における秩序パラメータの決定, 及びその相転移を定める微視的な相互作用の性質を解明する。異常分散も利用する。

##### 2) イオン照射による欠陥生成過程のその場観察

電子・イオン照射用加速器を設置し, その場観察を可能にする。特に極低温 (または任意温度) で照射を行い, 格子の乱れを凍結した状態 (または照射温度) で測定を行い, 「乱れ, 揺らぎ」の形成, 及び回復の素過程を調べる。

##### 3) 極微小欠陥観察

従来の線源では得られない高輝度, 高空間分解能によって, 完全性の高い結晶中の極微小欠

陥の検出, 及び構造の同定が可能となる。

① シリコン等の半導体単結晶の評価

② 極微小欠陥の構造の同定 (解析)

#### 4) 重元素結晶の評価

従来の線源では得られない高エネルギーX線の利用によって, 重元素結晶の透過観察が可能となり, その評価, 及び欠陥構造の解析が可能となる。

① III-IV族化合物半導体, W, Mo金属単結晶等の評価と欠陥構造の解析

#### 5) 高度に乱れた結晶の評価

高輝度, 高エネルギーX線, 及びマイクロビーム技術の利用によって, 散乱ラジオグラフィの高分解能化, 迅速化が可能となり, 従来完全性の高い結晶に限定されていた観察対象を乱れの大きい実用材料にまで広げることが可能となる。

① 高温超伝導体の評価, 欠陥構造の解析

② 各種新機能実用材料の評価, 欠陥構造の解析

③ 木材, 骨などの生体高分子材料の評価

#### 6) 極限状態下 (高密度プラズマ, 及び熔融塩)

物質を液体気体臨界点以上の高温高压下におくと, 物質の密度を連続的に広い範囲で変化させることができ, 金属, 半導体, 絶縁体, さらにプラズマ状態へと変化する。この電子状態の変化による構造の変化の研究が高エネルギーX線を用いることにより可能となる。熔融塩や合金等の2成分以上の流体に対しては, 単色X線を用いた角度分散法により, 吸収端近傍のいくつかの波長における異常分散を利用して, 各成分毎の部分構造を決定することができる。

#### I.1.3 メゾスコピックな構造

低エミッタンス挿入光源と長尺ビームラインを利用して, 通常の散乱角から極小角 ( $10^{-5}$  rad) までの散乱強度を測定し, 0.3nmから10 $\mu$ mの長さにあたる密度相関関数を求め構造を決定する。多重散乱が問題となる従来の光散乱法に対して, X線法は運動学的回折が保証されるので, 直接密

度相関関数を求めることができる。この長さのスケールはミクロな分子からマクロなパターンをカバーしており, 従来研究が進んでいなかった物質系の研究が可能になる。

1) 高分子, コロイド, 長周期金属・合金, ガラス等の構造, 及び高次組織・凝集構造

2) 非線形非平衡系の構造形成 (流体, 液晶等)

3) 相転移に伴う長波長揺らぎ

4) 超微粒子・マイクロクラスターの構造

10nm以下の微粒子の構造, または結晶中に存在する10~100nm程度のメゾスコピックな構造と母結晶の構造関係を調べ, その特異な構造相転移の機構を解明する。

## I.2 動的構造解析

時間的に遅い現象 (GHz以下) に関しては, 時分割観測法, それより早い現象に対しては, その時間相関のフーリエ変換であるエネルギースペクトルを観測するエネルギー分析法 (非弾性散乱) 法を用いる。

### I.2.1 時分割測定

1) レーザーアニーリング等による高速融解・結晶化過程の観察

2) 極端条件下における格子欠陥等の動的挙動 (量子固体中の転位の運動, 融点直下における格子欠陥の挙動, 高压下における格子欠陥の挙動)

3) 衝撃圧縮後の構造の緩和

放電によって試料中に大電流を流すとジュール熱による超高温とピンチ効果によって高压が発生する。数10ns間の衝撃圧縮状態後, 物質は $\mu$ sからmsのオーダーで物理的・化学的な緩和過程を示す。放射光X線の繰り返しパルス性と平行性, 高輝度を生かして, 極短時間のうちに起こる過渡現象を追跡する。

4) 反応中間体の分子構造の解明

従来, 反応中間体の研究は分光学的方法のみによって行われてきたが, 高輝度放射光を用い



たその立体構造解析により、化学反応過程の詳細かつ本質的な議論が可能となる。

#### 5) 励起状態での電子状態の解明

紫外から軟X線領域の放射光、またはレーザー光により分子を励起した状態で、その電子密度を解析し、励起状態の電子状態を求める。電子密度解析技術の進歩により、数%~10%の電子が励起状態にある分子の電子密度解析も可能になる。

#### 6) 相転移過程における中間相の構造解析

##### I.2.2 非弾性散乱

表面を無歪みに特殊加工した擬球面完全結晶を、 $1-10\text{meV}$  ( $\Delta E/E \sim 10^{-7}$ ) の超高エネルギー分解能をもつモノクロメータ、及びアナライザーとして用いることにより、約  $10^{10}$  photons/s/mm<sup>2</sup> の光子束を試料上に集光可能であり、これにより他の手段では到達できないエネルギー対運動量空間を探索できる非弾性散乱実験が可能になる。

- 1) 中性子散乱法と相補的役割 (微小結晶、中性子吸収断面積の大きな物質)
- 2) 極端条件下に置かれた微小結晶の動的性質
- 3) 0.1-1eV領域の素励起 (プラズモン、エキシトン等)、コンプトン散乱、ラマン散乱

##### I.3 磁気構造解析

X線の磁気散乱 (磁気ブラッグ、磁気吸収端分光、磁気コンプトン散乱、磁気ラマン散乱、磁気X線光電子分光等) による研究は、放射光の有する従来のX線源にない偏光特性と、高輝度特性とを最大限に活用する研究分野であり、放射光により初めて行い得る新しい研究手段である。マクロ・ミクロの磁化分布、電子スピン運動量分布、超強磁場下の磁化過程の観測等が計画されている。

- 1) 中性子吸収断面積の大きい微小物質 (稀土類、アクチノイド系)
- 2) 高運動量分解能
- 3) 磁性電子の運動量分布

4) スピン、軌道磁気モーメントの分離

5) 超高磁場 (パルス) 中の磁性

6) 磁気カー効果、磁気X線二色性

#### I.4 電子構造解析

##### I.4.1 軟X線領域

大曲率回折格子分光計を開発し、高輝度アンジュレータ光の利用により、軟X線領域 (0.2-3 keV; 軽元素 1 s, 第1遷移金属 2 p, 希土類 3 d 準位が関与) における高分解能 ( $\Delta E/E = 10^{-4} \sim 10^{-5}$ ) の吸収・反射測定、光電子分光を行い、固体 (半導体、絶縁体、磁性体、高温超伝導体等) の電子状態について知見を得る。

##### I.4.2 内殻励起領域

0.5~3 keVの内殻励起領域で、光吸収、反射、光電子収量、光電子分光等を高分解能で行い、電子帯構造や電子相関あるいは励起状態の緩和等、多電子間相互作用を明らかにする。この他、高強度励起 (中間分解能) によって発光や光イオン脱離過程等を研究する。

- 1) 相転移とそれに伴う電子状態の変化 (高分解能分光  $\Delta E/E \sim 10^{-4}$ ) 高温超伝導体、電荷密度波、モット転移、パイエルス転移等
- 2) 強磁性体のスピン偏極光電子分光と円偏光二色性吸収

光電子、オージェ電子、二次電子等のスピン偏極を、温度をTc付近で変えて測定し、スピン交換相互作用の動的振舞を明らかにする。

軟X線円偏光吸収や光電子放出の二色性より、スピン交換相互作用や多体効果を明らかにする。

- 3) 非磁性原子内殻円偏光励起によるスピン偏極光電子回折 (強磁性、反強磁性体)
- 4) エネルギーを内殻励起にチューンした種々の共鳴現象 (アンジュレータの同調性の利用)

##### I.4.3 赤外領域

- 1) 極微小エネルギーギャップの電子構造

価数揺動・重い電子系等の特異な挙動を示す磁性化合物の電子構造の理解には、磁場・圧力

等の極端条件下での赤外分光研究の遂行が不可欠である。高輝度赤外線光源としての8 GeV リングの性能はこの種の研究に要求されている  $f = 20$  程度の極めて暗い分光系での観測を初めて可能にする。

## II. 表面・界面

表面・界面によるX線の回折散乱現象は、1回散乱(運動学的回折)で記述できるので、X線回折散乱法で得られたデータの解析は、多重散乱を考慮しなければならない電子回折法等に比べ容易であり、かつ精度が高い。ところが1回散乱であるが故に、散乱強度は極めて弱く、反射率で言えば $10^{-9}$ 程度である。このため高輝度光源は不可欠である。

### II.1 構造(原子配列)

#### II.1.1 平均構造, 局所構造

表面・界面の2次元周期構造からのX線散乱強度は、ロッド状に分布するので、ロッドに沿った散乱強度の変化から原子配列を求めることができる。いくつかのスポットに着目し、温度変化等から相転移現象の研究も可能である。

- 1) 清浄表面(再構成)
- 2) 吸着系

結晶表面に物理的または化学的に吸着した原子、分子の2次元構造とその特異な構造相転移を調べる。また、表面融解→ラフニング転移の機構も解明する。

- 3) 低次元系の相転移
- 4) 触媒・化学反応過程
- 5) 界面評価(機能との関連)

#### II.1.2 乱れた構造

スポットのプロファイル、ロッドに沿った散乱強度分布等から平均構造からのずれを測定できる。

- 1) ステップの粗さ, 歪場, 転位

従来の線源では得られない高輝度, 高空間分解能によって, 表面・界面構造の観察が可能と

なる。

- ① 半導体結晶などの表面の欠陥構造の解析
- ② 各種界面の欠陥構造の解析

#### 2) ドメイン構造, 偏析

I. 1. 2. 5) と同様のラジオグラフィの利用によって, 表面・界面, および薄膜におけるドメイン構造の解析が可能となる。

### II.2 動的挙動

結晶成長, 化学反応過程等時間的な変化を追う実験や, 表面付近の原子の温度因子の測定も可能になる。表面に固有なフォノンモードの測定等の可能性もある。

- 1) 表面フォノン, プラズモン
- 2) MBE 等での結晶成長過程のその場観察

高光子束, 高空間分解能によって, MBE 等による結晶の成長過程の実空間における高空間分解能分割観察が可能となる。

- ① 半導体等のエピタキシャル成長過程
- ② 各種人工格子の成長過程

### II.3 磁気構造

I. 3. と同様の手法により表面・界面に固有なスピン配列, 磁気相転移の測定が可能になる。

### II.4 電子構造

#### II.4.1 光電子分光

表面敏感な光電子分光の手法で表面が変化しない短時間のうちに表面電子状態を調べる。イオンビーム散乱, LEED, RHEED 等と組合せ, 表面の緩和に伴う原子配置の変化とそれによる表面電子状態の微小な変化を検出する。また, X線光電子分光による固体表面, 界面の電子状態, 固体表面における光脱離, 内殻励起状態を経由する光化学反応等の研究を行う。

- 1) 表面再構成と内殻準位シフト
- 2) 表面吸着超格子の電子状態
- 3) 表面磁性と電子状態

- 4) 非磁性体表面からのスピン偏極光電子放出
- 5) 表面に固有な相転移
- 6) 表面新物質相
- 7) 磁性超格子

#### II. 4.2 コンプトン散乱

表面原子によるコンプトン散乱の測定から、運動量分布の測定が可能になる。散乱X線と散乱電子の同時計測から3次元的な運動量分布の決定が可能である。

#### II. 4.3 吸着層の電子状態

高輝度赤外線により、金属・半導体表面での吸着層の電子状態を広範囲のエネルギー領域に現れる振動スペクトルの解析から研究する。

### III. 生 体

#### III. 1 高分子 (結晶・非結晶・溶液)

##### III. 1.1 構造解析

- 1) 巨大蛋白, ウイルス (分子量数百万, 格子定数100nm)

挿入光源からの強いX線により、回折強度の弱い巨大複合タンパク質、ビールスの構造研究を行う。また、光源の低エミッタンスと強さを利用して、現在、構造研究の不可能な1 $\mu$ m程度の大きさの結晶の構造研究を行う。同時に、ラウエ法等によってms以下の時間分割で回折実験を行い、酵素反応過程を解析する。

- 2) 微小結晶, 細胞内微小生体高分子結晶体

アクチン繊維, チューブリン, インシュリンやヘモグロビンは細胞内で微小で極めて規則性の高い構造体を形成することがある。高輝度マイクロビームを用いることで、これまで回折実験の対象となり得なかった微結晶体の構造研究が可能となる。

- 3) 超希薄溶液中の一粒子からの散乱 (空間平均化されていない情報)

十分少数ない粒子からの“snap shot”は粒子の配向の偏りによる効果を見せる。超希薄微量溶液に対し $\sim 10^{13}$  photons/mm<sup>2</sup>/sの高輝度

ビームで1ms内の測定を行い、空間的に平均化されていない情報を得る。

- 4) 酵素反応や超分子の高次構造形成と解体の動作原理

$\sim 10^{13}$  photons/mm<sup>2</sup>/sの高輝度ビームを用い、中・高角領域にまでわたって精度のよい散乱像を1ms以下の時間分解能で記録することで、酵素反応等生体高分子の構造変化を二次構造レベルで理解することが可能となる。

- 5) 円偏光利用によるカイラルな生体物質の情報  
右回り円偏光と左回り円偏光に対するそれぞれの散乱強度の差を十分な精度で求めることで、ヘリックスの巻き方向 (右巻き, 左巻き) 等のカイラルな物質の構造 (0.1~100nm) に関する情報を得る。

- 6) 軟X線利用, 多波長解析による自動構造解析法の確立

多量にP原子を含む生体膜や核酸物質, S原子を選択的に修飾した蛋白質に対し, P, SのK吸収端前後で散乱実験を行うことで、コントラスト変調法や重原子置換法が導入できる。1 $\times$ 1mm<sup>2</sup>以下の窓をもつ試料セルと高輝度マイクロビームを組み合わせることで、生体試料の真空下設置が可能となる。

##### III. 1.2 動的挙動の解析

- 1) ラウエ法時分割解析

III. 1. 1. 1) 参照

- 2) 生理学的条件と同一の単一筋繊維による時分割回折実験

筋肉の張力発生の分子メカニズムの解明には、収縮幅の筋細胞間の不均一性を避けるため、幅0.1mm程度の単一筋繊維細胞の使用が不可欠である。高輝度マイクロビームを用いることで単一筋繊維による0.1ms以下での時分割測定が可能となる。

##### III. 1.3 X線顕微鏡観察

時間分解能1msで生体分子・組織の動的挙動を測定することを目的とする。エネルギー領域

(0.1-3 keV), 空間分解能10nm, 光子数 $10^{13}$  photons/s以上を必要とする。ビームサイズのマイクロ化, 時間分解能の向上(1ms以下)のために高い光子輝度が望ましい。3次元解析のために, X線ホログラフィが望ましいが, そのためにはコヒーレンスの高い放射光が必要である。

## III. 2 人 体

### III. 2. 1 医用画像

#### 1) K-吸収端エネルギー差分冠動脈造影

造影剤のK吸収端の上下におけるX線吸収係数の差を利用する。従来の冠動脈造影法に比し, 静脈法によって検査の際の安全性が高まる事が期待できる。放射光の単色化以外に, 放射光による蛍光励起のX線も線源として考える。

#### 2) 単色X線CT

単色度がきわめて高いX線を利用して高分解能画像をねらう。光源として放射光を単色化する方法, 放射光による蛍光励起のX線も考える。

#### 3) エネルギー差分造影

単色X線を用いれば散乱線が少ないので, 画像処理により病巣部の特徴を描出できる可能性がある。併せて使用する光子エネルギーに適した検出器の開発も行なう。

#### 4) 超拡大撮影

従来のX線装置による拡大撮影(約4倍)に比し, 放射光を用いて蛍光X線を励起することにより光源サイズを1桁小さく出来, 拡大率が1桁上がる期待がある。乳癌等の病巣部の描出が実現可能となる。

### III. 2. 2 in vivo 微量元素分析

事故ないし無意識に取り込まれた有毒微量重金属の所在場所の検出ならびにその定量測定が期待できる。

## IV. 気体(原子・分子)

一般に試料が希薄気体であるため, 固体試料に比べて密度は $10^{-10}$ 程度以下である。その上深い

内殻ほど断面積は小さい。2つ以上の事象の相関を調べるため同時計数法を用いる場合, 計数率は下がる。また, 局所的に密度を上げるため, ノズルビームを用いてビーム交叉法を用いるとターゲットの断面積は小さなものになる。以上の困難は高輝度の光源によってのみ解決できるものである。

## IV. 1 分子多価イオンの電子緩和と解離過程

分子内の特定原子に局在した色々な軌道に複数の正孔を作り, 各状態の緩和過程とそれに続く解離過程の相違から軌道間(特に殻間)電子相関についての情報を得る。重金属有機化合物の内殻を対象とするため高エネルギーの高輝度放射光を必要とする。

#### 1) 局在多正孔状態における電子相関と振電相互作用

#### 2) 準安定分子多価イオンの電子構造の解離寿命

#### 3) 解離分子断片の内部エネルギー状態の分布

#### 4) 配位を特定した分子切断の機構

#### 5) クーロン爆発で生成する分子断片間の運動エネルギーの精密測定

#### 6) 分子断片間の角度相関, 分子断片間の電荷配分

#### 7) 内殻励起と化学反応

分子中の特定の構成原子や化学結合を選択して内殻励起状態を作ることができる。これに引き続く解離過程は放射線の化学作用の素過程であり, 未踏の広範な研究領域がある。

## IV. 2 光CVDとエッチング

半導体素子の高集積化の要求に伴う微細加工技術において, 拡散や薄膜形成の光励起プロセスは低温処理が可能で, プラズマプロセスに比べても対象物質にダメージが少ない優れた方法である。特にX線による内殻励起は反応気体を高い励起状態にして反応の活性化が行える。半導体の超微細加工に適した波長は0.5~1nm領域と考えられ

ているが、金属、プラスチック等、より広範な素材を用いた3次元(深部)微細加工技術によるマイクロデバイスの製作には、より短波長領域のX線が用いられるであろう。

## V. 原子核

### V.1 核励起, 核共鳴散乱

#### V.1.1 核励起(準位1 MeV以下)の機構

原子核の低エネルギー領域における励起準位の幅は、 $10^{-9}$  eV以下であるので、通常のX線や $\gamma$ 線源によって励起するのは困難である。放射光から高エネルギーのX線の強い光子束が得られ、また単色化した光子が利用できれば、これまであまり研究されていない原子核の励起状態に関する情報を得ることができる。光吸収による核の励起は共鳴吸収、軌道電子の関与する非共鳴過程、電子遷移による核励起(NEET)等によると考えられるが、これらの機構についての研究も可能である。

#### V.1.2 励起核の利用

放射光による励起では試料をそのまま利用できるので、放射性同位体を用いる場合に問題となる不純物としてドーピングした効果を避けることができ、複雑な化学操作が不要であり単寿命の核種についての測定も容易である。

##### 1) 内部転換電子分光

低エネルギー遷移での内部転換電子スペクトルを測定することにより化合物の価電子状態を調べる。

##### 2) 摂動角相関

放射光では入射ビームの軸が決まっていることと直線偏光性があることを利用した実験が可能である。

#### V.1.3 核共鳴散乱X線の利用

$^{57}\text{Fe}$ 等の共鳴核を利用する核共鳴散乱X線は、超単色( $\sim 10^{-8}$  eV)で、放射光の優れた特性をそのまま備えた理想的な光源とみなされるが、高輝度X線光源によってはじめて実用化される。その超単色性、偏光特性、パルス特性等を利用すれば、

いままで実現不可能だった次の研究が可能となる。

- 1) 量子喰りによる超微細構造の解析
- 2) 核共鳴散乱の動力学的回折現象の研究
- 3) 磁気構造、表面磁性の解析
- 4) 超高エネルギー分解能X線分光
- 5) X線位相光学
- 6) 新しいタイプの干渉実験
- 7) 核X線光学
- 8) X線の重力による赤方偏移の測定

## VI. 応用分光学

高輝度放射光の特性を利用することにより、従来の測定技術を超える次のような測定方法が開発され、極めて広い分野で利用されることが期待される。

### VI.1 分析

#### 1) 極微量分析

高強度のX線ビーム( $1 \sim 100$  keV,  $10^{12} \sim 10^{14}$  photons/mm<sup>2</sup>/s)で試料を励起することにより、固体、液体中の極微量成分(ppbレベル)の非破壊分析を実現する。特に単色、または $\Delta E/E = \text{数}\%$ の準単色光を用いることにより、バックグラウンドの低い、信頼性の高い分析法が可能となる。この励起(単色・高強度)は、他の手段では実現できない。超高純度物質、環境試料、生体試料の分析で、極微量の不純物の影響の解明に有効である。非破壊性と標準試料なしの分析は、他の方法では困難である。

#### 2) マイクロビーム分析

集光系により、 $1 \sim 20$  keV,  $1 \mu\text{m}$ 以下のX線マイクロビームを実現し、各種X線分析の励起源とする。主な用途は蛍光X線分析である。集光と励起のために高輝度の光が必要である。マイクロエレクトロニクス、生体試料、各種材料、地球科学試料、環境試料などの微量成分(ppm以下)に有効である。

#### 3) 蛍光X線状態分析

単色度の高い励起光 ( $\Delta E \sim 1\text{eV}$ ) を用いて、存在状態による吸収端のシフト別に選択的励起を行うことにより、特定の元素の存在状態別の分析を実現する。1 eV程度の単色度で高い光子数を実現するためには、高輝度光源が必要である。さらに単色化励起で $10^{16}$  photons/s程度の強度が実現できれば、発光スペクトルの高分解能測定でスペクトルの微細構造と化学結合、存在状態の解明が実現する。

#### 4) 微小領域状態分析

前出のマイクロビームにより、単色化励起で、吸収端シフトによる状態分析、XANES及び光電子、オージェ電子分光による状態分析を実現する。 $\mu\text{m}$ オーダーの微小部の元素の存在状態分析は、材料研究、生体試料の研究に重要な情報を与える。

#### 5) 全反射分析 (蛍光X線分析)

全反射条件下での蛍光X線分析を行うもので、低バックグラウンド表面分析、及びpg~fg領域の極微量分析が可能となり、電子材料、環境試料等へ応用される。1~20keV、 $10\mu\text{m}$ 以下の高輝度単色化平行ビームが必要である。

#### 6) 全反射分析 (マイクロエスカ、オージェ電子分光)

全反射条件下でのX線光電子分光、オージェ電子分光を行うもので、通常の方法と比較しバックグラウンドを著しく低下させることができる。表面選択性(1~2層)の微量成分分析、及び状態分析も可能となり、電子材料、金属材料に応用される。

#### 7) 3次元分析

単色化ビームによる吸収、散乱、蛍光法で、CTアルゴリズムにより3次元分析を行う。試料の大きさと材料により、1~150keVのエネルギーで、mmから $\mu\text{m}$ の大きさのビームを用いる。この範囲のエネルギーを自由に選択するためには、高輝度放射光が必要である。考古学試料やマイクロメカニクスの内部構造、材料検査などにも応用される。

## VI.2 光音響・光-熱分光

光と物質の相互作用に伴い必ずと言ってよいほど存在する発熱現象にも、物質の構造や熱物性情報が多量に含まれている。高輝度光により、高エネルギー分解能、超微小域照射を可能とし、熱拡散の時間的な遅れ、応答波形の変化を利用して他の手段では得られない、表面下数 $100\mu\text{m}$ までの非破壊的な構造・物性解析、そして3次元分析を実現し、また光-熱効果による、局所歪形成、成形、光-熱治療等の応用も図る。

- 1) 光-熱現象の機構解析
- 2) 光-熱現象による物質解析
- 3) 光-熱現象の応用

## VI.3 XAFS

XAFS(X-ray Absorption Fine Structure)は、“局所的な”構造や電子状態の“高感度”な研究手段である。触媒、溶液、金属蛋白、酵素、表面吸着、薄膜、アモルファス、液体、合金など結晶構造解析が困難な系の構造解析法として重要である。高輝度X線を利用することにより、1) 高感度化、2) 微小領域の測定、3) 時間分解測定、4) 超高エネルギー分解能スペクトロスコーピーが可能となり、また5) エネルギー領域についての要請(超重元素)も達成できる。

高輝度光源を必要とする分野としては特に表面、生体、触媒などの希薄な系、微小領域、時間分解を対象とした“高感度化”が課題となるが、これにはX線アンジュレータの利用が最適である。

## 2.5 建物及び建設場所

本計画の大型放射光施設は、兵庫県が西播磨地区に開発している「播磨科学公園都市」に設置されることが決まっている。施設のための敷地はその第1工区内の北部にあり、141haの広さを持つ。「播磨科学公園都市」第1工区の概要図を図2-3に示す。敷地内に、海拔290m及び280mのレベルで平坦な部分を造成して、前者に蓄積リングを



建設し、後者に電子リニアック、及びシンクロトロンを設置する。現在検討されている敷地内の建物配置案は図2-2の通りである。長尺ビームラインは、1,000mのものが1箇所、300mのものが2箇所に各4本ずつ設置できるようになっている。

将来、入射用電子リニアック、及びシンクロトロンを、他の研究に利用する可能性も残されている。その場合、電子リニアック、シンクロトロンを利用施設を設置する場所として、280mレベルの部分に敷地が確保されている。

蓄積リング室、及びその周囲の実験ホールは、地盤の不等沈下、外界の温度変化、振動等の影響を極力受けないように設計する必要がある。そのため、蓄積リング棟は硬い地盤の上に建設するとともに、外気温変化による変形が小さくなる構造の検討が進んでいる。図2-4に蓄積リング棟の全体図の案を、図2-5にその一部分の拡大図を示した。実験ホールの外側に、通路と実験準備室を配置する案になっている。

## 2.6 年次計画

本計画の準備研究は1987年度から始まり、入射器、蓄積リングの設計研究、及び要素技術の開発研究が進められてきた。その後、放射光利用研究に関連した開発研究も進められている。本体の製作は1990年度から開始され、1998年度に完了の予定となっている。順調に進めば、1997年にはビームの蓄積テストが行われるであろう。加速器の立ち上げ時までには整備するビームライン10本については、1997、1998年度に建設・整備する予定となっている。

建設敷地の造成は1990年2月より開始され、1992年3月に完了する。建物の建設は造成工事の進捗状況にあわせ、1991年度に開始する予定になっている。

## 2.7 建設及び運営体制

本計画の実施は日本原子力研究所と理化学研究所が共同して当たっており、そのため両研究所の職員が集まって、「大型放射光施設計画推進共同チーム」を結成している。この体制で研究開発、及び建設までを行い、建設完了後は独立の組織、財団法人「高輝度光科学研究センター」(仮称)を作り、その法人が施設の管理運営に当たるという案が検討されている。その場合、この法人は施設の管理運営に当たるだけでなく、その中に強力な研究グループを保持して、最先端の研究環境を維持することができるような案が提案されている。

表2-1 蓄積リングの主要パラメータ

エネルギー	8	(GeV)
蓄積電流 (多バンチ)	100	(mA)
蓄積電流 (単バンチ)	5	(mA)
周長	1435.95	(m)
ラティス	Chasman-Green	
セル数	48 (44+4)	
偏向磁場強度	0.665	(T)
偏向半径	40.098	(m)
直線部長さ 通常直線部	6.5	(m)
長直線部	36.4	(m)
エミッタンス	7.18	(nmrad)
特性光子エネルギー	28.32	(keV)
チューン ( $\nu_x/\nu_y$ )	50.78/17.84	
減衰時間 ( $\tau_x/\tau_y/\tau_z$ )	8.477/8.48/4.24	(ms)
ハーモニック数	2436	
RF電圧	17	(MV)
RF周波数	508.58	(MHz)

表2-2 電子リニアックの主要パラメータ

主リニアック		
エネルギー	1.0 (0.12+0.88)	(GeV)
繰り返し	60	(Hz)
周波数	2856	(MHz)
多バンチ ( $e^-/e^+$ )		
ピーク電流値	100/10	(mA)
パルス幅	1000/10	(ns)
単バンチ ( $e^-/e^+$ )		
ピーク電流値	300/10	(mA)
パルス幅	1/1	(ns)
陽電子発生用リニアック		
エネルギー	0.25	(GeV)
繰り返し	60	(Hz)
周波数	2856	(MHz)
多バンチ		
ピーク電流値	10	(A)
パルス幅	40	(ns)
単バンチ		
ピーク電流値	10	(A)
パルス幅	1	(ns)

表2-3 電子シンクロトロン主要パラメータ

エネルギー (入射/取り出し)	1/8	(GeV)
電流	10	(mA)
周長	396.0	(m)
ラティス	FODO	
セル数	40	
偏向磁場 (入射/取り出し)	0.106/0.85	(T)
偏向半径	31.385	(m)
エミッタンス	192	(nmrad)
チューン ( $\nu_x/\nu_y$ )	11.73/8.78	
減衰時間 ( $\tau_x/\tau_y/\tau_z$ )	937/938/469	(ms) 1GeV
	1.83/1.83/0.92	(ms) 8GeV
繰り返し	1	(Hz)
RF周波数	508.58	(MHz)

表2-4 世界における大型高輝度放射光源の性能比較

		ESRF	APS	SPring-8
エネルギー	(GeV)	6	7	8
蓄積電流	(mA)	100	100	100
セル数		32	40	48 (4*)
偏向磁場	(T)	0.8	0.6	0.67
偏向半径	(m)	25.0	39.0	40.1
周長	(m)	844	1104	1436
加速高周波	(MHz)	352	352	508.6
加速電圧	(MV)	10.6	12.0	17
エミッタンス	( $\pi$ nmrad)	6.8	8	7.2
挿入光源用直線部数		29	34	38 (4*)

注：\*は長直線部 (30m) の数を示す。

## Spectral Brilliance of SPring-8

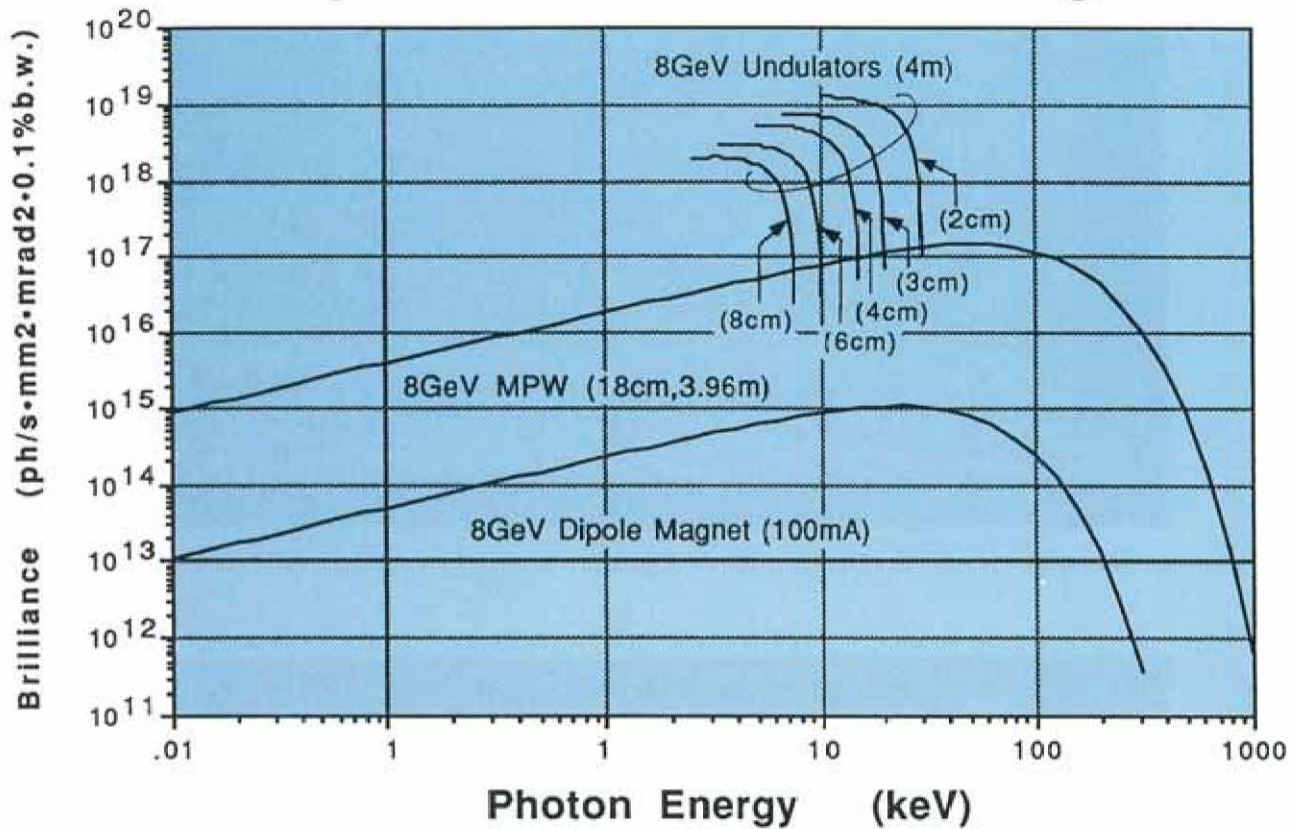


図2-1 SPring-8の輝度スペクトル  
(アンジュレータは全長4m, ギャップを変えたときのピークを示す。)



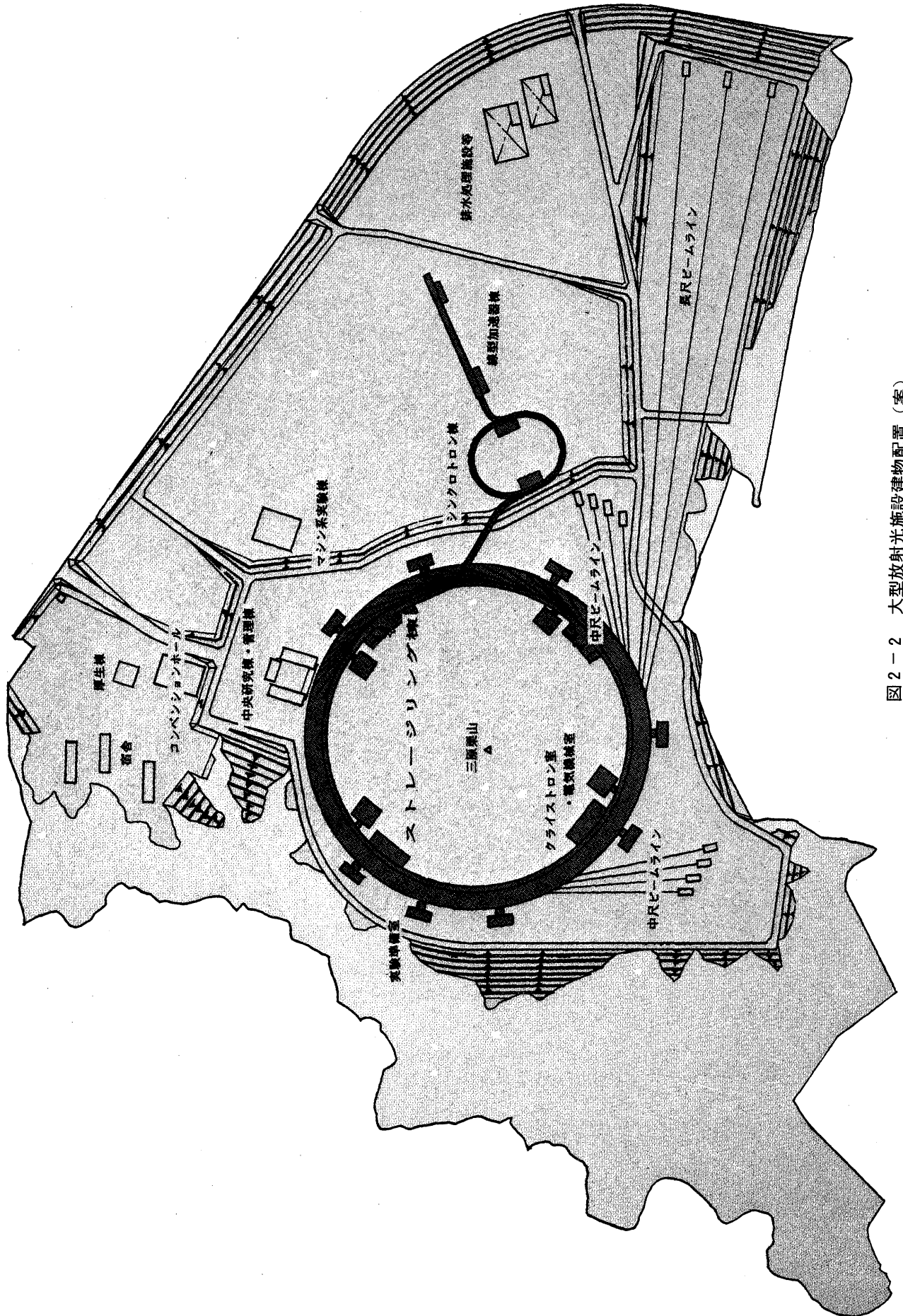


図2-2 大型放射光施設建物配置(案)

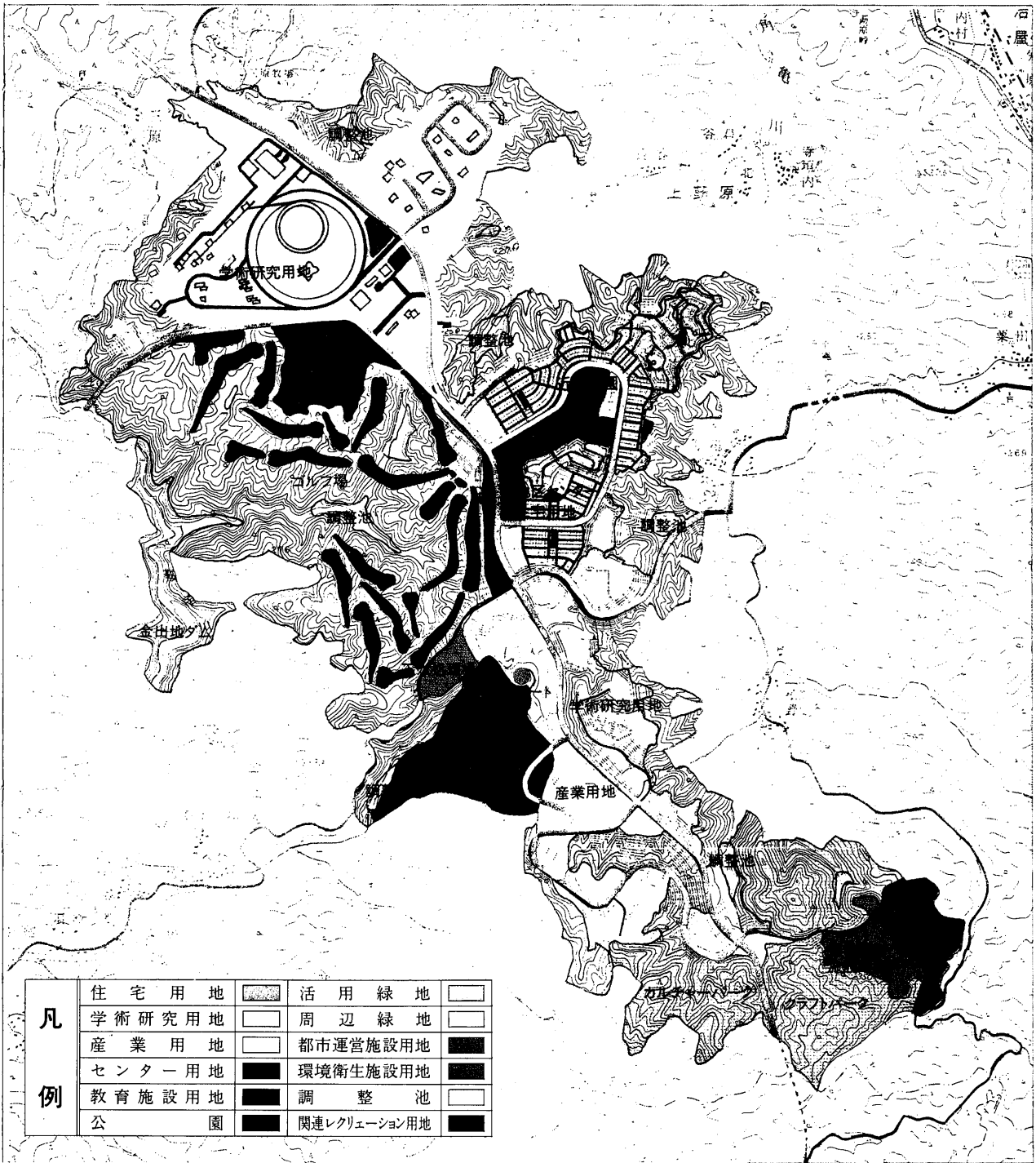
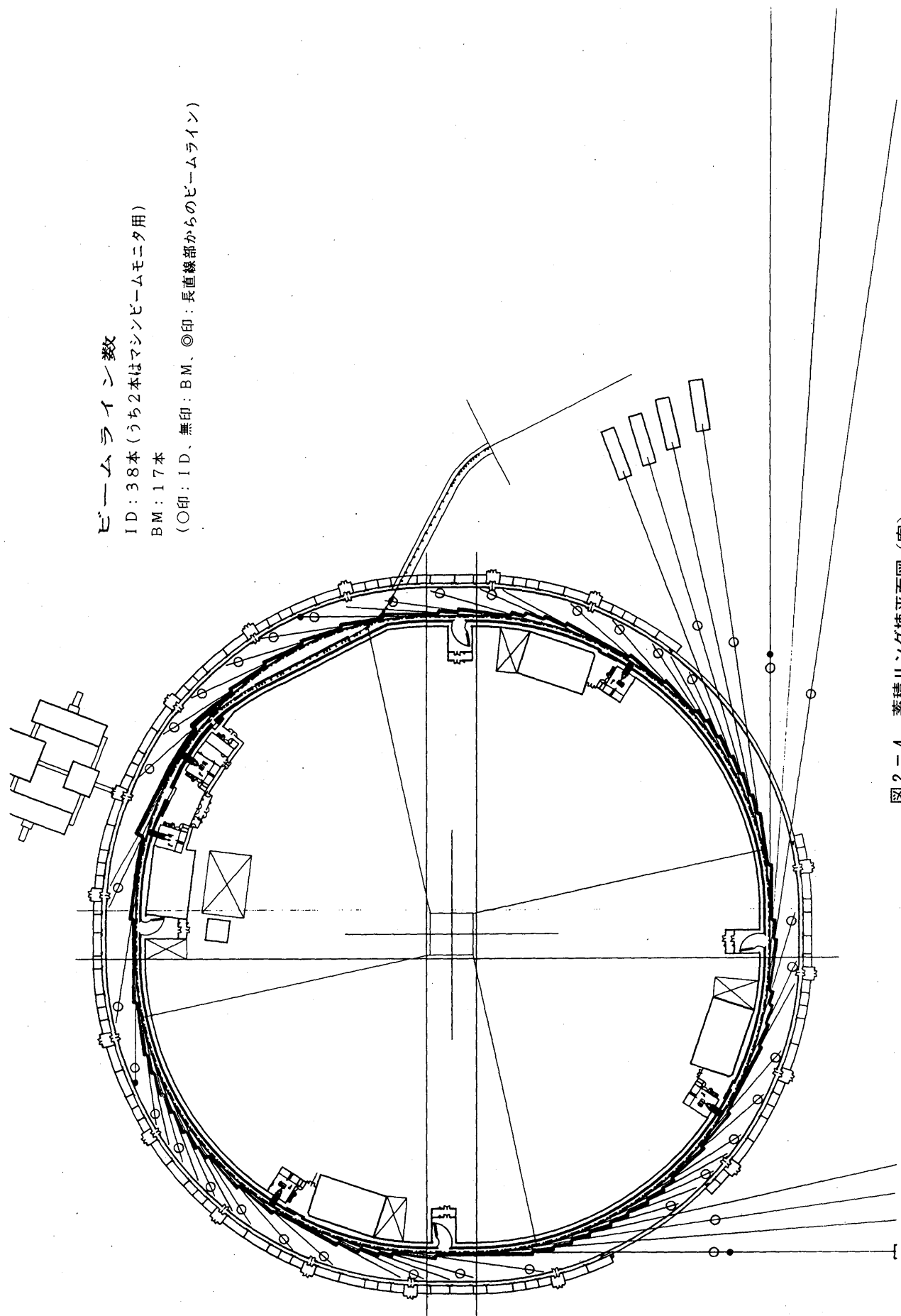


図2-3 播磨科学公園都市(第1工区)の計画図





ビームライン数  
ID: 38本 (うち2本はマシンビームモニタ用)  
BM: 17本  
(○印: ID、無印: BM、◎印: 長直線部からのビームライン)

図2-4 蓄積リング棟平面図 (案)

(○印: I.D.、無印: B.M.、◎印: 長直線部からのビームライン)

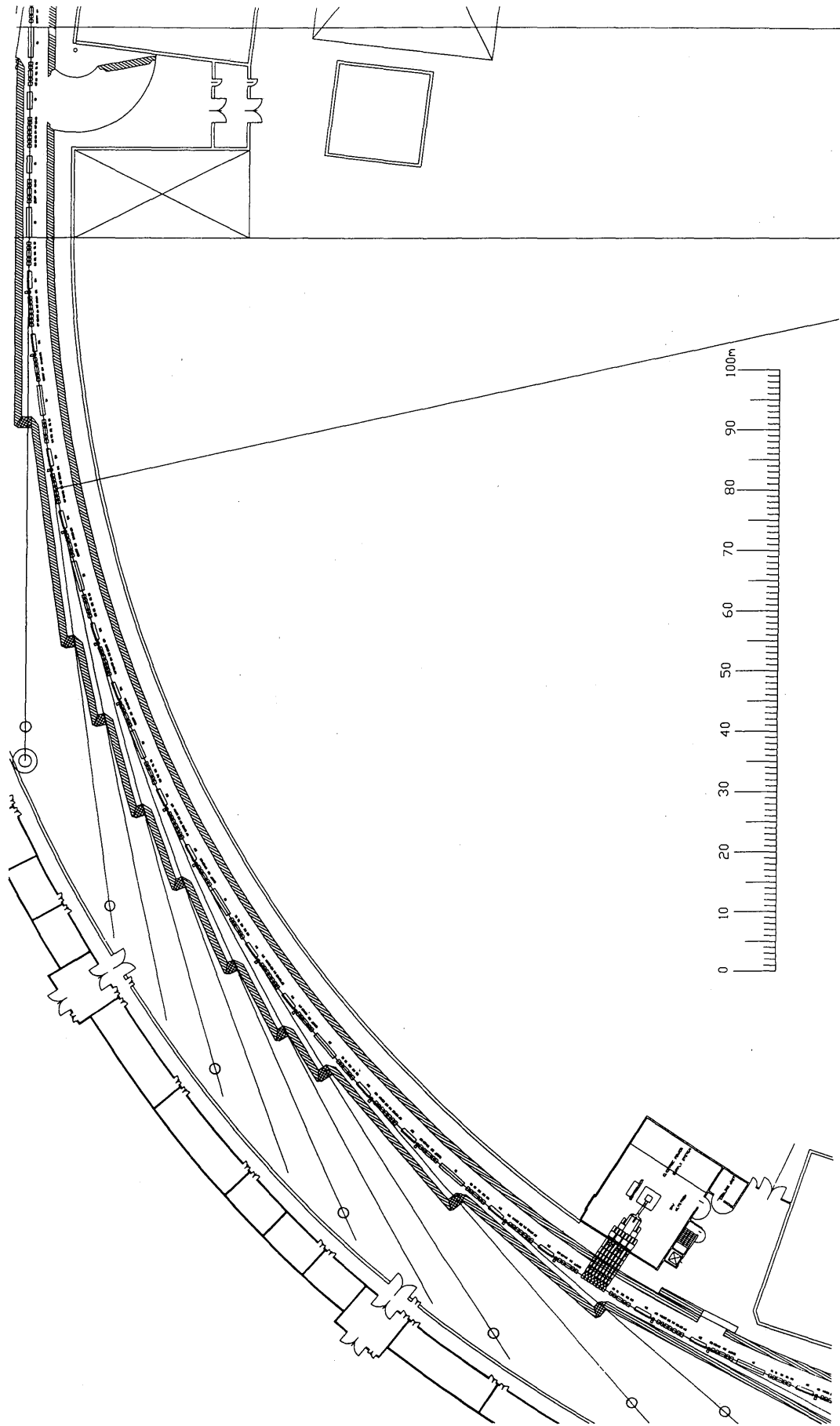


図2-5 長直線部以外の標準部についての実験ホール平面図(案)

### § 3 高エネルギー物理学研究所トリスタン主リングMRの放射光利用計画

わが国における高エネルギー物理学の主要実験施設であるトリスタンは1981年に鋳入式を行い、1986年11月に完成、電子・陽電子衝突実験を開始した。その後、急速に性能を改善し、現在では、衝突エネルギー65GeVで実験を遂行中である。今後さらにルミノシティを向上して、実験の効率を高めることができれば、予定されている実験データの収集は4～5年で完了するものと見込まれ、高エネルギー物理学研究所では、トリスタン主リングMR(Main Ring)を放射光利用に転用する計画が検討されてきた。すなわち放射光実験施設PF 2.5GeVリング、トリスタン入射蓄積リングARを光源とした放射光利用研究を経て、本計画に到達したものである。

MRは周長3kmの大型リングであり、放射光源に転用すると、世界最高輝度の光源が実現し、さらにX線領域の自由電子レーザー(FEL)の可能性もあり、最先端の研究がきわめて経済的に展開できるものと期待されている。

#### 3.1 計画の背景と目的

このMRの放射光利用計画は、以下に述べるように、これまで高エネルギー物理学研究所における放射光利用実験の経験から必然的な進展の方向として検討されてきたものであり、目標とする光源の性能や研究成果を達成できる可能性がきわめて高いものである。

##### 3.1.1 PF2.5GeV 光源

放射光実験施設は、2.5GeVの光源専用の電子蓄積リングを建設し、1982年に共同利用を開始してから、陽電子ビームによる光源の安定化、高輝度化、ビームラインの増設を行い、汎用リングとして世界で最も優れた放射光源に成長した。また、放射光利用研究は半導体、超伝導体から生体物質、

鉱物、星間物質にまでおよび、X線コンプトン散乱、磁気散乱、表面・界面構造解析、生体物質の動的構造解析、ウイルスの会合過程の研究、超々LSI用リソグラフィ技術や新しい医学診断法の開発など多彩な研究成果を生み出してきた。現在、年間3,400時間運転し、利用者は2,000人を超え、年間約500件の実験課題が実施されている。

しかし、実験の精密化(テーマ当たり実験時間が長くなる)と利用者の増加により、ビーム利用時間と輝度に対する研究者の要求に応じることができない状況にある。

##### 3.1.2 トリスタン入射蓄積リングARによる放射光利用

これまでの放射光による実験研究の経験から、さらに高輝度の硬X線光源の建設が切望されるようになってきた。このため、6-8GeVで運転可能なトリスタン用の入射蓄積リングAR(Accumulation Ring)を1987年度から放射光X線実験用光源としても活用し、世界に先駆けて開発した円偏光(楕円偏光)挿入光源など特色のある高輝度光源を建設し、開拓的、先駆的な研究が推進されている。それらには、コンプトン散乱、磁気散乱、極端条件下での物質構造解析、アンジオグラフィ、磁気吸収、表面・界面構造解析、人工メスbauer X線光源、極微単結晶構造解析、蛍光X線による重元素分析等を挙げるができる。また、X線励起による化学反応、医学診断等の重要な応用研究も含まれている。

##### 3.1.3 MR利用への期待

このように放射光利用研究が進展するにつれて、研究のフロンティアがより高度で精緻になり、分野的にも広がり、これまで実現が到底不可能と思われていた実験や研究テーマへの挑戦が始まった。より限られた(小さい)領域から、より微弱な(相互作用の小さい)信号を、より高い分解能(エネルギー、運動量、空間、時間)で計測することが新しい知見をもたらすので、これらを実現するためには超高輝度X線光源の利用が不可欠と考えら

れるようになってきた。

このような放射光利用実験の進展から、トリスタン主リングMRにアンジュレータを挿入すれば、世界最高輝度の光源を極めて経済的に実現できるとの期待が高まり、これまで科学研究費による研究会「トリスタン主リングによる放射光利用」等が開催され、その放射光の特性について検討されてきた。その結果、

- (1) 200mに達する長い直線部が4箇所存在し、6,000極を越えるアンジュレータが挿入できること、
- (2) 放射光用に最適化すれば、8 GeVで0.5nmrad以下のエミッタンスを実現できる可能性があること

が明らかになった。これにより、欧米で計画されている大型高輝度放射光光源に比して、3桁も高い超高輝度で、しかも、X線領域の波長可変単色光源( $\Delta E/E \sim 10^{-3}$ )が実現できる。比較的バンド幅の広い単色光を必要とする実験には、これまで使用してきたモノクロメータが不要となり、その超高輝度と相俟って放射光利用分野に革新をもたらすものと思われる。さらに、エネルギーを5 GeVに設定すると、0.2nmrad以下の超低エミッタンスが得られ、1 nm以上の波長領域において、シングル・パス方式の自由電子レーザーを実現する可能性がある。

このようにMRの放射光利用計画は、X線領域における究極の光源を実現し、従来の手法の飛躍的發展を期するだけでなく、nm程度の極めて限られた領域の構造と物性の解明、ピコ秒時間分解能構造解析、原子配列の三次元表示を目指すX線ホログラフィなどの新分野の研究を展開するものである。

## 3.2 MR光源の概要とX線領域自由電子レーザー

MRの周長は3,018mであり、図3-1に見られるように4つの長い直線部を4つの円弧部でつ

ないだ形状をしている。各直線部の中央には、現在はビーム衝突実験部があり、その両側に高周波空洞が設置されている。ただし、直線部の一つは電子と陽電子の入射に使われている。偏向電磁石は272個で、その電子軌道半径は246.5mである。

放射光専用光源に用いる場合にはエミッタンスを低くするため、電子ビームエネルギーは8~10 GeVとし、さらに、エミッタンスを改善する機器を挿入した上、超多極アンジュレータなどの挿入装置を直線部に設置する。

### 3.2.1 低エミッタンス化

蓄積リングは大きいほど、設計上のエミッタンスを低くすることができる。したがって、MRはCERNのLEPが放射光利用に転用されない限り、放射光リングとして世界最高の性能を維持することになる。図3-2に示すように、現在のMRの磁石配列(衝突実験用磁石配列)では、30 GeVで180nmradのエミッタンスであるが、この磁石配列のままエネルギーを10 GeVまで下げると、20nmradまで低くなる。(同一の磁石配列ではエミッタンスはエネルギーの2乗に反比例する)。さらに放射光用に最適化すると、10 GeVで2 nmradに、ダンピング・ウイグラーの導入によって、10 GeVで0.7nmrad、8 GeVでは0.5 nmradと極めて小さくなる。このとき電子ビームの太さは極めて小さく、約70  $\mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$ である。

### 3.2.2 挿入光源

MRを放射光専用にした場合、最高エネルギーは10 GeVとなるので、30 GeV運転のために直線部に設置されている加速空洞の数をかなり減らすことができ、上記の直線部のうち3カ所に100m級の超多極アンジュレータや自由電子レーザー、およびダンピング・ウイグラーを挿入し(図3-2参照)、残る1箇所の直線部をビーム入射や加速空洞のために使う。この場合、アンジュレータ光源ビームライン3本となるが、先端的研究を重点的に推進するため、挿入装置の数を多くして、光

源の性能を劣化させない方針である。表3-1に、MR放射光の主要パラメータをスタンフォード大学のPEP放射光のそれと比較してまとめてある。

#### (1) 超高輝度単色X線用アンジュレータ

アンジュレータは、周期長3cm、周期数3,000で、全長100mに達する長大なもので、セグメント方式を採用し、周期数133のセグメントを22基連結して構成し、各セグメント間には必要に応じて調整用の4極磁石を設置する。そのスペクトルを図3-3に示す。ピーク輝度は欧州連合のESRF、米国のAPS等で建設中の大型高輝度放射光源よりも、1,000倍以上高い、 $7 \times 10^{22}$  photons/s · mm<sup>2</sup> · mrad<sup>2</sup> 0.1% b.w.となる。バンド幅は $\Delta E/E = 2.4 \times 10^{-3}$ で、金属元素のK殻励起で得られる特性X線の自然幅と同程度となる。すなわち、超高輝度波長可変単色光源が実現される。参考として単一セグメントのスペクトルを同図に示すが、これでも大型高輝度放射光源よりも100倍高い輝度となる。

#### (2) 自由電子レーザー

回折限界に達する低エミッタンスの電子ビームをつくることができれば自由電子レーザー-FEL (Free Electron Laser)が実現可能となる。MRのビームエネルギーを5 GeVに設定すると0.1 nmrad以下の超低エミッタンス特性が得られるので、1 nm以上の波長領域でのFELが可能となる。この波長領域では反射率の高い鏡が期待できないので、 $10^5$ 以上の利得をもつシングル・パス型のFELが開発の対象となる。表3-2は2.4~10 nm領域のFEL特性を列記したものである。例えば、4.5 nm (炭素K吸収端付近)では $10^6$ の利得が得られ、干渉性の優れたコヒーレント光によって、イメージング、マイクロコピー等の研究が躍進するものと期待される。なお、FEL用アンジュレータは電磁石型とし、周期長可変型のもを開発して、広範囲の波長領域においてFEL発振を可能とする。

MRからの放射光ビームの特色を箇条書きに

するとつぎのようになる：

- (1) アンジュレータからは現在各国で建設計画中の大型高輝度放射光光源に比して100倍のX線輝度が得られる。
- (2) 軌道上の電子ビームの大きさは高々数十マイクロメートルであり、その放射光は極めて指向性が良く、光源から100m地点でもビーム・サイズは極めて小さい(0.1-1 mm)。
- (3) 放射光はパルス光で、パルス幅100ps以下、パルス間隔2.5 μs (4バンチ運転の時)となる。
- (4) 3 nm領域のFELを発振させる可能性がある。

### 3.3 利用研究

超高輝度光源の出現により、エネルギー分解能がきわめて高い分光手法、サイズ効果(量子効果)が現れるような微小領域の構造解析と物性測定、ピコ秒時間分解構造解析、極限環境における構造解析などが実現する。また、優れた干渉性を利用してX線ホログラフィなどのX線干渉光学の分野が、新しく展開するであろう。MR光源によって、はじめて可能となる放射光利用研究の主なるものを次に挙げる。

#### 3.3.1 放射光励起メスバウアX線光源

メスバウア分光法でよく用いられる線源は<sup>57</sup>Coであり、そのメスバウア準位は遷移エネルギー $E = 14.4 \text{ keV}$ 、自然幅 $\Delta E = 4.7 \times 10^{-9} \text{ eV}$ 、 $\Delta E/E = 3.3 \times 10^{-13}$ 、半減期 $t_{1/2} = 0.98 \times 10^{-7} \text{ sec}$ である。線源からの $\gamma$ 線は全方位に放射されるので、発散角を絞り、平行度の高い線源として使うと、強度が極端に落ちる。

そこで放射光励起により、核共鳴散乱過程を利用してメスバウアX線を得る。メスバウア核をもつ原子を適当な結晶格子に組み込んで、周期的に配列すれば、核共鳴散乱をするX線の干渉効果によって、ある方向に平行で強いメスバウアX線を取り出すことができる。このとき、入射する放射光の大部分はトムソン散乱を起こして回折X線を生じ、巨大なバックグラウンドとなるので、これを

干渉により消し去るような工夫が必要である。このような核共鳴ブラッグ散乱により、これまでの $\gamma$ 線源をはるかに凌駕する強度が得られ、メスバウアX線光学が実現することになる。

核共鳴散乱を起こさせ得る核種には $^{57}\text{Fe}$ ,  $^{119}\text{Sn}$ ,  $^{151}\text{Eu}$ ,  $^{161}\text{Dy}$ 等をはじめ多くの候補があり、放射光で励起するので短寿命のものもメスバウア核種として利用できる。

この核共鳴散乱線は、極端にエネルギーバンド幅が狭く、高指向性で、しかも偏光性とパルス性をもっており、分光、散乱・回折、干渉等の関わる未踏の研究領域が開拓できるものと期待される。それらには、超微細相互作用が関わった動力学的回折現象、散乱スペクトル、量子うなり、内部転換電子放射などを用いた磁気物性、表面磁性、高分解能分光による格子力学、X線位相光学、核X線光源の諸研究、そしてX線の重力場による赤方偏移の精密測定などが挙げられる。

このような超精密実験を実施するためには、核共鳴散乱線が強くなければならない。PFリングからの放射光を用いた場合に比べて数桁の強度の増大が見込まれる。時間的コヒーレンスが高いうえに、空間的コヒーレンスも格段に高くなるので、このような特徴を生かした研究はMRの超高輝度光を用いて初めて本格化する。

### 3.3.2 マイクロクラスター

数個～数百個の原子が集めたマイクロクラスターでは、表面原子数>内部原子数となるため、原子・分子ともバルク固体とも異なった性質を示す「新物質相」の実現が期待されている。また、マイクロクラスターは、微視(マイクロスコピック)と巨視(マクロスコピック)の二つの世界にまたがり、新しい物理を包含したメゾスコピックな系として注目されている。さらに、マイクロクラスターの領域には、物質の成長する芽があるのではないかという基礎物理学的興味、触媒に代表される基礎化学・化学工業的、さらに超微細素子への電子工学的応用等、様々な魅力ある未開拓の

分野の展開が期待される。

最近、マイクロクラスター作製技術の進歩により、大きさの揃ったクラスタービームを高密度に得ることが可能になったが、それでもバルク固体と比較するとその密度は格段に希薄である。しかし、MRアンジュレータから得られる超高輝度放射光をクラスター・ビーム(自由な孤立したクラスター)と交差させてマイクロクラスターの原子配列、および電子構造の解析ができる。半導体、金属、分子クラスターの構造と構造の揺動、原子の集団運動、クラスターの蒸発・分解の過程が研究対象となる。

### 3.3.3 蛋白質のピコ秒の時間分解構造解析

遺伝子工学の急速な進歩により蛋白質の量産や改変が可能となり、結晶化法の研究が進んできたのとあいまって、蛋白質の構造解析に対するニーズは大きく拡大してきた。放射光実験施設では、指向性に優れた放射光ビームの特色を生かし、蛋白質結晶からの回折強度データを一度に記録できる大口径のワイセンベルクカメラと、これに感度、直線性ともに優れたIP(イメージングプレート)を用い、高精度で効率よく回折データを収集するシステムが開発された。これにより、従来多数の試料を用いて半年から1年を要した高分解能データ収集が、1つの試料だけでよく、わずか5時間で完了し、しかも得られたデータは信頼性がきわめて高い。最近半年間に50種の蛋白質の構造解析実験が行われている(これまでにProtein Data Bankに登録されているのは350種)。さらに、生体反応にともなう巨大な蛋白質分子の構造の変化を追求すれば、分子内の活性部位が同定できるだけでなく、反応過程を解明することができるので、動的構造解析が重要になってきた。

放射光は白色X線であることからラウエ法に最適の光源である。放射光実験施設では、時分割ラウエカメラを開発し、IPを用いて、露出時間1ms、時間間隔10msで蛋白質の回折像の記録を達成しており、この方法で、積分反射強度が極めて



精度よく得られることが確かめられた。MRの放射光を利用する場合には、直線部に挿入する6000極アンジュレータを構成する22基のセグメントの磁場を異なる値に設定して、必要な波長領域だけをカバーするようにする。単バンチ・モード運転によっても、回折強度が3桁増強され、1バンチのX線によってデータを記録することができる。この方法では、一躍ピコ秒オーダーの構造解析が可能となろう。

生体内での反応のエネルギーは実験室で行う化学反応に比べると非常に小さく、反応速度もおそく、酵素反応では $\sim 0.1\text{ms}$ である。それゆえ、構造変化の追求は比較的容易に達成できるものと思われる。このような動的解析は蛋白質機能の研究には不可欠であり、またその結果は広い分野、とくに医学・薬学の進歩に大きく寄与するものと思われる。

### 3.3.4 極限環境下の物質の構造と物性

極限環境におかれた物質の構造と物性をしらべるには、環境を形成する装置を通じて探針を入れ、試料からのシグナルを取り出さなければならない。このため、探針は並外れた強力なものであることが要求される。MR超高輝度放射光を探針として用いれば、極限状態の物質構造の解析と物性の研究が可能となる。

#### (1) 超高压力、低温下における金属化した気体の構造と物性

水素は常温常圧下では気体であるが、圧力を加えて行くと、液化し、次に、5万気圧付近で、 $\text{H}_2$ 分子を構造の単位とする分子性の固体となる。物性理論の予測によれば、さらに圧力を加えて分子間距離を縮めてゆけば、電子のエネルギーバンドの重なり合いが起こり、分子が解離して、H原子を構造単位とする固体金属水素ができるといわれている。すなわち、陽子が周期的に配列した結晶の中を1原子当たり1個の電子が走り回るといふ、自然界で最も単純な金属ができる。しかし、金属水素ができる圧力は300万気圧以上という超

高压力であると推測され、これは地球の深部マントルの下、外殻付近の圧力に相当する。このような超高压力を発生するには力の集中の原理から、試料の大きさは数ミクロン立方という小さいものになり、しかも温度を100K以下にする必要がある。微小物質で、X線に対する散乱断面積がきわめて小さい最軽元素の結晶構造を、回折法で決定するには、超高輝度ビームが不可欠である。

ダイヤモンドアンビルに封入された水素からの回折図形を記録しつつ、分子性結晶から金属性結晶への移転の過程、金属相の結晶構造、この相における原子の熱振動状態、そして圧力の増加にともなう第二の金属相への転移の可能性なども調べる。また、超高压力下での昇温、降温の繰り返しによって金属水素の単結晶を育成し、X線トポグラフィで結晶の完全性の研究にも挑戦する。

#### (2) 超強磁場により誘起される固体の構造相転移の研究

強磁性体は自発磁化を持っており、磁場中に置くとそのエネルギーはゼーマンエネルギー分だけ変化する。もしこの強磁性体が別の結晶構造をとり、その自発磁化がより大きくなるならば、この構造へ相転移してゼーマンエネルギーに関して有利な状態になるであろう。これに加えて、強磁性体には常に磁歪が伴うので、歪のエネルギーを最少にする結晶構造をとるのが有利であることはいふまでもない。それゆえ、強い磁場の印加により、温度、圧力の環境とは異質の、新しい構造相転移を引き起こす可能性がある。磁場に支配される固体の構造の研究、つまり“磁場結晶学”は、物性物理学の新しいジャンルになることは十分に予想される。しかしながら、固体のエネルギーにはクーロン・エネルギー、電子系の運動エネルギーなど種々の成分があり、これらに打ち勝って磁場誘起相転移を実現させるためには100MA/m程度あるいはそれ以上の強さの磁場が必要である。これは電磁石の静的磁場では得られない超強磁場であり、巨大な蓄電装置からの放電電流の励磁に

よるパルス強磁場によるほかはない。放射光の高輝度性とパルス性とを活かし、パルス超強磁場中で起こる構造の変化を検出し、磁場結晶学に挑戦する。対象とする物質は稀土類元素、3d遷移元素などを含む化合物、合金であり、磁場の印加から終了までX線回折図形を時分割記録する。

またこの計画と並行して“電場結晶学”の確立を目指す研究も計画されている。

### 3.3.5 X線干渉光学：X線ホログラフィ

可視領域のレーザーを用いてホログラフィが実現し、物体の立体像の記録・再生が可能となり、歪みの時間変化、電子顕微鏡像の再生などに応用されてきた。このホログラフィをX線領域に適用できれば、個々の原子・分子の立体的配列とその動きが見えるであろうというのが物質科学者の長い間の夢であった。原子・分子の座標を求める従来型の結晶解析法では、試料からの回折X線において位相情報が失われているので、それを様々な工夫をして補ってきた。X線領域のホログラフィが実現すれば、位相情報は完全に記録される。この目的を達成するには、X線領域でレーザーに近い性能を持った光源が必要である。

PF2.5GeVリングのアンジュレータ光は干渉性軟X線として実用化されているが、可視光レーザーに比べるとその可干渉性は桁違いに悪い。このため干渉性を利用した研究も基礎的なものに留まっている。また、X線領域においては、シリコン単結晶の非対称反射を繰り返し用いたX線光学系によって、可干渉性をよくする試みがなされ、波長0.070nmの放射光X線を用いて、空間的可干渉距離220 $\mu$ m以上、時間的可干渉距離41 $\mu$ m以上という結果が得られている。MR高輝度放射光源からの放射光の角度広がり、完全結晶の理論的半値幅とほぼ一致する。それゆえ、波長の広がりや発散角がきわめて小さいX線束を容易に作るができる。すなわち、空間的可干渉距離も長時間的可干渉距離も1mm以上にすることが可能で、6000極アンジュレータからのX線はレー

ザー光に極めて近い干渉特性をもっていると言える。また、干渉縞の観察に必要な短時間記録もMRアンジュレータ光の超輝度によりはじめて達成できる。これにより、次のようなX線干渉実験が予定されている。

#### (1) X線ホログラフィ顕微鏡

生体試料を分子レベルで生きたまま観察することは、生物・医学研究者の夢である。X線を利用する顕微鏡法では水を含む試料の観察も可能である。ホログラフィの手法を応用すれば、波長オーダーの分解能も実現できる。しかも、従来の顕微鏡法ではコントラストは吸収によるため、分解能が上がれば上がる程、試料に対する放射線損傷が大きくなり、生きたままの観察は難しかった。ホログラフィでは位相差コントラストにより損傷が極めて少なくできるという利点もある。

#### (2) 結晶構造解析

未だ結晶の構造を直接決定できる方法はない。X線ホログラフィの試みがなされていないのは、十分な強度と干渉性を持つ光源がなかったためである。MRからの超高輝度光を用いて可干渉距離の長いX線を作成し、ホログラフィ光学系を組み立てれば、格子面の位相情報を捕えることができる。通常の軸をはずした光束干渉法では、干渉縞の間隔が極めて小さくなり( $\sim 0.1$ nm)検出が不可能になるので、干渉法の工夫あるいは高分解能干渉縞計測法の開発が必要になることはいうまでもない。最近、記録剤の装置関数を用いて畳み込みを解き、高分解能像を得るコンピューター技術が発展しており、超微小間隔の干渉縞が観測できる可能性が示されている。

#### (3) X線ホログラフィ干渉法による超微細パターンの形成

X線の干渉縞の間隔は、2光束の入射角( $\theta$ )と用いる波長( $\lambda$ )によって近似的に $\lambda/\sin\theta$ と表わされる。 $\lambda$ は0.1nm前後であるから、原子オーダーの干渉縞が形成されることになる。干渉法では非常に正確な等間隔の干渉縞が得られるの

で、X線励起の結晶成長法による量子細線などの新しいデバイスやX線用の光学素子の開発に役立つものと思われる。さらに、干渉縞間隔を格子間隔に合わせることによって選択的な原子面の励起も可能になり、物性の起源を原子レベルで探究することができる。超微小間隔の干渉縞の記録や観察には、記録剤の露出中に像の動きを縞の間隔よりはるかに小さく保つ必要がある。このような超安定な状態を長時間保つことは不可能なので、露出時間を数秒以内にしなければならない。その上、たとえば原子配列の観察には、一個の原子からの散乱光子数は量子ノイズを低くするため100個程度必要であり、試料に入射するX線強度は極めて高くなければならない。簡単な計算によると、この条件は現在の2.5GeV偏向電磁石光源の $10^{10}$ 倍の強度が必要で、これはMRの6000極アンジュレータがなければ得られない強度である。

このように、X線ホログラフィはMRを光源に転用することによって、初めて可能となるが、高

精度のX線領域の干渉実験には究極の光源であるX線自由電子レーザーの実現が待望される。

### 3.4 まとめ

本計画は、トリスタン主リングMRを高エネルギー物理学の実験終了後に放射光専用に転用するもので、これにより、

- (1) きわめて経済的に超高輝度 ( $10^{23}$  photons/s  $\cdot$  mm<sup>2</sup>  $\cdot$  mrad<sup>2</sup>  $\cdot$  0.1% b.w, これまでの2.5GeVリング偏向磁石光源の $10^{10}$ 倍)の波長可変単色光源を実現し、最先端の研究を実施するとともに、
- (2) X線領域で究極の光源である自由電子レーザーを開発するものである。自由電子レーザーの発振のためには、ビームの質を最高レベルに保つ必要がある。このため、ビームのエミッタンスの劣化を引き起こす挿入装置を多数設置することは、今のところ考えていない。すなわち、本計画の特色は超高輝度放射光の利用研究と光源開発研究の二本立てになっていることである。

表3-1 MR放射光およびPEP放射光の性質 (目標値)

	MR	PEP
エネルギー (GeV)	8	8
ビーム (mA)		
多バンチ	100	?
単バンチ	5	?
偏向磁石軌道半径 (m)	246.5	165
偏向磁場 (T)	0.108	0.16
周長 (m)	3018	2200
ペリオディシティ	4	6
エミッタンス (nmrad)		
水平	0.5	3
垂直	0.005	0.03
ビームの大きさ ( $\mu\text{m}$ )		
(水平×垂直)	70×7	520×27
ビームの広がり ( $\mu\text{rad}$ )		
(水平×垂直)	7×0.7	22×4.8
加速周波数 (MHz)	508.6	353.2
バンチ長 ( $2\sigma_z$ : p)	<100	<100

PEPはスタンフォード大学で18GeV  $e^+e^-$ 衝突実験用に建設された大型リングで、放射光源への転用が進められている。

表3-2 MRにおける自由電子レーザー (目標値)

Beam energy	: $E = 5 \text{ GeV}$				
Beam emittance	: $\epsilon_x = 0.2 \text{ nmrad}$ $\epsilon_y = 0.2 \text{ nmrad}$				
Energy spread	: $\sigma_E / E \sim 3 \times 10^{-4}$				
Bunch duration	: $\sigma_t \sim 10 \text{ psec}$				
Stored current	: $3 \text{ mA/bunch}$ ( $I_{stored} = 1400 \text{ A}$ )				
wavelength (nm)	$\lambda_s$ (cm)	$N_{stored}$	B (gauss)	K	gain
2.4	25	360	560	1.3	$\sim 10^5$
4.5	30	300	680	1.9	$\sim 10^5$
10.0	50	180	510	2.4	$\sim 10^6$

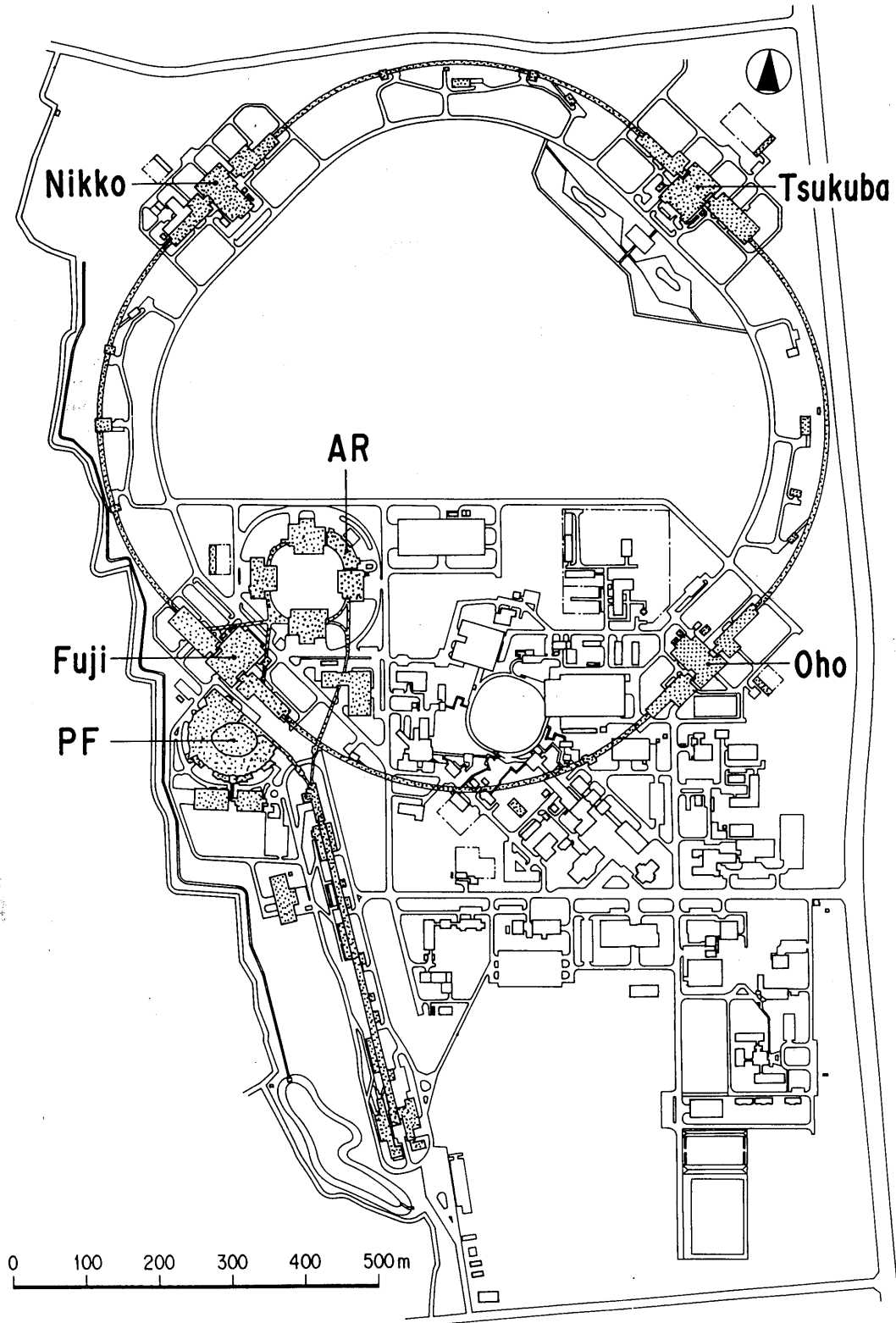


図3-1 トリスタンの配置図

直線加速器からの2.5GeV.電子・陽電子ビームをARに入射し蓄積した後、6~8 GeVに加速、さらにMRに入射する。MRは周長3 km、4箇所(200m直線部)の200m直線部(OHO, TSUKUBA, NIKKO, FUJI 実験ホール)を持つ。

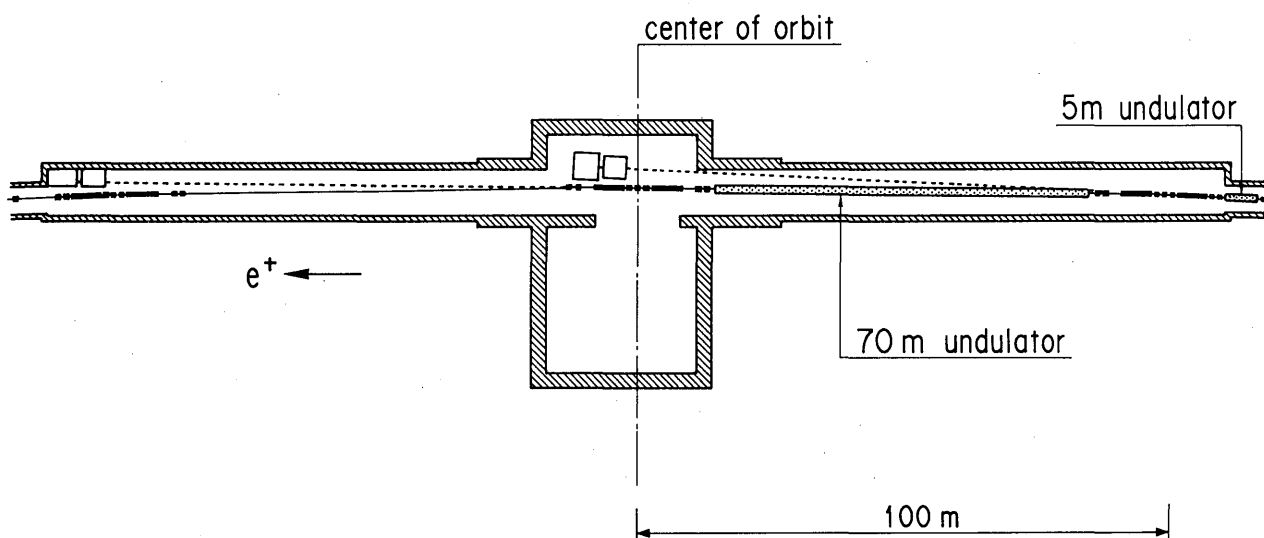


図3-2 MRの200m直線部。超多極アンジュレータ，あるいは自由電子レーザー用アンジュレータを中央部に，その両側にダンピングウイグラーを設置する。



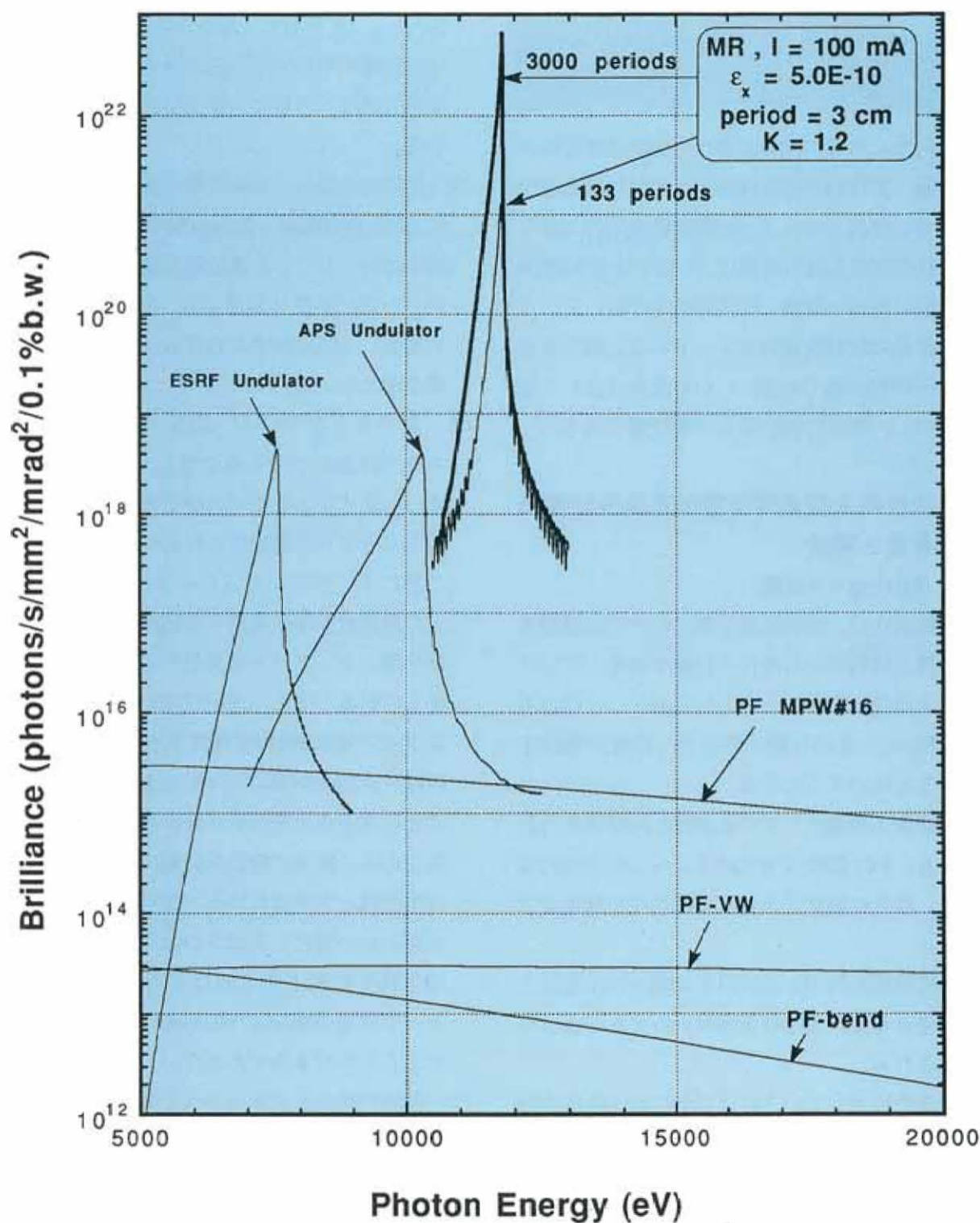


図3-3 MR超高輝度単色光源（X線用超多極アンジュレータ：22ユニット）のスペクトルの計算例。参考として、1ユニットのスペクトルも示してある。また、比較のため計画中の大型高輝度光源（ESRF、APS）、および稼働中のPFでの各種光源の値を示す。

## § 4 次世代大型高輝度放射光施設計画の意義 (学会の見解)

以上紹介したわが国の次世代大型高輝度放射光施設計画、すなわち科学技術庁の大型放射光施設計画、および高エネルギー物理学研究所のトリスタンMRの放射光利用計画は、いずれもその志向する施設の内容・規模、研究課題等において、次世代の世界の放射光研究をリードすると期待される先端的研究計画である。しかも両者は著しく性格を異にし、相互に補い合うべき計画である。

### 4.1 次世代大型高輝度放射光施設計画の意義と現状

#### 4.1.1 SPring-8 計画

科学技術庁は、1990年度予算において加速器本体の製作と建物の設計を行う経費を確保しており、いよいよ建設に向けて一步を踏み出すことになる。このSPring-8の計画の特徴と、計画の現状をまとめると次のようになる。

- (1) 高輝度X線源としての先進性と汎用性を合わせ持ち、わが国の放射光研究レベルの全般的な向上、拡大に貢献できる大規模共同利用施設である。
- (2) 特に民間の利用に従来以上に開かれた施設となる見込みで、先端技術開発への大きな寄与が期待される。
- (3) 建設を担当しているのは科学技術庁所轄の特殊法人、日本原子力研究所と理化学研究所の職員からなる「大型放射光施設計画推進共同チーム」である。
- (4) この計画に関心を持つ全国の産官学の研究者・技術者が集まり、共同利用者の団体として「次世代大型X線光源研究会」を1988年5月に発足させた。この研究会は利用研究と運営体制に関する2作業グループを組織し、前者では現在27のサブグループで個別の研究計画とR&Dの検

討を、後者では運営形態、共同利用体制の検討を行い、「大型放射光施設計画検討委員会」(次項)に提案を行っている。さらに、科学技術庁、学術会議等への要望・提案などの活動を行っている。

- (5) 加速器の設計、利用計画の策定、利用に関連するR&Dの推進、共同利用や運営の形態の討議を目的として「大型放射光施設計画検討委員会」が1989年度に設置され、「共同チーム」と利用者、学識経験者から成るメンバーが検討作業を進めている。
- (6) ESRFが6 GeV、APSが7 GeVのエネルギーで計画しているのに対し、8 GeVの計画であって欧米に比し若干大型である。これはわが国のユーザーの要望をとり入れた結果であって、これによってアンジュレータ1次光で20 keV以上の高輝度X線を発生する可能性が生じ、また偏向部・ウィグラーで発生する硬X線の範囲も拡大される。また、30m程度の長直線部の導入によって更に1桁程度輝度を上げ、さらに新型の挿入光源の開発に向けて大きな自由度をもつことになる点は先行する欧米の施設にはない特色である。欧米の施設は計画の規模、性能等では本計画と大差はない上、先行しているため、後発のわが国としてはこのような性能向上の余地を残す計画とするのは妥当である。これによって欧米の施設より広範囲の実験課題に対応することができるであろう。
- (7) 共同利用は産官学のすべてに開放されるものと当初から企画されている。従来は国立大学共同利用機関として設置されたものに、あとから他省庁、民間企業を受け入れるという形で対応してきたが、この点は放射光科学の利用が官民を問わず、広範囲に拡大している現状に対応したものと評価できる。
- (8) 施設の設置場所はすでに1989年に科学技術庁が決定を行い、兵庫県播磨科学公園都市内の141haの用地、および関連公共施設の工事がす

でに始まっている。

- (9) 組織・運営形態として財団法人「高輝度光科学研究センター」(仮称)の構想が提案されており、政府関係機関等からの委託によって運営される公益的な機関としての研究所が設立される。

#### 4.1.2 トリスタンMR利用計画

MR利用計画の特徴は次のようなものである。

- (1) 極めて小さいエミッタンスを達成する可能性がある。
- (2) 本来30GeVの高エネルギー加速器なので低エネルギー運転の際のエネルギー選択の幅が大きく、建設中の他のどの放射光施設よりも高いエネルギーでの運転ができる。
- (3) 既存の加速器であり、放射光利用のための付帯設備コストは新設施設に比してはるかに小さく、改造にはあまり長い時期を要しないであろう。
- (4) 衝突実験用の非常に長い(200m)直線部を有し、ここに設置できる挿入光源の設計の自由度はいかなる新設放射光施設よりも大きい。
- (5) 以上の結果として、他に比べてはるかに高い輝度 ( $>10^{21}$  photons/s · mm<sup>2</sup> · mrad<sup>2</sup> · 0.1 %b.w.) のX線源を利用する実験、あるいは軟X線の自由電子レーザーの実現に向けての実験が可能である。この高輝度X線を利用する核共鳴散乱線による超単色、高可干渉X線、軟X線FELなどはX線・軟X線光源として未踏の研究領域を切り拓くもので、他の施設に比べMR利用計画の持つ一歩先んじた先進性を特徴づけるものである。従って、当面研究対象は基礎科学に限定されるであろう。

しかしながら、以上あげた利点があるが、以下のような点も考慮する必要がある。

- (1) トリスタンのe<sup>-</sup>e<sup>+</sup>の衝突実験はなお継続中である。MRを高エネルギー物理実験と放射光利用実験の共用にするには放射光実験設備のための改造が必要になり、その間高エネルギー物

理実験を中断させることになる。それよりはむしろ高エネルギー物理実験がしかるべき時期に終了するのを待って、放射光の専用光源に転換されることを期待したい。

- (2) MRは元来、専用光源としてつくられたものではなく、放射光実験に利用できる場所は3箇所の長直線部だけであるが、それらを極限的な条件で使うことを計画しているので、多数のビームラインを設置して多数の一般ユーザーに施設を解放するというタイプの共同利用には適していない。このような役割はSPRing-8計画に期待するのがよい。
- (3) 超低エミッタンスの実現、軟X線自由電子レーザーの開発等はその利用価値のみならず、加速器研究の課題としてそれ自体で大きな価値がある。これらの技術は高エネルギー電子(陽電子)加速器への応用の観点からも重要である。以上のようにわが国の大型高輝度放射光施設計画として、現在提案されている2つの計画は、その内容と役割が多く共通点を持ちながら重要な点で相補的であるばかりでなく、何れもわが国の学術の水準を大幅に向上させると期待されるものであり、本学会としてはこの両者をともに推進すべきであると考えます。

## 4.2 計画推進にあたっての課題と現在の問題点

### 4.2.1 SPRing-8計画

この計画はすでに行政当局の支持を得ているので実現のための働きかけを学会が行う時期は終わった。しかしながら、この計画は稼働中のPFに比べてより高度な研究、より高度な技術の達成を目指すもので、予算・人員・施設の規模などはるかに大きく、その実施に当たって予想される課題は技術的にも、行政的にもきわめて重くかつ大きい。所期の目的を達成するため、建設と運営に当たって考慮すべき原則的なことから次にあげる：



- (1) この施設はわが国の次世代放射光研究における最大の共同利用施設を旨とするナショナルプロジェクトであり、産・官・学のすべての利用者に開放され、有効に利用できるものでなければならない。
- (2) 建設に当たっては、これまで蓄積されているわが国の放射光科学の研究成果・技術的達成のすべてが活かされ、その上に更に新たな努力を重ねて最新鋭の施設とする不断の努力が必要である。そのためには可能な限り建設の初期から十分な学識・経験のある指導的研究者を中心に強力な建設主体を形成し、これを完成後の運営に引き継ぐ努力と行政上の工夫が必要である。
- (3) 前項に関連して放射光発生技術・利用技術の開発を有効に進めるため、高エネルギー物理学研究所放射光実験施設、関連研究施設、研究団体などと省庁間、分野間の研究協力を推進することが望ましい。
- (4) 放射光の発生と利用は技術的に不可分の関係にあり、加速器専門家と利用者との不断の交流により双方が情報と刺激を受けることが建設の成功と技術の進歩の源泉である。
- (5) わが国の国際的地位、また放射光研究の歴史におけるわが国の先導的役割に鑑み、この施設の果たすべき国際的役割について、十分な対応策を当初より策定すべきである。

このような課題を達成することは必ずしも容易ではなく、なお、関係者の多大の努力が求められている。とくに上で指摘した2, 3の点では今後多くの努力が必要であることを強調しておきたい。建設主体は日本原子力研究所と理化学研究所の職員から成る共同チームである。加速器の設計・建設を担当するグループは一応早期に形成され、設計作業が進んでいるのに比べて、利用実験設備やビームラインを担当すべき内部ユーザーグループの形成は今後の課題として残されている。また最終的にこの施設全体の運営にあたりとされる財団法人「高輝度光科学研究センター(仮称)」と共

同チームの関係、役割分担、最終形態への移行のスケジュール等は早期に検討すべき課題である。

上記「高輝度光科学研究センター」に関して特に指摘すべき点は次の二つである。

- (1) この研究所が基本的に研究機関であること。研究所が共同利用機関である以上、利用者へのサービス機能を充実すべきことは自明であるが、これに止まっていたのでは光の発生技術・利用技術のたえざる向上・改善への刺激を失い、研究所が自ら発展のイニシアチブをとることは困難である。
- (2) 人員計画の策定と実現に万全を期すこと。既往の内外放射光施設の建設と運営の経験と実情に鑑み、出来る限り早期に十分な指導力のある内部研究者(in-house staff)を採用するよう、人員計画を策定・実施することが望ましい。外部ユーザーの参加と協力も大いに奨励すべきこととは言うまでもないが、これは内部研究者を軸にしてのみ可能である。もし結果として「研究センター」の人員が著しく不足するときは、内部研究者の研究活動の自由を保障することは困難となり、ひいては研究活動全体の衰退を招くおそれがある。

上に指摘したように、本計画の成功のためには、わが国の学界がこれまでに達成した知識・経験・力量の最良のものをこの建設に投入すること、光の利用側と発生側との建設過程での協力、異なる行政機関、産官学の異なる専門分野・活動領域の研究者、行政担当者が大局的観点に立って協力することが切実に求められている。これら諸問題の解決には行政当局に大きな責任があるのは勿論であるが、研究者側にも多くの努力が求められている。

#### 4.2.2 MR放射光利用計画

既存の加速器を利用するとはいっても、その目的とする超低エミッタンスビームの運転・制御・計測技術、また軟X線FEL等は未踏の技術であり、早期のR&Dが必要である。一方利用装置技術についても同様のことが云えるのであって、準

備研究の早期着手が望まれる。

ESRFが1994年後半、APSが1995年内に利用実験開始を予定している状況で、MR利用という、地の利・時の利は着手が遅れるほど失われて行くので、計画の早期開始・早期実現はこの計画の鍵である。特に、短波長領域のFEL開発に成功すれば、暫くは他の施設の追従を許さないと予想され、これはMR放射光施設の意義を一段と大きなものにするであろう。

### 4.3 むすび

放射光はレーザーと共に、科学史上画期的な光技術の2大革新をもたらした。無限のチューナビリティ（白色性）をもつこの高輝度の光は、その利用が始まってわずか4半世紀の間に基礎科学と先端技術にきわめて大きなインパクトを与え、今も引き続き与えつつある。これは光による物質の構造と性質の探索に強力な手段を与え、現代の社会が要求する生命や物質へのより深い認識を可能にし、更に産業や医療など直接社会生活にかかわる応用へと展開しつつある。

本学会が調査した2つの次世代大型高輝度放射光施設計画は、いずれもわが国の放射光研究を更に新しい飛躍に向かって推進しようとする勇氣ある挑戦である。それらの実現の基盤となる現在の放射光の発生技術・利用技術は、いずれも多年わが国の放射光研究者が自らの努力で蓄積したもので、困難な開発課題は数多くあるが、決して実現不可能なものではない。放射光研究は多年わが国の研究者が世界に先んじて推進、開発してきたという誇るべき伝統を持ち、人材も豊富である。大型プロジェクトの推進に当たっては、人材を得られるかどうかは成功の鍵となるが、わが国にそのポテンシャルは十分にあると考えてよい。有効適切な人材の活用により、この両計画が成就することを期待したい。

また1989年7月に本学会が将来計画の調査を開始し、先ず「次世代大型」の討議を開始した後、

行政当局の積極的対応により両計画のうち先ずSPring-8の推進に明るい展望が拓けつつあることは学会として誠に喜ばしい。一方、MRの利用計画は未だ着手には到っていないが、真剣な検討が関係者の間で進められている。トリスタンの研究の順調な進展と共に出来る限り早い機会に展望が開けることを期待したい。学会は当初この報告書により、学会員はもとより、行政当局を含む各界の関係者の理解と支援を求めたいと望んでいたが、事態はより急速に進みつつある。学会としてはこれら関係諸機関・諸団体、また識者の方々に、これら将来計画について一層の理解と支援を求め、計画の成就のために学会を含む関係者が何をすればよいのか、共に討論し、検討するための手がかりとして、この報告書を参照していただければ幸いである。

なお、この報告書の執筆に当たっては本特別委員会委員以外にも、大型放射光施設計画推進共同チーム、高エネルギー研放射光実験施設の方々から貴重な資料・ご意見をいただいた。特に利用計画については次の方々から資料の提供をいただいた。ここに、氏名（敬称略）を記して感謝する。

### SPring-8 計画

会田 修（阪府大・工）	粟屋容子（理研）
石黒英治（阪市大・工）	泉 弘一（東大・工）
猪子洋二（阪大・基工）	宇山親雄（循環器センター）
大野英雄（原研・物理）	大柳宏之（電総研）
木原 裕（自治医大）	合志陽一（東大・工）
坂井信彦（理研）	塩谷巨弘（東京水産大）
高橋敏男（東大・物性研）	田中清明（名工大・化学）
田中信夫（東工大・理）	辻 和彦（慶大・理工）
寺内 暉（関学大・理）	難波孝夫（神戸大・理）
本堂武夫（北大・工）	前田裕司（原研・物理）
升島 努（広大・医）	宮地英紀（京大・理）
向山 毅（京大・化研）	

## MR計画

青木貞雄 (筑波大・物工)

石川哲也 (東大・工)

岩崎 博 (高エネ研・放射光)

鎌田 進 (高エネ研・トリスタン加速器)

北村英男 (高エネ研・放射光)

小早川久 (高エネ研・放射光)

坂部知平 (高エネ研・放射光)

## 付録1 「輝度」について

「輝度」という概念について簡単に説明しておく。放射光の場合、一般に使われている輝度 (brilliance) の定義は単位電流 (mA) の電子ビームの単位断面積 ( $\text{mm}^2$ ) を光源として、単位立体角 ( $\text{mrad}^2$ ) に毎秒放出されるフォトン数を、光子エネルギーのあるバンド幅 ( $\Delta E/E = 10^{-3}$ ) について表すことになっている。つまり「photons/s · mA ·  $\text{mm}^2$  ·  $\text{mrad}^2$  · 0.1% b.w.」が通常用いられる輝度の単位である。単位電流でなく、実際の運転あるいは設計電流値に対して目盛る場合もあるので、異なる光源の輝度を比較する場合、縦軸の単位に注意する必要がある。この「輝度」の定義は一般の光学あるいは測光学で用いられるもの (luminance) と概念としては同じもので、基本的には光源の単位面積から単位立体角に向けてどれだけ光 (エネルギーあるいは光子数) が出て行くのか、ということである。

輝度は光源側で定義される物理量であって、実際に光を使う実験者が試料あるいは検出器のある断面 (像面) でどれだけの光を受け取るか、とは別の問題である。しかし光を光源面から像面に導く光学系の損失がないものとすれば、像面での輝度、つまり像面を2次光源と見た場合の面積と光の収束角 (発散角) の積は、途中でどのような光学系をおいても光源面での輝度と同じものになる。これは輝度不変の原理として証明されるもので光学の基礎原理の一つである。

放射光の場合、光源断面の大きさは電子ビームの断面そのものであって、その空間分布は定常状態では軌道平面 (x軸) でもその直交方向 (y軸) でもガウス分布をしている。従って、その大きさはそれぞれ標準偏差値  $\sigma_x, \sigma_y$  で表される。次に光の発散角を考えると、これはガウス分布で近似した放射光自体の角度分布  $\sigma_{r'}$  と、電子ビームの角度分布  $\sigma_{x'}, \sigma_{y'}$  とを合成したものである。ここで  $x' = dx/ds, y' = dy/ds, s$  は平均軌道に沿った位置座標である。全発散角を表す量は従って  $\sigma_{Tx'} = (\sigma_{x'}^2 + \sigma_{r'}^2)^{1/2}, \sigma_{Ty'} = (\sigma_{y'}^2 + \sigma_{r'}^2)^{1/2}$  となる。従って、光源の発する全光束を  $F$  とすると、輝度  $B$  は、

$$B = \frac{F}{(2\pi)^2 \sigma_x \sigma_y \sigma_{Tx'} \sigma_{Ty'}}$$

となる。放射光が通常の封入型X線管や放電管に比べて格段に明るいのは  $\sigma_{x'}, \sigma_{y'}$ 、つまり光源のサイズが小さいことだけでなく、光源指向性が格段に高い、つまり  $\sigma_{Tx'}, \sigma_{Ty'}$  がきわめて小さいことによるものである。

次世代型の光源は  $\sigma_{Tx'}, \sigma_{Ty'}$  をアンジュレータの導入によって更に小さくしようとするもので、その場合は  $\sigma_{r'}$  は干渉効果のため偏向部よりも著しく小さくなるが、このとき  $\sigma_{x'}$  が十分小さくならないと干渉効果が減殺され  $\sigma_{Tx'}$  は小さくならない。従って輝度は十分上がらないことになる。アンジュレータを用いる場合は特に電子ビームの水平方向のエミッタンス  $\epsilon_x = \pi \sigma_x \sigma_{x'}$  が小さいことが要求される。干渉効果が十分に起こるためには  $\sigma_{r'}$  が小さいことが重要で、 $\sigma_x$  はむしろ多少大きくてもよい。そのためアンジュレータを挿入する直線部は、ビーム断面は大きいが発散の小さい高ベータ型に設計するのが普通である。垂直方向の量  $\sigma_y, \sigma_{y'}$  については、一般に  $\sigma_x, \sigma_{x'}$  より小さくなるので、水平方向のエミッタンスで光源の性能が評価される。またX線の光学実験で特



に輝度が問題になるのは、X線光学系は一般の長波長の光学系と違って大きな発散角を持つ光を伝送し結像することができない、という光学材料の分光特性にもよる。それにも拘らず、多くのX線光学系では微小領域に結像、集光して実験を行う必要がある。つまり像面での照度(単位面積当たり光束)を光学系によって上げることが困難な以上、像面の照度を上げるためには光源の輝度を上げることが決定的に重要である。特に将来X線マイクロビーム技術によって微小領域、微結晶の構造や物性の研究を目指す場合、光源の $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ 及び $\sigma_{Tx}$ ,  $\sigma_{Ty}$ が小さいことが強く要求される。 $1\ \mu\text{m}\phi$ あるいはそれ以下のX線像による結晶評価・分析・光電子分光実験等はおそらくこのような次世代型光源で可能になるであろう。

## 付録2 安定性について

光源としての電子ビームに要求される「安定性」には、(1)電流値が短い時間で変動しない、(2)ビームの方向・位置・形状が変動しない、という2つの面がある。初期の光源として用いられた電子シンクロトロンでは、電子は低いエネルギーで入射、加速され、最高エネルギーで加速を止めて電子を軌道の内側においたターゲットにあてて $\gamma$ 線を発生したり、外へ取り出したりする。電子は繰り返し入射しては加速され、最後にはなくなる。入射毎に軌道に捕捉される電子数が変動するので、電流値は短い時間内にたえず変動する。また加速の過程でビームの方向・位置・形状も変動するのが普通で、極端な場合は加速の途中でビームの一部または全部を失ってしまう。従ってシンクロトロンは余り安定した光源ではなかった。

これに比べて蓄積リングでは電子ビームを一定エネルギーで回し続けるので、シンクロトロンに比べてはるかに安定である。ところが蓄積リングの安定性も決して完全ではない。ビームは真空中

に残っている気体分子との衝突や電子同士の衝突のため、ゆっくりと減少する。これはやむを得ないとしても真空が悪いとこの減り方は早い。それだけでなく、電子ビームが真空中に誘起する各種の正電荷が安定な運転の邪魔をする。残留気体分子がビームとぶつかって出来る正イオン、正に帯電した微粒子等が電子ビームに引き寄せられて軌道の中に入ってくる。そのためビームが膨らんだり、激しく揺れたりする。この現象はイオントラッピングとよばれ、しばしば実験の妨げになる。これを避けるためには電子の代わりに陽電子( $e^+$ )を蓄積すればよいことが知られており、現にフランスのSuper ACO、わが国のPFなどは $e^+$ で運転され、よい結果をあげている。ただし $e^+$ が何もかも解決するかどうかは不明で、現にPFでは $e^+$ に特有の不安定性が現れており、未だ原因は解明されていない。また電流をあまり大きくすると、第2の原因でビームは広がってしまい、輝度が電流に比例して増えないだけでなく、様々な不安定性の原因にもなる。そのほか、電子ビーム自体が引き起こす不安定要因が色々ある。電子ビームは負電荷のかたまり(バンチ)になって真空中を運動するが、金属の真空容器や高周波空洞の内部に電磁場を誘起する。この電磁場が次のバンチに影響を与えて不安定となる(バンチ結合不安定)。また、バンチの先端が末尾に影響する頭尾不安定という現象もある。

また高周波空洞には電子の周回運動と同期する基本共振周波数以外に高次の周波数を持つ共振のモードがよく現れる。これは空洞の内部構造によって生ずることもあれば、バンチによって励起されることもある。このようなモードが現れるとバンチがこの電磁場から力を受けて不安定になることが多い。これによってビームが縦あるいは横に広がったり、消失したりする。一般にこの種の不安定の原因は多岐にわたり、予測は困難で、やっかいなことに加速器一台ごとに現れ方が違い、一般論では対応できない個性的な現象である。PF

ではさまざまな不安定の発生にその都度適切な診断を行い、虱潰しに解決しては安定性、ひいては光源の輝度をあげてきたが、このためには高度のビーム診断と制御のシステムが必要であった。

特に強調する必要があるのは低エミッタンス化と安定化というのは相反する要求である、という点である。すなわち、一般にエミッタンスを低くするほど不安定性は目立ってくる。理論的に可能なエミッタンスを実現するまでにはこのような不安定の原因を一つ一つ突きとめ、解決してゆかねばならないということである。さらにPFではわずかに3倍程度の低エミッタンス化を実施しただけで、ビームの安定を妨げる多くの外的要因に直面した\*。これは天候や季節の変化による建物・地面の変位、振動(空調、真空ポンプなど)、冷却水温変動、外部磁場の変動などであって、ゆっくりあるいは突然光軸が変化する。このような場合、加速器には何もまずいことは起こっていないのに、光を用いて測定しているユーザーから見れば徐々

に、あるいは突然光軸の調整が狂ったり、雑音が入ったり、極端な場合は何も見えなくなってしまったり、ということの意味する。このようなトラブルに対しては高輝度になればなるほど微妙な対応を迫られることを覚悟せねばならない。

また挿入型光源を使う場合、挿入装置の存在がビームの運動に全く影響を与えないことが設計・製作の目標であるが、現実にはわずかな磁場不整や調整の狂いがあっても影響が出てくる。特にそれは磁極間隙を変えてアンジュレータの基本波長 $\lambda_1$ をチューンする場合に注意を要する。今後2つ以上のアンジュレータを軌道に挿入し、独立にチューニングをするとき、軌道の安定性を確保することは加速器技術の一つの課題となるであろう。

---

\*小早川久：「放射光利用施設フォトンファクトリー」、日本の科学と技術、第30巻、第254号(夏号、1989) 27.