

話 題 (II)

シンクロトロン放射光施設とその利用  
——21世紀に広がる研究——

(原研) 原 見 太 幹

1.はじめに

「人工光システム」といわれるシンクロトロン放射光施設を光源とする科学技術の研究が、注目されている。エレクトロニクス素子の開発、新材料開発やライフサイエンスの分野に於ける基礎的・応用的研究でシンクロトロン放射光を用いて得られた成果が広く評価され、放射光施設の有用性が認識されている。その主な理由は、シンクロトロン放射光の次のような特徴にある。1) 可視光からX線に至る広い波長領域の「光」が発生するので各種の研究に利用できる。2) 「光」の強度が高い。3) 「光」の指向性がよい。

シンクロトロン放射光は、高エネルギー電子が磁場中で曲げられるときに発生するもので、当初は高エネルギー物理研究用電子加速器の副次的な利用で研究が進められた。シンクロトロン放射光による研究の意義が認識されるにつれて、その専用加速器が建設され、シンクロトロン放射光利用研究が飛躍的に発展した。さらに、最近では汎用高輝度高性能光源を目ざした第三世代の放射光施設の建設計画が進められている。その特徴は、1) 「光」ビームラインを電子軌道に沿って配置し、多くの研究者が利用できること、2) 「光」の輝度がきわめて高いこと ( $10^{16} \sim 10^{17}$  光子数/秒 / (ミリメートル)<sup>2</sup> / (ミリラジアン)<sup>2</sup> / 0.1% バンド幅/ミリアンペア)、3) 挿入装置 (アンジュレータ、ウイグラー) を「光」の主要な光源にしていること、4) 「光」の位置、強度や方向などが安定し

ていること、等である。

X線領域（数keV～200keVの「光」）の汎用高輝度光源である放射光施設として、アメリカではアルゴンヌ国立研究所に建設するAPS（Advanced Photon Source、7GeV）、ヨーロッパでは各国が協力してグルノーブルに建設するESRF（European Synchrotron Radiation Facility、6GeV）があり、わが国でも科学技術庁（原研と理研）によって、8GeVの大型放射光施設Spring-8（Super Photon ring-8）が兵庫県西播磨科学公園都市に計画されている。

## 2. 大型放射光施設の概要

8GeV大型放射光施設は、電子を8GeVまで加速する入射加速器と電子を8GeVのまま長時間（10～15時間）蓄えるストレージリング（蓄積リング）から構成される（図1参照）。8GeVに蓄積した電子から、アンジュレータ1次光でニオブ、モリブデンなどのK吸収端及び全ての元素のL吸収端までのX線が得られ、アンジュレータ5次光でウランのK吸収端までのX線が得られる（この時、X線の最高エネルギーは120keVである。）。偏向電磁石からは、200keV程度の硬X線が得られ、生物・材料等のCT画像処理、核励起などの新しい研究が可能となる。

入射加速器は、電子線線型加速器（電子リニアック）と電子シンクロトロンを組み合わせたもので構成される。入射加速器は、ストレージリングに電子を全エネルギー（8GeV）で入射する。線型加速器のエネルギーは、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1GeV程度としている。シンクロトロンは、電子を1GeVから8GeVまで加速する施設で、ストレージリングへの入射効率を考えると周長約400mのレースト

ラック型をしている。シンクロトロンには、偏向電磁石約70個配置される。

ストレージリングは、高輝度・短波長のシンクロトロン放射光を得るために、低エミッタンスで運転できるように磁石をChasman-Green型に配置し、長直線部を有しアンジュレータ等の挿入装置を装荷できるようにする。ストレージリングの周長は、約1.5kmになる。

電子ビームを低エミッタンス・高電流・長寿命で安定に蓄積するために、加速粒子として陽電子を用いること、強い4極電磁石と6極電磁石を配置すること、真空度を極力よくすること、各種のビーム不安定性をおさえること、精度の良い製作・設置を行なうこと、等に関連した開発研究・設計研究の努力が必要となる。

ストレージリングから発生するシンクロトロン放射光を利用に供するため、「光」ビームラインは50本程度が計画されている。各ビームラインには、モノクロメータやミラーの光学素子が設置される。大型放射光施設で使用する光学素子は、高輝度の「光」にさらされるため、未だ経験したことのない高熱負荷がかかることが予想される。このような環境において光学素子としての性能を長時間安定に維持するために、素子の熱除去システムを開発研究することは、重要なテーマである。

### 3. 「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・工業等における応用分野まで広範囲の研究が可能である(図2参照)。以下、各分野の研究テーマを拾ってみよう。

#### ・原子力分野

高輝度シンクロトロン放射光の利用は、原子分子物理、原子力材料、化学、放射線生物等の幅広い分野で、先端的研究を可能とする。物性物理の分野では、

シンクロトロン放射光の利用を中性子の利用と相補的に発展させることができる。

(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及び状態解析の研究

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

・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)。

高温超電導物質の構造解析。

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、照射欠陥、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

・ 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

・ 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. 世界の放射光施設の現状

シンクロトロン放射光を物性物理等の研究に利用し始めてから、既に20年余りになっている。日本では、東大物性研究所のINS-SOR(0.4 GeV、1975年完成)、電子総合研究所のTERAS(0.7 GeV、1981年完成)、高エネルギー物理学研究所のPF(2.5 GeV、1982年完成)、及び分子科学研究所のUV-SOR(0.6 GeV、1984年完成)の放射光専用の施設が続いて完成し、シンクロトロン放射光の利用研究が活発になってきた。フォトンファクトリー(PF)からの「光」は、その波長領域がX線まで及んでいる。また、医学・医療用の小型SORシステムや半導体製造用の小型SORシステムの開発が企業中心に進められている。

世界中で運転中・計画中の主な放射光施設(1 GeV以上)を表1に示す。このうち電子エネルギーが5 GeV以上の施設は、TRISTAN-AR(6~7 GeV)、米国コーネル大のCHESS(8 GeV)、スタンフォードのPEP(7~15 GeV)と西ドイツのDORIS-II(6 GeV)であるが、いずれも高エネルギー物理学(素粒子、原子核)研究用の施設を共用している。放射光光源専用として6~8 GeVクラスの加速器が欧米及び日本で計画されている。日本の大型放射光施設 Spring-8 は、その1つである。

## 5. おわりに

シンクロトロン放射光を利用したいと考えている研究者は、大学、国立研究所、民間企業にわたり、年々増加している。大型放射光施設は、この研究者の要望にそって計画されているもので、今後21世紀の研究の飛躍的發展が期待される。

大型放射光施設は、シンクロトロン放射光の利用ばかりでなく、入射加速器(ライナック、シンクロトロン)を利用した研究も考えられる。例えば、1~8 GeVの電子または陽電子ビームを用いた原子核実験が考えられる。核データの研究者からの研究提案を期待するものである。

表1 世界の主なシンクロtron放射光施設 (1 GeV以上)

国名	機関名	所在地	施設	エネルギー (GeV)	完成年
日本	JAERI/RIKEN	西播磨	SPring-8	8.0	1995
日本	KEK	筑波	PF	2.5	1982
日本	KEK	筑波	TRISTAN-AR	5.8~6.5	1983
韓国	POSTECH	Pohang	PLS	2.5	1993
中国	IHEP	Beijing	BSRL	1.6~2.8	1988
台湾	SRRC	Hsinchn		1.3	1992
米国	SSRL	Stanford	SPEAR	3.7	1974
米国	SLAC/LBL	Stanford	PEP	7~15	1980
米国	BNL	Upton	NSLS	2.5	1986
米国	SRC	Stoughton	Aladdin	1.0	1982
米国	Cornell univ.	Ithaca	CHESS	5.5 in operation	
米国	LBL	Berkeley	ALS	1.5	1992
米国	ANL	Argonne	APS	7.0	1995
英国	Daresbury	Daresbury	SRS	2.0	1980
西独	DESY	Hamburg	DORIS-II	5.6	1973
西独	BEGS	Berlin	BESSY-II	1.5 in plan	
西独	Dortmund univ.	Dortmund	DELTA	1.5 in plan	
仏国	LURE	Orsay	DCI	1.8	1976
伊国	Sincrotrone Trieste	Trieste	ELETTRA	2.0	1992
伊国	INFS	Frascati	ADONE	1.5	1969
ソ連	INP	Novosibirsk	VEPP-III	2.0	1970
ソ連	INP	Novosibirsk	VEPP-IVm	5.5	1990
ソ連	Kurchatov Institute	Moscow	Siberia-2	2.5	1991
ヨーロッパ連合		Gronoble	ESRF	6.0	1993

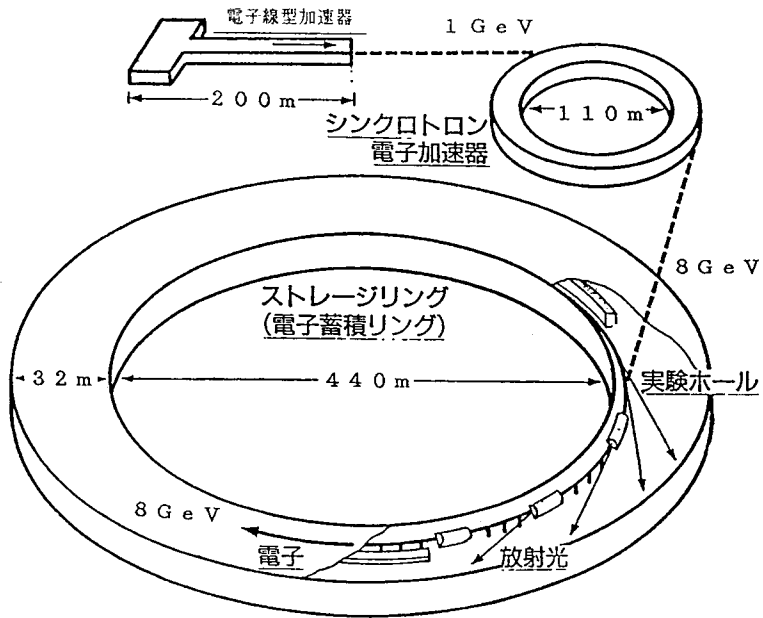


図1 大型放射光施設概念図

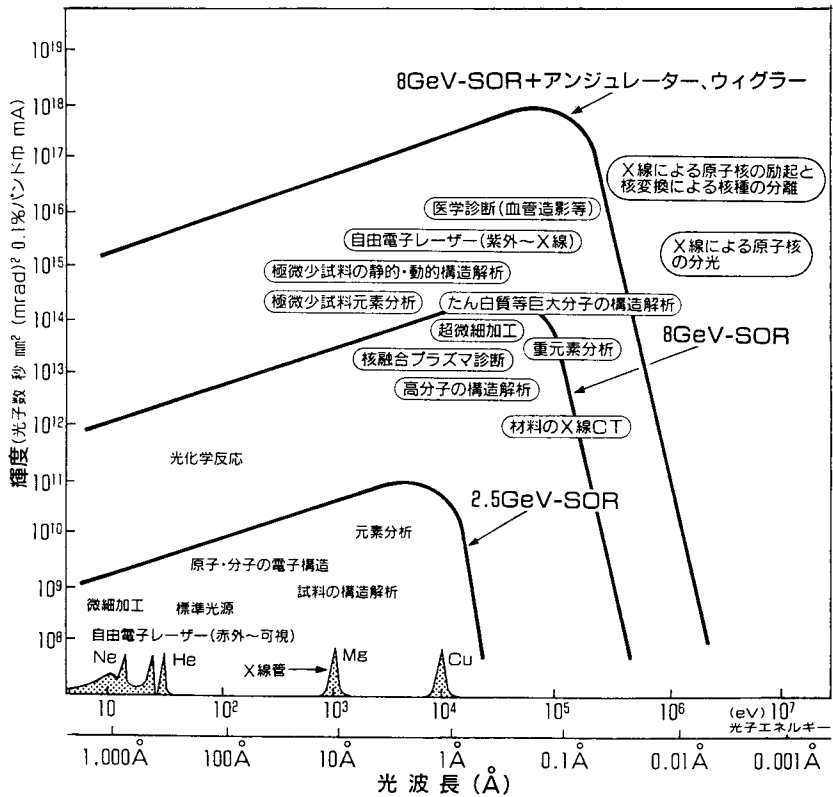


図2 シンクロトロン放射光施設を利用した研究