大型放射光施設(SPring-8)の建設計画と利用

(日本原子力研究所) 原見 太幹, 横溝 英明, 大野 英雄,
(理化学研究所) 原 雅弘, 植木 龍夫

兵庫県播磨科学公園都市に建設する大型放射光施設(SPring-8)の建設計画と利用について記述する。この施設は、産・官・学に広く開放する大規模共同利用研究所の役目を果たすとともに、国際的研究交流の場として外国の研究者にも開放する。またこの施設は、材料、バイオテクノロジー、電子工学、化学、医療等広い分野の研究技術開発に寄与し、21世紀の先端技術開発に大いに貢献できる。

I. はじめに

科学技術庁、日本原子力研究所、理化学研究所が主体となって、短波長領域(波長1 nm程度以下)に重点をおいた高輝度光源である大型放射光施設SPring-8(Super Photon ring-8)の建設を、兵庫県播磨科学公園都市に予定している。この施設は、産・官・学に広く開放する大規模共同利用研究所の役目を果たすとともに、国際的研究交流の場として外国の研究者にも開放する。高輝度の光を利用して、多様な物質の構造を観察すること、短時間に起こる物質の変化をとらえること、極微量物質の分析をすることなど未踏の科学技術分野の開拓を期待している。この施設は、材料、バイオテクノロジー、電子工学、化学、医療等広い分野の研究技術開発に寄与し、21世紀の先端技術開発に大いに貢献できる⁽¹⁾。

SPring-8は入射系施設であるライナック・シンクロトロンと蓄積リングから成る⁽²⁾⁽³⁾。蓄積リングに光を取り出すビームラインを設けて利用研究に供する。蓄積リングのエネルギーは8 GeV、蓄積電流が100 mAで、挿入光源装置(アンジュレータ、ウィグラー)36台を装荷できる。この施設は、挿入光源装置を用いて10~20 keV程度のX線を基本波で発生することができ、偏向電磁石を用いて20~100 keVの硬X線をかなりの強度で利用できる光源専用加速器である。

光速に近い速さの電子が磁場中で曲がる時発する強い光(放射光)は1940年代に発見され⁽⁴⁾⁽⁵⁾、そのエネルギーが広範囲にわたる連続スペクトルで、強度が強く、指向性がよい等の特徴を持ち、その有用性が早くから指摘されている⁽⁶⁾。

放射光の利用研究は、歴史的に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⁽⁷⁾。その後、光源の専用加速器としての電子蓄積リングを作り、高エネルギー実験とは独立に放射光を使う時代となった。さらに、最近で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するようになってきた。こうして真空紫外・軟X線の分光学用光源として利用し始めた放射光は、物質の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てきた。

1895年にレントゲンがX線を発見して以来、線源として用いてきたX線管の輝度の向上はあったが、放射光によってX線の輝度の向上はさらに大きな変化を遂げつつある。偏向電磁石からの放射光、低エミッタンス化と挿入光源装置の導入で輝度は著しく向上した。

1975年に完成した東京大学物性研究所のSOR-RING(INS-SORII)は、世界で初めて光源として専用に建設された電子蓄積リングである。1980年代に放射光利用を主目的とする2 GeV級蓄積リングとして、高エネルギー物理学研究所に放射光実験施設(PF)が完成した。ビームラインや実験ステーションを増設し、現在約50件の実験が同時に実施できるようになっている。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人を越えている。PFは光源としての高度の性能を実現してきたが、新規設備の拡充の余地はほとんど

Construction Plan of Large Synchrotron Radiation Facility (SPring-8) and Its Application: Taikan HARAMI, Hideaki YOKOMIZO, Hideo OHNO, Masahiro HARA, Tatsuo UEKI.

(1991年1月17日 受理)

どなくなってきた。また、利用者数の増加に伴い、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り、X線放射光利用の限界に達している。

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を強く意識するようになり、X線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が強くなってきた。

外国においても高輝度光源である放射光施設として、米国ではアルゴンヌ国立研究所に建設するAPS (Advanced Photon Source, 7 GeV)、ヨーロッパでは各国が協力してフランスのグルノーブルに建設するESRF (European Synchrotron Radiation Facility, 6 GeV)がある。

Ⅱ. 高輝度光源施設の特徴

永久磁石を用いた挿入光源装置(アンジュレータ)が光源の輝度を高めることが実証されて以来、加速器に設置するようになり放射光光源の主力となりつつある⁽⁶⁾。アンジュレータ光の特徴として、①光の輝度が高い、②光の平行度が良く干渉性が高い、③準単色光で波長は可変である、④偏光特性を直線偏光から円偏光までの設計が可能である、がある。

アンジュレータの性能を充分に発揮するためには、次の理由で蓄積リングが大型化することになる。

- (1) アンジュレータ光のエネルギーは電子エネルギーの2乗に比例するので、その基本波で10 keV以上のX線を発生させようとする、蓄積電子エネルギーを高くする必要がある。
- (2) 電子ビームの空間的広がりや角度の広がりを示す物理量、エミッタンスは偏向電磁石の数の3乗に反比例するので、エミッタンスを10 nm・radより小さくするためには、磁石配列の基本単位(セル)の数を大きくする方が有利である。
- (3) アンジュレータを主要な光源とするためには、挿入光源装置を入れる長い直線部を作る必要があり、加速器の周長が長くなる。

高輝度光源である大型放射光施設を建設するにあたって、上記のように施設が大型化するほか、技術的にも次のような開発課題を克服する必要がある⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

- (1) 低エミッタンスの電子ビームを安定に蓄積するための加速器技術開発(真空技術、高周波加速技術、計測・制御技術等)
- (2) 高輝度光利用技術の開発として、光学素子の開発、光学系の熱負荷対策(新手法、新材料の開発)、検出器・分光素子の技術開発。

挿入光源装置を用いた高輝度光源の出現によって、利用分野において既存の光源では到達できない未踏の科学技術の領域を探索できる⁽¹¹⁾。その研究課題として、

- (1) 高い光子束を利用する微小な散乱・吸収断面積を持つ系の研究
- (2) 高い輝度を利用する微量の系の研究
- (3) 放射光の特性(エネルギー、運動量、位置、角度、時間等の高分解能、偏光、干渉性等)により可能となる研究

がある。物性研究分野では、半導体、超伝導体、単体、多元化合物、混晶、非晶質体、完全結晶、超微粒子、超薄膜、人工超格子など組成や構造が多様な研究がある。生体物質の研究では、分子構造と生体機能、生命現象の解明、生体分子デザインの原理探索等の研究がある。また新しい手法として、時間分解X線回折、時間分解局所構造解析、角度分解、磁気散乱、核ブラッグ散乱、超高分解能X線非弾性散乱等が芽生えている。こうして、高輝度光源を利用し、物性、生物の研究に新しい手法を適用した科学技術の発展を期待している。

Ⅲ. SPring-8 の概要

SPring-8は、電子を8 GeVまで加速する入射系施設と電子を8 GeVのまま長時間(10~15 h)蓄える蓄積リングから構成している⁽²⁾⁽³⁾(第1図)。

入射系施設は、線型加速器(リニアック)とシンクロトロンを組み合わせたものである。シンクロトロンは、蓄積リングに電子を全エネルギー(8 GeV)で入射する。蓄積リングに陽電子あるいは電子を蓄積できる設計としている。電子の場合、ライナックからのパルス電流を高くすることができ、蓄積リングに所定の電流を蓄積するための入射時間を短くすることができる。だが、電子を低エミッタンスで運転する時に電子ビームが不安定になることを予想し、陽電子でも蓄積可能なように陽電子発生装置をライナックに備えている。以下各施設の概要を述べる。

1. 入射系施設

入射系施設の主要仕様を第1表に示す。

(1) ライナック

ライナックの全体概念図を第2図に示す⁽³⁾。ライナックのエネルギーは、シンクロトロンの運転のし易さ・安定性、将来の他の研究分野での利用の発展性を考慮して1 GeV程度としている、電流パルス発生・繰返し周波数は60 Hzで、ピーク電流は電子で100 mA、陽電

第 1 図 SPring-8 の建設敷地と加速器施設の配置

第 2 図 ライナックの機器配置

第1表 入射系施設の主なパラメータ

ライナック	
エネルギー	1.0 GeV
繰返し周波数	60 Hz
RF 周波数	2,856 MHz
クライストロン出力	35 MW
加速管	
構造	進行波型
加速モード	$2\pi/3$
セル数	81
長さ	2.835 m
エネルギーゲイン	40 MeV/加速管
シンクロトロン	
入射エネルギー	1.0 GeV
最大エネルギー	8.0 GeV
最大電流	10 mA
繰返し時間	1 s
周 長	396 m
ラティス型	FODO
セル数	40
チューン(x/y)	11.73/8.78
クロマチシティ(x/y)	-15.3/-12.7
エミッタンス	192 nm $\cdot$ rad
RF 周波数	508.58 MHz
ハーモニック数	672
放射損失(8 GeV)	11.55 MeV/turn
加速電圧(8 GeV)	17.1 MV
ビーム寿命	10 s 以上

子で10 mAである。そのパルス幅は蓄積リングの多バンチ運転と単バンチ運転に応じて異なり、1 ns $\sim$ 1 μ s である。

陽電子発生用電子ライナックの主な仕様は、エネルギーが0.25 GeV、繰返し周波数が60 Hzで、ピーク電流が10 A、パルス幅が1 ns $\sim$ 10 ns である。共に加速周波数は2,856 MHzである。加速管の構造は進行波型で、定勾配型の $2\pi/3$ モードを採用している。加速管1本当たり81セルからなり、長さは2.835 mである。加速管1本で40 MeVのエネルギーゲインがある。マイクロ波の必要パワーは加速管1本当たり20 $\sim$ 25 MWであり、このパワーを供給するクライストロンとして、実績・信頼性を考慮して35 MW程度のものを検討している。

(2) シンクロトロン

シンクロトロンは、ライナックからエネルギー1 GeVの電子を受け取り、エネルギー8 GeVで蓄積リングに射出する。シンクロトロンの磁石の配列(ラティス)はFODO型を採用し、40個のセルで構成している⁽³⁾⁽¹²⁾。入射・射出用の直線部を2箇所設けている。

全体としてラティスはレーストラック型をしている。ラティスの周長は396 mである。シンクロトロンからストレージリングへの入射効率をよくするため、シンクロトロンのエミッタンスを200 nm $\cdot$ rad程度としている。蓄積リングとシンクロトロンの周長比は29/8になるように決め、蓄積リングの単バンチ運転が可能ないようにしている。シンクロトロンのラティスを第3図に示す。

磁石は、偏向電磁石68台、4極電磁石80台、6極電磁石64台、補正用電磁石80台からなる。加速高周波の周波数は蓄積リングと同じく508.58 MHzで、加速空洞は多連セル型を採用し、2箇所直線部に分けて設置する。ハーモニック数は672である。8 GeVにおけるシンクロトロン放射エネルギーは、リング1周当たり11.55 MeVである。必要な高周波パワーは合計1.3 MWである。

真空ダクトの大きさは、ライナックから入射する電子ビームに対して入射効率をなるべく高くするようにし、その内径(横方向72 mm縦方向34 mm)を決めている。シンクロトロンの加速時の磁場変化によって発生する渦電流を小さく抑えるように、薄肉構造としている。電子ビームのシンクロトロン内での寿命は、ダクト内の残留ガスと衝突して失われる時の寿命で決まる。シンクロトロンでのビーム寿命は短くても約10 sあればよいので、真空ポンプの寿命も考慮し、悪くても 10^{-4} Paの真空度を確保するとしている。シンクロトロンの加速繰返し周波数は1 Hzで、その間偏向電磁石の強さは0.106 T(1 GeV)と0.85 T(8 GeV)の間を繰り返す。シンクロトロンの最大電流は10 mAである。

2. 蓄積リング

蓄積リングの主な仕様を第2表に示す⁽³⁾。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 nm $\cdot$ rad以下になるようにしている。多数の直線部を設け、標準的な挿入光源(4 $\sim$ 5 m程度の長さ)以外に、新しい試みとして長い直線部(20 m以上)を装置できるようにしている。この長直線部では、輝度の高い放射光を得るばかりでなく、将来電子ビームのエミッタンスを光の回折限界まで下げる実験に使う。

蓄積リングのラティスは、Chasman-Green型の単位セル(第4図)を基本にし、セル数48、周長1,436 mであり、低エミッタンスリングを目指している。単位セルは、偏向電磁石、4極電磁石、6極電磁石と6.5 mの直

第 3 図 シンクロトロン・の機器配置

第 2 表 蓄積リングの主なパラメータ

エネルギー	8.0 GeV
電流(多バンチ)	100 mA
電流(単バンチ)	5 mA
周 長	1,435.95 m
ラティス型	Chasman-Green
セル数	48
チューン(x/y)	50.78/17.8
エミッタンス	7.18 nm·rad
クロマチシティ(x/y)	-113.168/-43.319
RF 周波数	508.58 MHz
ハーモニック数	2,436
放射損失(8 GeV)	11.55 MeV/turn
加速電圧(8 GeV)	17.1 MV
ビーム寿命	20 h 以上
ダンピング時間(x/y/s)	8.47/8.48/4.24 ms
臨界光子エネルギー	28.32 keV
偏向電磁石強度	0.665 T
偏向電磁石曲率半径	40.098 m
直線部長さ	6.5/30 m

線部で構成する。4 極電磁石で電子ビームを集束し、6 極電磁石で電子ビームの安定性を増すための補正を行なっている。

第 5 図に蓄積リングのラティスパラメータを示す。蓄積リング全体で、偏向電磁石 88 台、4 極電磁石 480 台、

6 極電磁石 336 台ある。これらの磁石は 0.5 mm 厚電磁鋼板を積層して製作する。この製作精度、磁石の設置精度が重要となる。加速空洞は単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 を採用する。

加速空洞は蓄積リングの 4 個所の直線部に各 8 個設置し、1 MW のクライストロンからパワーを供給する。高周波技術については、電子ビームを安定に蓄積するための高調波対策が重要となる。真空については、蓄積ビームの寿命を 20 h 程度確保するため、真空度 10^{-7} Pa を必要とする。真空チェンパは電子ビームの通るレーストラック型の部屋とスロットで結んだ矩形の部屋があり、真空ポンプとして矩形の部屋に分布型 NEG ポンプを設置する。真空技術として、分布型 NEG ポンプの信頼性の確認、電子ビームと真空壁との相互作用による電子ビーム損失を減らすためのインビダーノス低減に工夫を要する。

3. 光ビームライン

蓄積リングには、6.5 m の直線部が 40 本、30 m の長直線部が 4 本ある。このうち、5 本が高周波加速空洞の設置に使い、1 本が電子ビームの入射に用いる。挿入光源装置に使用できる直線部は残りの 34 本である。偏

BM: 偏向電磁石, Q: 4 極電磁石, S: 6 極電磁石,
CR: クロッチ, ID: 挿入光源装置 (単位: mm)

第 4 図 蓄積リングの磁石配置

BM: 偏向電磁石, Q: 4 極電磁石, S: 6 極電磁石

第 5 図 蓄積リングのラティスパラメータ

向電磁石から取り出す光ビームラインについては、17 本程度を考えている⁽²⁾。第 6 図に蓄積リングで期待される光スペクトルを、第 7 図に 2 m のアンジュレータ

第 6 図 蓄積リングの光スペクトル

第 7 図 アンジュレータ (2 m) からの光のパワー密度分布

で予想する光のパワー密度を示す⁽¹³⁾。

光ビームラインの長さは、光源の出口から測って80mである。各光ビームラインは、光源出口から約30mまでが遮蔽壁の中にあり、そこに基幹チャンネルを設け、モノクロメータやミラーの光学素子を配置する。実験によっては広い照射野を必要としたり、平行度の高いビームを必要とする場合が考えられるので、さらに300mおよび1,000mまで延長可能なスペースを用意している。

Ⅳ. 放射光の利用研究

X線領域までの光を利用する研究分野として、物理・化学の基礎研究から医療・工学等における応用分野まで広範囲の研究がある⁽¹⁰⁾。以下に各分野の研究例を挙げておく。

1. 物理・化学の分野

(1) 物質の微細構造の研究：結晶の構造解析；構造物の非破壊検査（トモグラフィ）；高温超伝導物質の構造解析；固体のダイナミックスの観察（トポグラフィ）。

(2) 精密化学分析：光励起化学反応による超薄膜・多層膜の物質創製（X線 CVD）。

(3) 各種分光・分析：EXAFS, XANES, SEXAFS等による物質の局所構造解析；光電子分光等による内殻励起、固体表面の電子状態の研究。

(4) 散乱実験：核ブラッグ散乱による超単色X線の発生とメスバウアー効果を利用した散乱研究。

小角・中角散乱による溶液、格子欠陥、コロイド粒度・形状分布の解析。結晶の散漫散乱による格子の乱れ、照射による格子欠陥の研究。

コンプトン散乱による物質内の電子の運動量分布の研究。磁気散乱による磁気構造、スピン依存吸収の研究。逆コンプトン散乱で得られる1 GeV以上の高エネルギー光による原子核の研究。

2. 生体・医学の分野

(1) 生体物質の研究：生体高分子の構造解析；生きたままの生物組織の観察。

(2) 生理の研究：酵素の反応活性と構造の解析；筋肉中の分子の動きの研究；放射線損傷の研究（DNAレベルの放射線効果、医学治療）；毛細血管の研究。

(3) 病気診断と治療：心筋梗塞の診断（アンジオグラフィ）；血管の診断；ガンの精密診断と治療。

3. 工学の分野

(1) 超微細加工の技術開発：次世代の超LSI加工（リソグラフィ）。

(2) 自由電子レーザーの開発：波長可変レーザーの開発。

4. 原子力分野

原子力材料、放射線生物等の分野で、先端的研究を可能とする⁽¹⁴⁾。

(1) 核融合プラズマ診断に関する原子分子物理の研究：トカマク装置のプラズマ温度(10 keV)に相当するX線による多価イオンの準位構造決定。

(2) 原子力材料関連の物性物理分野の研究：X線干渉計、X線顕微鏡、時間空間分割 EXAFS などによる照射欠陥や照射損傷の局所構造解析；材料腐食機構などの *in-situ* 解析。

(3) 超ウラン元素などの極微量分析と状態解析の研究：蛍光X線分析、時間空間分割による構造解析。

(4) 放射性廃棄物処理処分のための群分離の研究：光化学反応、X線同位体分離。

(5) 生物の放射線照射効果の研究

Ⅴ. 施設の建設場所

SPring-8を兵庫県がテクノポリスとして開発を進めている播磨科学公園都市に建設する(第1図参照)。施設のための敷地は141 haの広さを持つ。敷地内に、海拔290mと280mのレベルで平坦な部分を造成し、前者に蓄積リングを、後者にライナック、シンクロトロンの入射系施設を建設する。

Ⅵ. 建設スケジュール

SPring-8の製作は1990年度から開始し、98年度に完成予定となっている。加速器完成までに光ビームライン10本を整備する。建設敷地の造成は1989年度に開始し、92年度に完了する。建物の建設は1991年度に開始する予定である。

Ⅶ. 建設・運営体制

本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、そのため両研究所の職員が集まって「大型放射光計画推進共同チーム」を結成している。建設完成まで、この体制で研究開発、建設を実施し、建設完成後、財団法人「高輝度光科学研究センター(Japan Synchrotron Radiation Research Institute; JASRI)」(1990

年発足)が施設の管理運営にあたり、研究環境を維持することができるよう計画している。

VIII. おわりに

高輝度光源を目指した大型放射光施設(SPring-8)の建設計画、加速器技術開発を進めている。この施設は産・官・学に広く開放する共同利用研究所であり、国際的な研究交流の場を提供することになる。21世紀における広い研究分野の先端技術開発に貢献できることを期待している。

— 参考文献 —

- (1) 高良和武：SR 国際シンポジウム「大型放射光施設計画と先端科学技術」，神戸，(1990)。
- (2) 上坪宏道：放射光会誌，2[4]，69 (1989)。
- (3) 原 雅弘，横溝英明：同 上，3[1]，45 (1990)。
- (4) BALDWIN, G.C.: *Phys. Today*, 28[1], 9 (1975)。
- (5) SCHWINGER, J.: *Phys. Rev.*, 70, 1912 (1949)。
- (6) GREEN, G.K.: *BNL 50522*, (1976)。
- (7) 日本物理学会編：シンクロトロン放射，(1986)。
- (8) WINICK, H., BROWN, G., HALBACH, K., HARRIS, H.: *Phys. Today*, 34, 50 (1981)。
- (9) 原 雅弘：応用物理誌，59[7]，889 (1990)。
- (10) 下村 理，塩谷亘弘，植木龍夫，菅 滋正，渡部 力：放射光会誌，3[2]，155 (1990)。
- (11) 菊田惺志：同 上，3[3]，205 (1990)。
- (12) HARAMI, T., et al.: *Proc. XV Int. Conf. High Energy Accelerators, Tsukuba 1989*, Part. Accel. 3363 (1990)。
- (13) HARAMI, T.: *JAERI-M 89-079*, (1989)。
- (14) 上坪宏道，鈴木康夫：原子力誌，31[9]，43 (1989)。

1989 ASME B&PV Code 日本語訳

■ Section V 非破壊試験

B5判・624頁 定価58,000円(本体56,311円)(〒360円)

■ Section VIII Div.1 压力容器

B5判・1,048頁 定価68,000円(本体66,019円)(〒410円)

最新刊!!

■ Section VIII Div.2 压力容器 代替規則

B5判・736頁 定価54,000円(本体52,427円)(〒360円)

■ Section IX 溶接及びろう付施行法， 溶接士等の認定

B5判・316頁 定価36,000円(本体34,951円)(〒360円)

◎ご注文・お問合せは……

〒107 東京都港区赤坂4丁目1-24

日本規格協会

TEL 03 (3583) 8001

FAX 03 (3586) 2029