

大型シンクロトロン放射光施設計画

Advanced Synchrotron Radiation Facility Project

上 坪 宏 道*

Kamitsubo Hiromichi

1. はじめに

日本原子力研究所・理化学研究所の大型放射光施設建設計画は、大型高性能の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、1987年から設計研究及び要素技術の開発研究が進められてきた。翌1988年10月に、両研究所の関係者が「大型放射光施設研究開発共同チーム」を結成し、1990年度建設開始に向けて準備を進めている。この施設は大学、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、積極的に国際的研究交流の場としての役割を果たして、基礎的、先導的研究の振興を図ることを目的としている。そのため短波長領域（数keV以上のX線）に重点を置いた高性能放射光源（第三世代放射光源）を建設する。

現在、世界的に新しい放射光施設の計画が多数提案されている。それらは、ある特定目的のための専用光源、長波長領域の汎用高性能光源及びX線領域の汎用高性能光源のいずれかである。第一のものではとくにリソグラフィへの応用を目的としたものが多く、小型で使いやすいものの開発が進められている。一方、後の二つは第三世代の放射光源と呼ばれており、その目標とする特徴は、

- 1) 放射光の輝度が極めて高い
- 2) 挿入光源を放射光の主要な発生源にしている
- 3) 安定である

のようにまとめることができる。

なかでもX線領域の汎用高性能光源を中心とする放射光施設は、電子エネルギーが60ないし80億電子ボルト（6ないし8 GeV）、光源リングの直径が300ないし500mにもなる大きいものである。ヨーロッパでは

表1 高輝度高エネルギー放射光施設の比較

	RIKEN-JAERI	ESRF	APS
エネルギー(GeV)	8	6	7(7.7)
ビーム電流(mA)	100	100	100
偏向磁石軌道半径(m)	44.4	24.96	38.96
偏向磁場(T)	0.6	0.8	0.6
周長(m)	1436	812.8	1100
ペリオディシティ	48	32(16)	40
エミッタンス(nmrad)			
水平	4.94	6.19	8.0
垂直	0.49	0.62	0.8
ビームの大きさ(水平mm)			
アンジュレーター	0.34	0.09	0.08
ウィグラー	0.08		
偏向磁石	0.08	0.15	0.16
ビームの広がり(水平mrad)			
アンジュレーター	0.015	0.018	0.01
ウィグラー	0.066		
加速周波数(MHz)	500.85	352.2	352.96

各国が協力してフランスのグルノーブルにESRF (European Synchrotron Radiation Facility) の建設を進めており、アメリカではシカゴ郊外にあるアルゴンヌ国立研究所にAPS (Advanced Photon Source) の建設が始まろうとしている。前者は6 GeV、後者は7 GeVである。わが国では原研、理研が、8 GeVの放射光施設の建設を計画している。これら3者の比較を表1に示しておく。

大型放射光施設計画について、加速器システムの技術的な検討評価、利用計画の策定及び関連する開発研究計画の検討評価を行なうために、学識経験者による「大型放射光施設計画検討委員会」が去る5月に発足した。また、将来この施設を利用する予定の研究者が集まり、「次世代大型X線光源研究会」(代表菊田惺志東大教授)をつくり、具体的な研究計画の検討を行なっている。

2. X線放射光源

X線は、回折、干渉、散乱、吸収、蛍光および光電子の発生、光反応など多彩な現象を物質で生じ、物質研究の主要な手段を提供している。X線によって物質の構造、原子配列やその欠陥、物質中および表面・界

*理化学研究所大型放射光施設準備室研究開発チーム
総括主幹、日本原子力研究所・理化学研究所大型放射光
施設開発共同チームリーダー

〒113 東京都文京区本駒込2-28-8

面の電子状態、元素分布等の研究が進み、また新しい透過像撮影（ラジオグラフィー）、X線誘起化学反応なども開発されて、非常に多くのことが解明され、科学技術の進歩に寄与している。

現在、X線領域に重点を置いた第三世代放射光施設の建設が強く求められているが、その理由はX線の有用性に加えて、次のようなものが考えられる。

- 1) 指向性がよく輝度が高いので、微小試料や極端条件下での測定、短時間測定と時間分解測定、局所的な構造の決定ができる。
- 2) エネルギーの高い（波長の短い）X線が利用でき、希土類元素等の重元素を含む物質の解析にも適している。
- 3) 波長を精密に分けて（高分解能）、高い精度での測定が可能である。
- 4) 特定の波長のX線による分析や画像処理が可能で、元素別の構造解析や分析、透過像撮影など新しい利用が開ける。
- 5) 強度が高いのでメスbauer効果の測定やコヒーレントX線の利用など新しい応用が可能である。
- 6) 偏光を利用した測定が可能である。
- 7) X線による化学反応の研究や、それをういた新物質合成の研究が可能になる。

いずれにせよ放射光X線は、今後の物質構造及び物質機能の解明、新材料開発とその評価、生体物質の構造解析、生体機能の解明などに不可欠の手段である。高輝度X線放射光施設は基礎科学研究の進歩と先端技術の開発に、大きく寄与するものと期待されている。

3. 必要な光源の条件

大型放射光施設は、X線領域を主体とする高輝度・短波長放射光を得ることを狙いとしているが、その特徴を最大限に発揮するには、以下の点を実現することが必要であろう。すなわち

- ①周期表の元素について、できるだけ多くの元素のK吸収端、L吸収端を越えるエネルギーのX線が挿入光源で得られること。
- ②ミクロン程度の微小試料の測定や、ミリ秒以下の時間分解能での測定ができるように、X線の輝度が充分高いこと。
- ③核共鳴吸収などその起こる確率の低い現象や、微量物質の蛍光X線分析などのために、輝度だけでなく光量（光束，フラックス）が多いこと。
- ④トポグラフィや小角散乱のような測定で十分な分

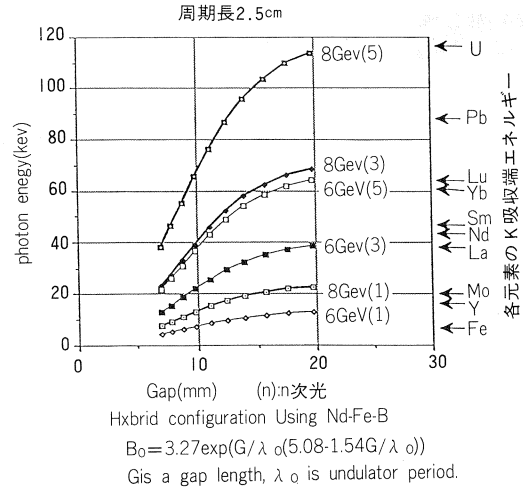


図-1 アンジュレーター光のX線エネルギー

解能を得るため、X線の平行度が高いこと。

- ⑤ビームの安定性が高いこと。

である。

放射光利用の研究には、EXAFSや蛍光X線分析のように、X線のエネルギーが、対象としている元素の吸収端と同じか、それより高くなければならないものがある。金属を例にすると、遷移金属（K吸収端のエネルギーは4～7keV）、イットリウム、ニオブ、パラジウムなどの金属（同じく20～25keV）や希土類元素（同じく40～60keV）の高精度分析を行なうためには、そのK吸収端より高いエネルギーのX線が必要になることが多い。図-1に現在最も強力な永久磁石であるネオマックスを使ったアンジュレーターで得られるX線の波長を示した。これらの波長のX線をアンジュレーターで得るには、電子エネルギーを8GeVにすればよく、そのとき20数keVのX線がアンジュレーターの基本波として得られ、60数keVまでのX線が3次光として得られることが分かる。さらに、全ての元素のK吸収端を越すエネルギーのX線をアンジュレーターで得るためには、5次光を利用することになる。

散乱・回折、トポグラフィや透過像撮影法などでは、数keVから数10keV迄のX線を利用することが多い。しかしコンプトン散乱のように、さらに高いエネルギーのX線が要求されるものもある。また、X線の核共鳴吸収・核励起の現象の研究には、それぞれの原子核固有のエネルギーのX線が必要になる。「次世代大型X線光源研究会」がユーザーの要求をまとめた、研究に必要な光子数とX線エネルギーを図-2に示した。これによると、材料の透過写真CTでは200keVまでのX

放射光の利用にあたっては、光源の位置が動かず、強度の変動が少ないことが要求される。そのためには、イ) 蓄積リングを用いる、ロ) 電源等の安定度が高い、ハ) 建物等の変位、変形の影響を受けにくいことが重要である。しかし、安定な光源を実現する条件がすべて明らかになってはいないので、今後の検討を要する。

本計画で期待される放射光のスペクトル輝度を図-3に示した。

4. 加速器システムの概要

大型放射光施設の中核になる加速器は、8 GeVの蓄積リングとその入射加速器である。蓄積リングは基本的にはシンクロトロンと同じ構成要素を持つ。世界の高エネルギー加速器では、蓄積リングに加速と蓄積の両機能を果たしていることが多い。しかし、高性能放射光源には、蓄積リングに蓄積だけの役割をもたした『全エネルギー入射(full energy injection)』方式が最も優れている。そこで本計画でもこの方式をとり、入射器としては1 GeVの電子リニアックと8 GeV電子シンクロトロンを組合せることとした。なお、陽電子発生用として0.25 GeVの電子リニアックも建設する予定である。

シンクロトロン或は蓄積リングでは、電子ビームは中心軌道からわずかに外れた、中心軌道に対して振動する軌道上を周回している。この振動がベータトロン振動で、その各点での振幅に対応する量はベータトロン関数 β と呼ばれている。さきに述べたエミッタンスはその運動の恒量で、ビームの広がり特性を与える。低エミッタンスとは電子ビームの平行性がよく、小さいスポットに集束できることを示す。また、分散と呼ばれる量 η もよく使われるが、これはエネルギーが違う電子がとる軌道の位置のずれと、エネルギー差との比に対応する。なお、周回する電子のエネルギーが異なれば、一周する周期も異なってくる。これをクロマチシティーと呼んでいる。

シンクロトロンあるいは蓄積リングの磁石の配列には、いくつかの型がある。これまでのシンクロトロンや蓄積リングは、偏向磁石(O)の間に集束(凸レンズ, F)、発散(凹レンズ, D)用の4極磁石を交互に置く配列で、集束、偏向、発散、偏光の4磁石を単位セル(FODO型)にした構造である。この型は最も運転がしやすいが、エミッタンスはあまり小さくならない。

入射器のシンクロトロンはセル数40で、長い直線部2本を持つレーストラック型をしている。2本の直線

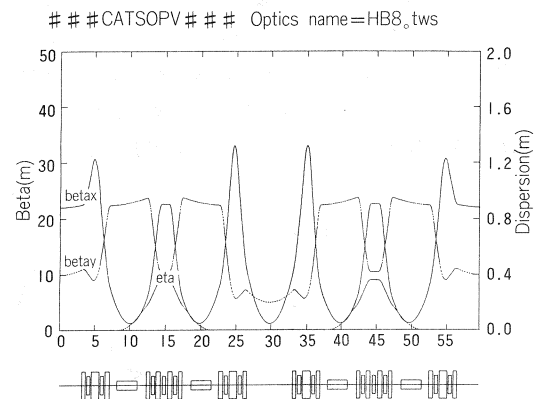
部に入射、取り出し装置及び高周波加速装置を置く。なお、加速高周波は508.6MHzで、シンクロトロンの繰り返し周波数は1Hzを採用した。

前節で述べたように、蓄積リングは低エミッタンスリングでなければならない。それには

- イ) 偏向磁石数を増やす
- ロ) 4極磁石を強くし、電子ビームを強く集束する
- ハ) 6極磁石で電子エネルギーの広がり影響を消す(クロマチシティー補正)
- ニ) 別の6極磁石で非線形の効果を消す(ハーモニック補正)

が必要である。しかし低エミッタンスにすると、リングの中で電子ビームが安定に周回できる空間(ダイナミックアパーチャー)が減少する。そのうえ、多数の磁石を配列したときの配列誤差が、ダイナミックアパーチャーを更に小さくする。このような配列誤差の影響を受けにくい蓄積リングの開発が必要である。

蓄積リングの磁石配置は、いわゆるチャスマン・グリーン(Chasman-Green)型を採用した。この配列では、低エミッタンスにするための4極磁石、クロマチシティー補正用並びにハーモニック補正用の6極磁石が多数必要である。ところがダイナミックアパーチャーを狭くする要因として6極磁石による共鳴があり、これを補正するためにハーモニック補正6極磁石を導入した。多数の磁石の調整には、計算機による詳



図の下に、磁石の配置を示してある。

7-SEP-89 16:42:43

Cell Length	Betamax:	betay=4.9642(m)
59.54(m)	32.9880(m)	Betaymin:
Nux/Cell:	(@Q2)	4.9642(m)
2.1342	Betaymax:	(@L0)
Nuy/Cell:	23.7253(m)	Etamax:
0.7983	(@Q4)	0.3600(m)
Gz; x/Cell:	Betamin:	(@Q5)
-4.9739	1.1339(m)	
Gzly/Cell:	(L0)	
-1.6590	eta=0.000(m)	

図-4 蓄積リングのベータトロン関数と分散

しいシミュレーションが必要で、より優れた性能を与える解を見出さなければならない。

図-4に最終的に得られた低エミッタンスリングのベータatron関数 β_x , β_y および分散 η を示した。このリングは、挿入光源を設置する直線部分の長さが6.5mで、そこでの β_x が、交互に大きい値と小さな値を取るようにしたものである。 β_x の大きいところは電子ビームの平行度がよく、従ってアンジュレーターを設置するのに適している。一方、 β_x の小さいところは、マイクロアンジュレーターやウイグラーを設置するようにしている。このリングについて、シミュレーションで求めたダイナミックアパーチャーは、リングの真空チャンバーを十分に越す大きさになっており、優れた性能の低エミッタンスリングが設計できた。前節で述べた世界の高輝度高エネルギー放射光源の性能を、設計値で比較したものが表1である。

ところで、このリングには96個の偏向磁石、500近い4極磁石と350を越す数の6極磁石が周長約1.5kmに亘って配置されている。この配列誤差や磁場の不均一がダイナミックアパーチャーを小さくするので、磁石の製作精度、配列の精度をこれまで以上に上げる努力が必要である。

蓄積リングでは、1周にわたって電子の集団(バンチ)が幾つもある場合(多バンチ蓄積)と、1つしかない場合(単バンチ蓄積)がある。多バンチ蓄積を行なうときには、リニアックのパルス巾を1マイクロ秒程度と長くして1パルス毎に加速し、蓄積リングに入射することを繰り返す。一方、陽電子の多バンチ蓄積や電子(陽電子)の単バンチ蓄積では、リニアックのパルス巾を10ナノ秒(1ナノ秒)とし、シンクロトロンに8バンチ入射したあと加速する。

次に蓄積電流を増やす問題について述べよう。そのためには

- イ) ダイナミックアパーチャーを大きくする
- ロ) ビーム不安定性をなくす

ことが必要である。

不安定性をなくすには、真空チャンバー内の真空をできるだけ良くし気体分子との衝突によるビーム電流の減少を抑えること、加速空洞の特性をよくしてビーム不安定を起こす危険な高次高調波共振を減らすことなどが必要である。陽電子蓄積も不安定性をなくすための有力な解決策といわれている。

5. ビームライン及び光学・測定部の概要

蓄積リングから放射光を取り出し実験に供する部分は、基幹チャンネルとビームラインと呼ばれている。挿入光源あるいは偏向磁石から放射光が出た後、基幹チャンネルを通るが、ここには実験室と蓄積リングの間で真空のトラブルを防ぐための諸装置が置かれる。なお、高エネルギーの放射線も発生するので、その防護のための配慮も必要である。基幹チャンネルを過ぎた後は、ミラー、スリット、モノクロメーターや真空遮断のためのベリリウム窓などからなる光学系の装置が置かれ、最後に分析、照射装置や測定装置が設置される。放射光は輝度が高く、しかも非常に細いビームになるので、光学系には熱的に大きな負担がかかり、たいいていの物質がモノクロメーターやミラーとしての役割を果たせなくなると思われる。光学素子の開発は特に緊急を要する重要な研究開発課題である。なお、参考までに50m先での光ビームの大きさと、光子の強度を表2に示した。

表2 3.50m先におけるビームサイズ及びその中心における光子強度

	アンジュレーター	ウイグラー	偏向電磁石
ビームサイズ(mm)			
水平	~2	~160	...
垂直	~1.2	~6	~6
光子強度(光子数/秒 m0.1%バンド幅)	~1×10 ¹⁵	~5×10 ¹¹	~3×10 ¹⁰

本計画では挿入光源が主要な光源であるうえ、ミラーなどで簡単に光の方向を曲げることは極めて難しい。そのため、複数の測定装置をビームラインに沿ってシリーズに並べる『串刺し型利用』が行なわれるであろう。そのため比較的長いビームラインが要求されている。図-5にビームライン配置案を示した。なお、挿入光源の出口からビームラインの端までが約100mに

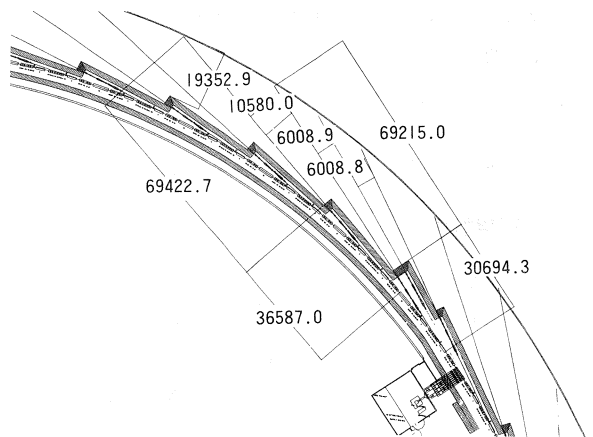


図-5 ビームラインレイアウト

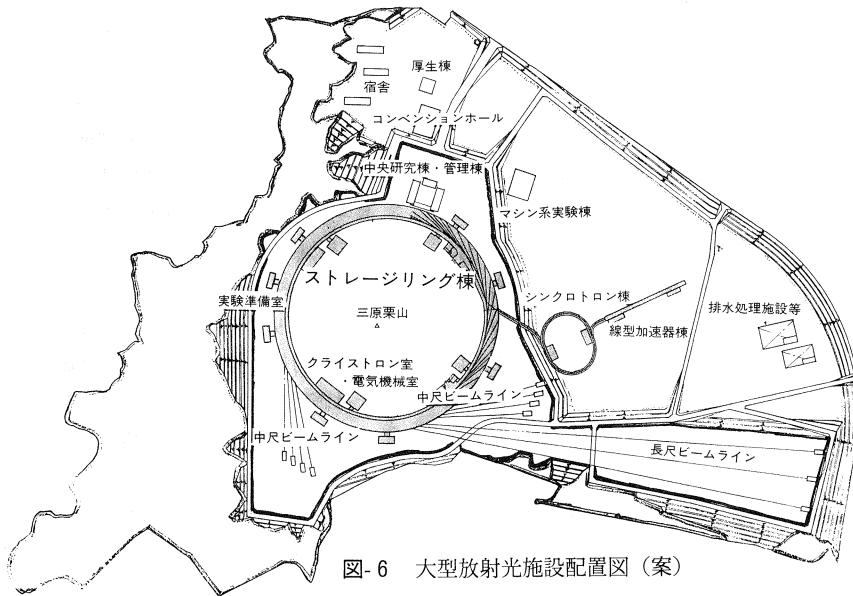


図-6 大型放射光施設配置図(案)

なるよう、建物の設計を進めている。

この蓄積リングは48本の直線部分を有している。そのうち入射に一本、高周波加速に4本、その他に2本利用するので、挿入光源用の本数は41本である。このほか偏向磁石からのビームラインを9本設置する計画なので、全体で50本のビームラインが将来利用可能である。しかしこれについては、利用者側からもっと多くのビームラインを偏向磁石からとれるようにして置くべきとの意見が強く出され、今後の検討課題になっている。加速器システムの建設完了時期までには、約10本のビームラインを建設する予定で、計画を進めている。

図-6に播磨科学公園都市大型放射光キャンパスにおける施設の配置計画案を示した。蓄積リングの内側に約340mの標高を持つ三原栗山を残し、蓄積リングはそれを取り巻くように建設する。蓄積リングおよび実験準備棟、研究棟、管理棟を設置する部分は290mレベルで平坦にし、将来長尺ビームラインが設置できるようなスペースを残してある。シンクロトンとリニアックは、280mレベルで整地した部分に建設する。

6. 利用計画

大型放射光施設は大学、国公立研、産業界の共同利用に供される予定である。利用の形も一般的なビームライン共同利用のほか、先端研究のための一定期間内占有使用、特定ユーザーの専有使用や分析・解析サービス等が考えられている。

本施設を用いた研究課題については、「大型放射光

施設計画検討委員会」「次世代大型X線光源研究会」で検討している。すでに20をこす課題について、ビームラインの提案等もなされている。しかし本施設はどんなに早くても7年後にしか利用できないので、最終的な課題の決定はもっと後にならう。また、本施設が予定している性能を十分に発揮できれば、X線領域の高輝度光源としては世界最高性能のものになる。従ってその利用研究では、予想されない新しい研究課題が出てくる可能性も高い。これまで多くの加速器施設が、建設前に期待したものと全く違った現象を見いだして、学問の発展に寄与している。

7. おわりに

大型放射光施設の建設は、順調に進めば1990年から始まり、1995年に加速器及び蓄積リングが完成して、加速・蓄積テストが開始されることになっている。それまでには約10本のビームラインが完成し、放射光を用いたテスト実験が1996年からは開始されるようになるであろう。

この施設の建設計画、R&D計画及び利用計画などは、第1節で述べた「大型放射光施設計画検討委員会」で検討評価することになっている。この委員会は、下部委員会として、加速器小委員会、利用小委員会を置き、細部に亘って検討していく予定である。また、具体的な研究計画は「次世代大型X線光源研究会」で検討を進めている。将来の利用に関心のある方は、この研究会(代表 東京大学工学部物理工学科 菊田惺志教授)に問い合わせて頂きたい。