

<概要>

日本原子力研究所（現日本原子力研究開発機構）と理化学研究所は、1991年から建設開始した大型放射光施設SPring-8（Super Photon ring 8GeVから命名）（兵庫県西部の播磨科学公園都市）を1997年10月に完成し供用を開始した。SPring-8はX線領域に重点を置いた高輝度放射光源であり、日本の研究開発基盤施設として大学、国公立研究機関および民間の研究者の利用に供し、材料科学・情報電子・ライフサイエンス・医療など広範な分野の先端的・基盤的研究開発を推進する上で中核となる施設である。

放射光は物質を透過しやすく、また波長が短いので直接電子と相互作用するという特性により、物質の構造を調べるのに適した光である。

<更新年月>

2005年04月

<本文>

1. 放射光の発生原理（図1参照）

光速に近い速さの電子が磁場中で進行方向を急激に曲げられた時、その接線方向に発生する電磁波を放射光（あるいはシンクロトロン放射、synchrotron radiation、SR）と呼び、1940年代にソ連のヴェクスラー（V.I.Veksler）および米国のマクミラン（E.M.McMillan）が独立に提案して以来、（1）強度が高い（2）波長領域が広い（3）指向性がよい（4）偏光している等の特徴から、その利用技術は急速に発展してきた。

2. 放射光施設の変遷

放射光施設は、高エネルギー物理学実験用加速器からのビームを利用した第一世代の装置、次いで放射光専用の蓄積リングを用いた第二世代の装置へと発展してきた。これらの装置の光源は主として電子の方向を曲げる偏向電磁石である。これに対しSPring-8は第三世代の装置と呼ばれる。これは電子軌道を蛇行させることによって発生する放射光を干渉させる挿入光源（アンジュレータ、ウィグラー：図2参照）を主たる光源とし、従来の光源と比較して極めて高輝度の放射光が得られる装置である。

3. 高輝度放射光と大型放射光施設

輝度の高い放射光を望むのであれば、蓄積電子のビームサイズ（正確にはエミッタンス）を小さくした蓄積リングが必要になる。蓄積リングで設計可能なエミッタンスの最小値は、電子エネルギーの2乗と偏向電磁石総数の3乗に比例するので、同じ電子のエネルギーで低エミッタンスの放射光を得るには偏向磁石の数を増やす必要がある。これは必然的に周長が長い巨大な蓄積リングを持つ大型放射光施設であることを意味し、また同時にそのような蓄積リングでは偏向磁石と偏向磁石の間の直線部を多数設けることができるので、そこに挿入光源を導入してより輝度を高めることも可能となる。

このような、蓄積リングの周長が1,000mを超える巨大な装置は第三世代（*）の放射光施設と呼ばれ、現在ヨーロッパ17カ国で共同運営しているESRF、アルゴンヌ国立研究所にあるAPS、SPring-8の3つの大型施設が稼動中である（図3参照）。

4. 大型放射光施設の放射光の特性（図4参照）

SPring-8のような大型放射光施設で得られる光の特徴として次の3点がある。

（1）極めてつよいX線であり、一般に利用されているX線管方式のものと比較して百万倍以上も強い強度を持つ（高輝度）

(2) 赤外線～硬X線領域までの連続スペクトルであり、実験に必要な波長を任意に選択できる(連続スペクトル)

(3) 指向性、偏向性を持つ極めて短いパルス光である(指向性、偏向光、パルス性)

また、大型放射光施設では放射光を干渉させる挿入光源(アンジュレータ、ウィグラー)が主たる光源となるが、挿入光源から発生する放射光は50m先で5mm程度しか広がらない、非常に指向性に優れた光である。

(4) 先端実験施設(医学利用実験施設、RI実験棟、長尺(1km)ビームライン実験施設)まで導入された放射光の利用が可能である。

(5) 高エネルギーガンマ線専用のレーザー電子光ビームライン(LEP)を備えている。

5. SPring-8の特徴

SPring-8は第三世代の放射光施設として世界最高の性能となるよう、以下の方針で設計された。

(1) 高輝度を得るために蓄積リングは電子ビームを5nm・rad程度の低エミッタンスとする。

(2) 主たる光源となるアンジュレータの1次光で10～20keVのエネルギーの光を、10E19光子数/秒/mm²/mrad²/0.1%バンド幅以上の輝度で実現する。

(3) 多極ウィグラーで200keV程度のX線を10E17光子数/秒/mm²/mrad²/0.1%バンド幅程度の輝度で実現する。

(4) 挿入光源用の直線部を40本程度確保する。また特別に長い直線部を4本準備する。

(5) 加速粒子としては電子、陽電子の両方を可能とする。

6. SPring-8の概要

SPring-8の加速器は電子を8GeVまで加速する入射系と、電子を長時間蓄積する蓄積リング、および放射光を取り出し利用するビームラインから成る。SPring-8の主要施設を図5に示す。線型加速器、シンクロトロンおよび蓄積リングの主要諸元をそれぞれ表1、表2、表3に示す。

(1) 入射系

入射系は1GeVの線型加速器と8GeVのシンクロトロンから構成される。

線型加速器は250MeVの部分に陽電子コンバータを設置し、陽電子利用に対応できるように配慮されている。またその際には小型の陽電子蓄積リングも設置できるようなスペースを建物内に確保している。

シンクロトロンは線型加速器から入射された1GeVの電子を8GeVまで加速して蓄積リングに送る。偏向電磁石、四極電磁石、六極電磁石を規則正しくリング状に並べたFODO型と呼ばれる磁石配置で製作されている。

(2) 蓄積リング

蓄積リングは、Chasman-Green型と呼ばれる磁石配置で、挿入光源を設置するための直線部を多数確保している。また1周(1,436m)のうち4箇所は将来の利用に備え偏向電磁石を除いた磁石配置になっていて、特別に長い直線部になっている。

低エミッタンス実現のためには、機器の配置、特に各種の誤差に対して非常に敏感な磁石の配置が重要であり、磁石の製作精度は数ミクロン以内に抑えられている。また建物の変形にも対策が必要であり、強固な岩盤上に建物を建設し、断熱対策も十分に施されている。さらに磁石の精密な設置には特に注意を払い、1台数百キログラムから数トンにもなる電磁石約1,000台が50ミクロン以内の誤差精度で据え付けられている。

蓄積リングは8GeVの電子ビームを安定に100時間以上の長時間にわたって蓄積するため、電子ビームを蓄積した状態で約10E-8Pa(10E-10Torr)以下の真空を実現させる必要がある。そのため電子ビームの通り道となる真空ダクトにはNEGポンプを内蔵するような工夫を払っている。

(3) ビームラインと利用研究分野例(図6)

放射光は、ミラーや分光器を設置したビームラインを通して実験ステーションに導かれる。SPring-8のビームラインは、偏向電磁石から23本、挿入光源(4.5mビームライン34本、25mビームライン4本)から38本設置することが可能である。それらのビームラインは、多数のユーザが交互に使用する共用ビームラインと、一部のユーザが専有して使用する専用ビームラインに分けられる。ビームラインは要素機器の規格化が図られ、また建設はユーザからの申請に基づきビームライン検討委員会で審査される。

ビームラインの長さは蓄積リング棟実験ホール内で光源から80mの長さで設置される。このうち30m程は蓄積リングを収納している放射線防護用コンクリート壁で囲われたマシン収納部内にあり、残りの部分が実験ホールに設置される。しかし実験の種類によってはより長いものが必要になる場合があり、300mあるいは1,000mの長さにもまで延長できる中尺、長尺ビームラインをそれぞれ9本と3本設置することが可能である。また、敷地内には兵庫県立大学高度産業科学技術研究所が、SPring-8の線型加速器から電子ビームの供給を受けて電子ビームを1.0～1.5GeVで蓄積

する。主リングは周長119mで、14mの直線部を2箇所もつユニークなレーストラック型小型放射光施設（ニュースバル）である。ビームラインは8本稼動し、真空紫外線から軟X線領域の高輝度放射光で、光微細加工、物質評価と創薬などの産業利用技術の研究に使われている。

7. 放射光の利用研究例（表4および表5参照）

X線は物質を透過しやすいとともに、波長が短いため、電子と直接相互作用するという特性により、物質の構造を調べるのに適した光である。放射光はこのX線領域の光の輝度を飛躍的に向上させ、物性物理、化学、材料科学、ライフサイエンスなどの幅広い分野で多くの研究成果が得られ、生命科学への利用、物質科学への利用、地球科学への利用、環境科学への利用、医学への利用、産業への利用、核物理への利用と基礎研究から応用研究、産業利用に役立っている。

8. SPring-8の所在地

SPring-8は、兵庫県が整備を進めている西播磨テクノポリス計画の中核を成す、播磨科学公園都市（計画都市面積約2,000ヘクタール、計画人口約25,000人）内に1997年10月に建設され供用を開始した。敷地は赤穂郡上郡町、揖保郡新宮町、佐用郡三日月町の三町にまたがる約140ヘクタールの広さがある。敷地の概観を図7に示す。

SPring-8までの交通アクセスは以下のとおり、

(1) 山陽新幹線相生駅から北へ約17キロメートル、播磨科学公園都市行きの路線バスで所要時間約30分

(2) 中国自動車道佐用インターチェンジから南へ15キロメートル、所要時間約20分近隣には兵庫県立姫路工業大学理学部、住友電工播磨研究所（小型放射光装置を設置）がある。

〔用語解説〕

(*) 第一世代は、放射光の専用施設ではなく、素粒子物理学研究として建設された加速器により、放射光利用を行った時代のもの。第二世代は、放射光専用施設だが偏向磁石からの放射光利用が主なもの。第三世代は、専用の加速器にアンジュレータ主体の挿入光源を多数設置できるように設計された施設のもの。

<関連タイトル>

[シンクロトロン放射光 \(08-01-03-08\)](#)

[SPring-8計画 \(08-04-01-06\)](#)

<参考文献>

- (1) 日本物理学会（編）：シンクロトロン放射、培風館、（1986）
 - (2) 原雅弘、宮原義一：大型放射光施設SPring-8について、Engineering、No.60、18-21（1993.8）
 - (3) 大野英雄：大型放射光施設SPring-8の現状と利用研究、The Journal of Science Policy and Research Management、Vol.9、No.1-2、29-33（1994）
 - (4) 大西正視、寺井隆幸ほか：特集 高輝度放射光の発生と利用、日本原子力学会誌、Vol.36、No.7、587-610、（1994）
 - (5) 日本原子力研究所・理化学研究所：大型放射光施設SPring-8（パンフレット）（1995年6月）
 - (6) 上坪宏道：SPring-8計画の現状とその利用計画、原子力工業、40（11）、15-20（1994）
-

表1 線型加速器の主要諸元

加速粒子 加速エネルギー	電子、陽電子 1.15GeV(電子) 0.9GeV(陽電子)
加速器全長 建屋全長	140m 180m
電子入射部(電子銃)	
タイプ 加速電圧 ピーク電流 パルス幅	熱陰極型 200kV 100m A~20A 1nsec~1 μ sec
電子/陽電子変換部	
入射ビームエネルギー ターゲット材質 変換効率	250MeV タングステン90%銅10% 0.30%
ビーム加速度(加速管)	
タイプ 長さ 本数 1本当たりの加速エネルギー	2 π /3モード進行波型 3m 26 48MeV
マイクロ波源(クライストロン)	
周波数 ピーク電力 パルス幅 繰り返し 台数	2.856GHz 80MW 4 μ sec 60pps 13

【出典】 瀬崎 勝二：特集「供用を開始したSPring-8開発の歩みと利用計画を探る」、原子力工業、43(12),9(1997)

表2 シンクロトロン の主要諸元

加速粒子	電子・陽電子
入射エネルギー	1GeV
出射エネルギー	8GeV
周長	396.12m
エミッタンス(8GeV)	230nm・rad
電磁石	
偏向電磁石	
台数	64台
磁場強度(8GeV)	0.903T
重量	約4.3トン
4極電磁石	
台数	80台 (集束用40台, 発散用40台)
磁場強度(8GeV)	15T/m
重量	約1.2トン
6極電磁石	
台数	60台 (集束用30台, 発散用30台)
磁場強度(8GeV)	225T/m ²
重量	約100kg
パルス電磁石	
台数	15台 (入射用4台, 出射用11台)
高周波加速装置	
クライストロン	
周波数	508.58MHz
最大電力(連続)	1.2MW
台数	2台
加速空洞	
タイプ	スロット結合型5セル
台数	8台
長さ	1.66m/1台
入力電力(1台あたり)	250kW

[出典] 瀬崎 勝二: 特集「供用を開始したSPring-8開発の歩みと利用計画を探る」、原子力工業、43(12),10(1997)

表3 蓄積リングの主要諸元

加速粒子 電子エネルギー 周 長 エミッタンス	電子(陽電子も可能) 8GeV 1436m 5.6nm・rad
電磁石	
偏向電磁石 台 数 磁場強度 重 量	88台 0.68T 約5.0トン
4極電磁石 台数 磁場強度 重 量	480台 17.6T/m(最大) 0.85~2.84トン
6極電磁石 台数 磁場強度 重 量	336台 420T/m ² (最大) 0.68~1.14トン
ステアリング電磁石 台数 磁場強度 重 量	569台 0.15T(最大) 74~101kg
入射用電磁石 台 数	8台
高周波加速装置	
クライストロン 周波数 最大電力(連続)	508.58MHz 3.0MW/周
加速空洞 タイプ 台 数 会計長さ 入力電力	単セル空洞 24台 10.08m 2.4MW/周

[出典]瀬崎 勝二：特集「供用を開始したSPring-8 開発の歩みと利用計画を探る」、原子力工業、43(12),12 (1997)

表4 共用ビームライン(25本)の利用研究分野例

ビームライン名称	ビームライン No.	光源	X線エネルギー	研究手法・研究分野
XAFS	BL01B1	偏向電磁石	3.8~113 keV	広エネルギー領域でのXAFS(非晶質固体・希薄系での局所原子配置・電子構造)
単結晶構造解析	BL02B1	偏向電磁石	5~70 keV	無機結晶のX線回折(新素材・薄膜の精密構造解析、構造相転移、化学反応)
粉末結晶構造解析	BL02B2	偏向電磁石	12~35 keV	粉末結晶のX線回折(先端材料の精密電子密度分布、構造相転移)
高温高压	BL04B1	偏向電磁石	20~150 keV	高温・高压下でのエネルギー分散X線回折(構造相転移、地球深部構造、超臨界流体の局所構造)
高エネルギーX線回折	BL04B2	偏向電磁石	37.8 keV 61.7 keV	X線回折(高压下の結晶構造、非晶質固体・液体の局所構造、相転移点近傍での構造ゆらぎ)
高エネルギー非弾性散乱	BL08W	ウイグラー	100~120 keV 174~300 keV	コンプトン散乱(フェルミ面近傍の電子構造)、磁気コンプトン散乱(磁性電子構造)、重元素の蛍光X線分析
核共鳴散乱	BL09XU	アンジュレータ	9~80 keV	時間領域メスバウア分光、核共鳴非弾性散乱、表面・界面構造解析
高压構造物性	BL10XU	アンジュレータ	18~35 keV	極端条件下(高压・高温・極低温)のX線回折
表面界面構造解析	BL13XU	アンジュレータ	7~18.9 keV	表面構造の解析(吸着構造、超格子構造、相転移、結晶成長、触媒反応)
産業利用	BL19B2	偏向電磁石	5~100 keV	XAFS、X線反射法、蛍光X線分析、歪み解析、粉末回折
医学・イメージングI	BL20B2	偏向電磁石	6~113.3 keV	イメージング技術(マイクロモグラフィ、屈折コントラスト法など)の開発とその医学利用
医学・イメージングII	BL20XU	アンジュレータ	8 keV~	イメージング技術(マイクロモグラフィ、屈折コントラスト法など)の開発とその医学利用
軟X線固体分光	BL25SU	アンジュレータ	0.22~2 keV	光電子分光、光電子回折、光電子ホログラフィ、磁気円二色性(電子状態、固体磁気特性)
軟X線光化学	BL27SU	アンジュレータ	0.17~2.8 keV	軟X線光化学(内殻励起光化学反応、原子・分子の光電離)、軟X線CVD(新素材の創製)
白色X線回折	BL28B2	偏向電磁石	5 keV~	白色X線トポグラフィ(結晶成長過程、格子欠陥、相転移)
高分解能非弾性散乱	BL35XU	アンジュレータ	8~50 keV	X線非弾性散乱、核共鳴散乱
分光分析	BL37XU	アンジュレータ	5~37 keV 75.5 keV	微小領域元素分析、極微量分析、状態分析、蛍光X線ホログラフィー、高エネルギー蛍光X線分析、高感度XAFS
磁性材料	BL39XU	アンジュレータ	5~37 keV	X線磁気散乱、磁気円二色性、X線顕微分光、超微量元素分析
高フラックス	BL40XU	アンジュレータ	8~17.5 keV	生物学・物質科学での時分割小角散乱・回折、時間相関分光(スペックルパターン)、蛍光X線分析
構造生物学I	BL41XU	アンジュレータ	6~38 keV	巨大分子結晶のX線構造解析(タンパク質結晶学、X線構造生物学)
構造生物学II	BL40B2	偏向電磁石	6~17.5 keV	巨大分子結晶のX線構造解析、非結晶生体材料のX線小角散乱
赤外物性	BL43IR	偏向電磁石	10 meV~2eV	赤外顕微分光、赤外表面科学、赤外吸収・反射分光、赤外磁気光学
R&D(1)	BL47XU	アンジュレータ	5.3~37.8 keV	光学系の開発、各種イメージング技術・ビームエミッタンス測定技術の開発
R&D(2)	BL46XU	アンジュレータ	12~25 keV	挿入光源の開発、共鳴・非共鳴磁気散乱技術
R&D(3)	BL38B1	偏向電磁石	3.8~198 keV	光学系の検出器・制御系の開発、タンパク質結晶解析技術の開発

[出所] (財)高輝度光科学研究センター: Spring-8、多様なビームラインで広範な研究活動、http://www.spring8.or.jp/j/general_info/overview/

表5 専用ビームライン、原研／理研ビームライン、他(21本)の利用研究分野例

ビームライン名称	ビームライン No.	光源	X線エネルギー	研究手法・研究分野
NSRRC ID	BL12XU	アンジュレータ	4.6~75 keV	高分解能X線散乱、高分解能X線共鳴ラマン散乱、高Q分解能散乱、X線物理学・光学
NSRRC BM	BL12B2	偏向電磁石	5~90 keV	X線吸収分光、タンパク質結晶構造解析、高分解能X線散乱、マイクロビームX線解析
広エネルギー帯域先端材料解析	BL15XU	アンジュレータ	0.5~60 keV	粉末X線回折、X線照射改質、X線光電子顕微鏡、角度分解光電子分光
産業界ID	BL16XU	アンジュレータ	4.5~40 keV	産業材料評価用のX線回折、蛍光X線分析とX線マイクロビーム分析
産業界BM	BL16B2	偏向電磁石	4.5~113 keV	産業材料評価用のXAFSとX線トポグラフィ
兵庫県 ID	BL24XU	アンジュレータ	3.5~60 keV	無機物質の表面・界面解析、X線マイクロビーム分析、X線イメージング、タンパク質結晶構造解析
創薬産業	BL32B2	偏向電磁石	7~17 keV	ドラッグデザインを目的としたタンパク質結晶構造解析
レーザー電子光	BL33LEP	逆コンプトン散乱	1.5~2.4 GeV	光核反応、偏極ガンマ線ハドロン分光、ファイメノン検出
生体超分子複合体構造解析	BL44XU	アンジュレータ	9~16 keV	生体巨大分子複合体のX線結晶構造解析
原研 材料科学I	BL14B1	偏向電磁石	5~150 keV	物質科学における構造解析(高圧・高温実験、表面・界面構造研究)
原研 材料科学II	BL11XU	アンジュレータ	6~70 keV	メスバウア分光、高圧実験、非弾性X線分光、表面解析
原研 量子構造物性	BL22XU	アンジュレータ	3~70 keV	高圧発生装置を用いた高圧物性研究、共鳴X線回折実験
原研 重元素科学	BL23SU	アンジュレータ	0.5~1.5 keV	放射性材料の軟X線分光、表面光化学、生物学的放射線効果
理研 物理学II	BL19LXU	25mアンジュレータ	7.2~18 keV 22~51 keV	X線非線形光学、コヒーレントX線光学、磁気散乱
理研 構造ゲノムI	BL26B1	偏向電磁石	6~17 keV	ハイスループット・タンパク質結晶構造解析
理研 構造ゲノムII	BL26B2	偏向電磁石	6~17 keV	ハイスループット・タンパク質結晶構造解析
理研 物理学I	BL29XU	アンジュレータ	4.4~37.8 keV	コヒーレントX線光学
理研 構造生物学I	BL45XU	アンジュレータ	7.5~14 keV	トリクロマチックMAD法による巨大分子結晶構造解析、生体材料の溶液散乱と繊維回折
理研 構造生物学II	BL44B2	偏向電磁石	6~30 keV	白色・単色X線での巨大分子結晶構造解析、時分割ラウエ法、希釈生体材料のXAFS
加速器診断	BL05SS	アンジュレータ	-	加速器診断と診断法の技術開発
加速器診断	BL38B2	偏向電磁石	4~14.2 keV	加速器診断と診断法の技術開発

他に2本のビームラインが建設中

[出所] (財)高輝度光科学研究センター: Spring-8、多様なビームラインで広範な研究活動、http://www.spring8.or.jp/j/general_info/overview/

放射光は、高速に近い速さで運動する電子の方向を、
磁場の力で急激に曲げたとき、その接線方向に発生する。

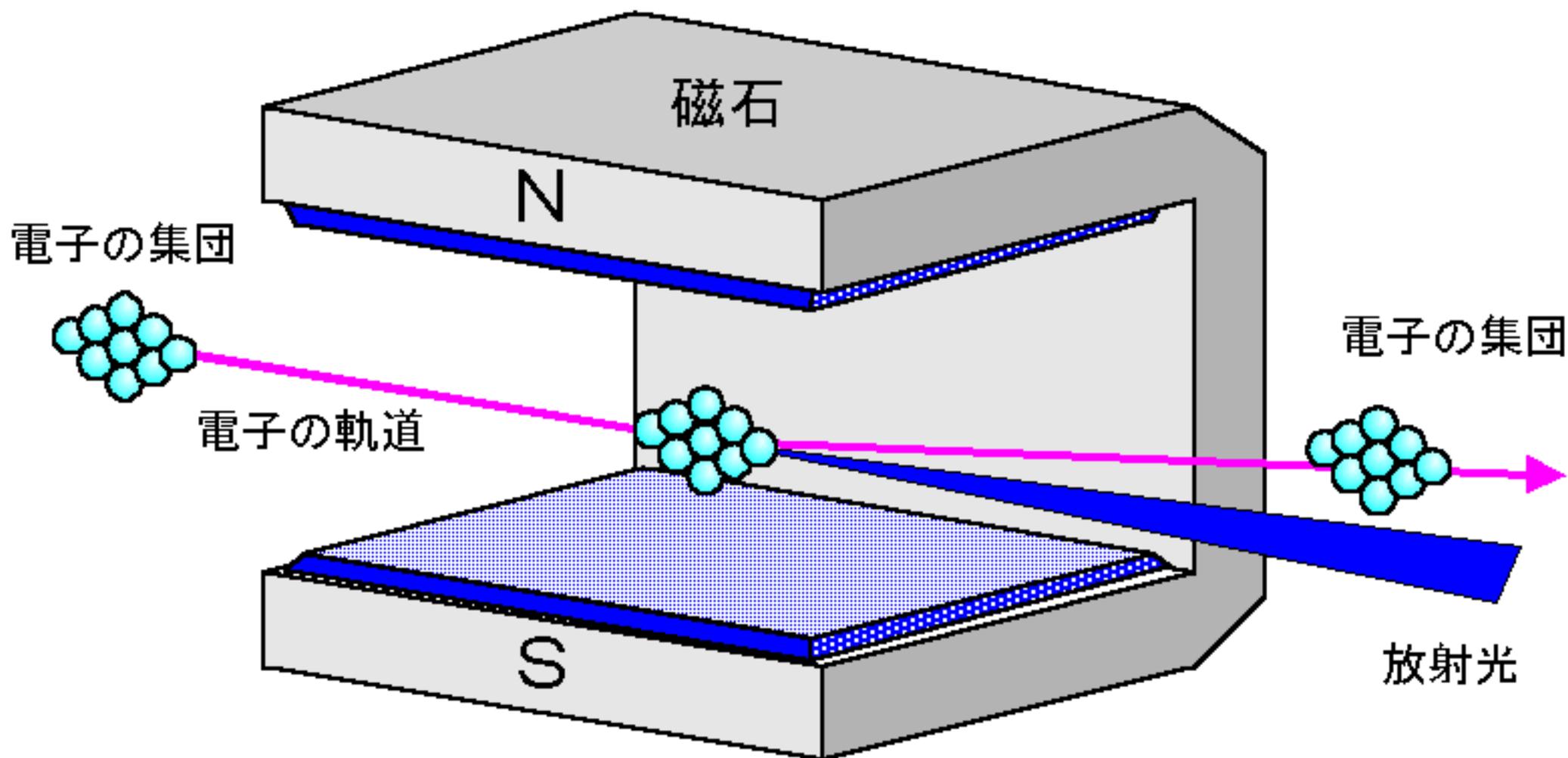
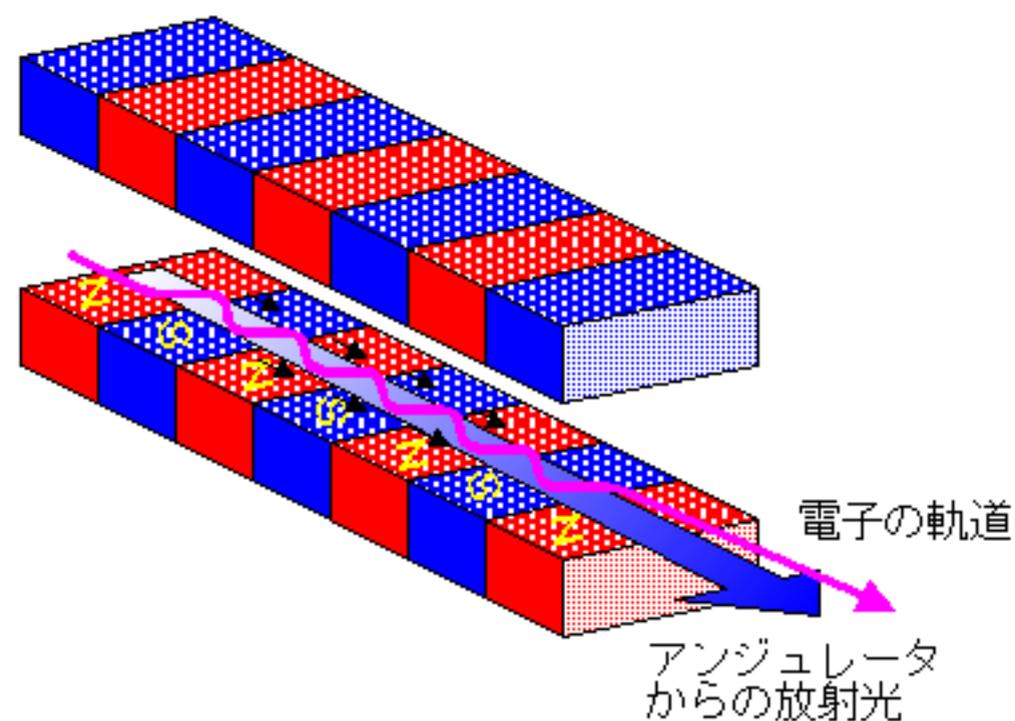


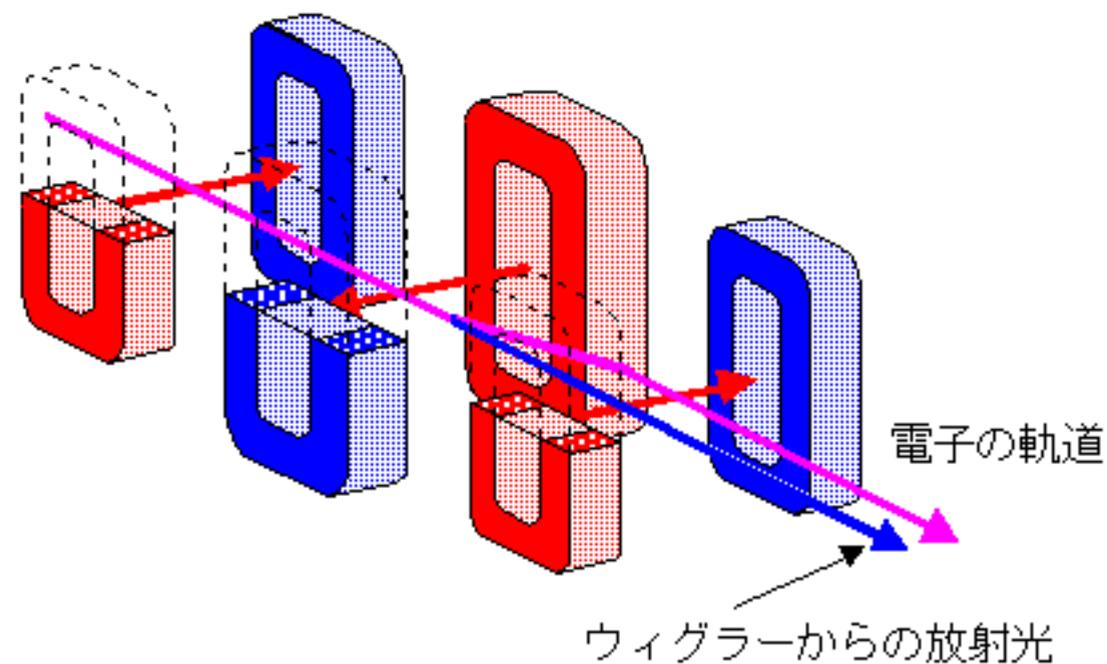
図1 放射光発生 の原理

■アンジュレータ



輝度の高い、特定波長の放射光を発生させる装置

■ウィグラー



波長が短く、輝度の高い放射光を発生させる装置

図2 挿入光源の原理(アンジュレータ、ウィグラー)

[出典] (財)高輝度光科学研究センター: SPring-8(パンフレット)、(1997年10月)

施設名称	SPring-8	APS Advanced Photon Source	ESRF European Synchrotron Radiation Facility
設置者 設置場所	原研・理研 播磨科学公園都市	米国エネルギー省 アルゴンヌ(米)	ヨーロッパ18カ国 グルノーブル(仏)
エネルギー ビームライン 周長	8 (GeV) 62本 1,436m	7 (GeV) 68本 1,104m	6 (GeV) 56本 844m
年次 計画	準備 1987~1989 建設 1991~1997 利用 1997~	1986~1988 1989~1994 1996~	1986~1987 1988~1994 1994~

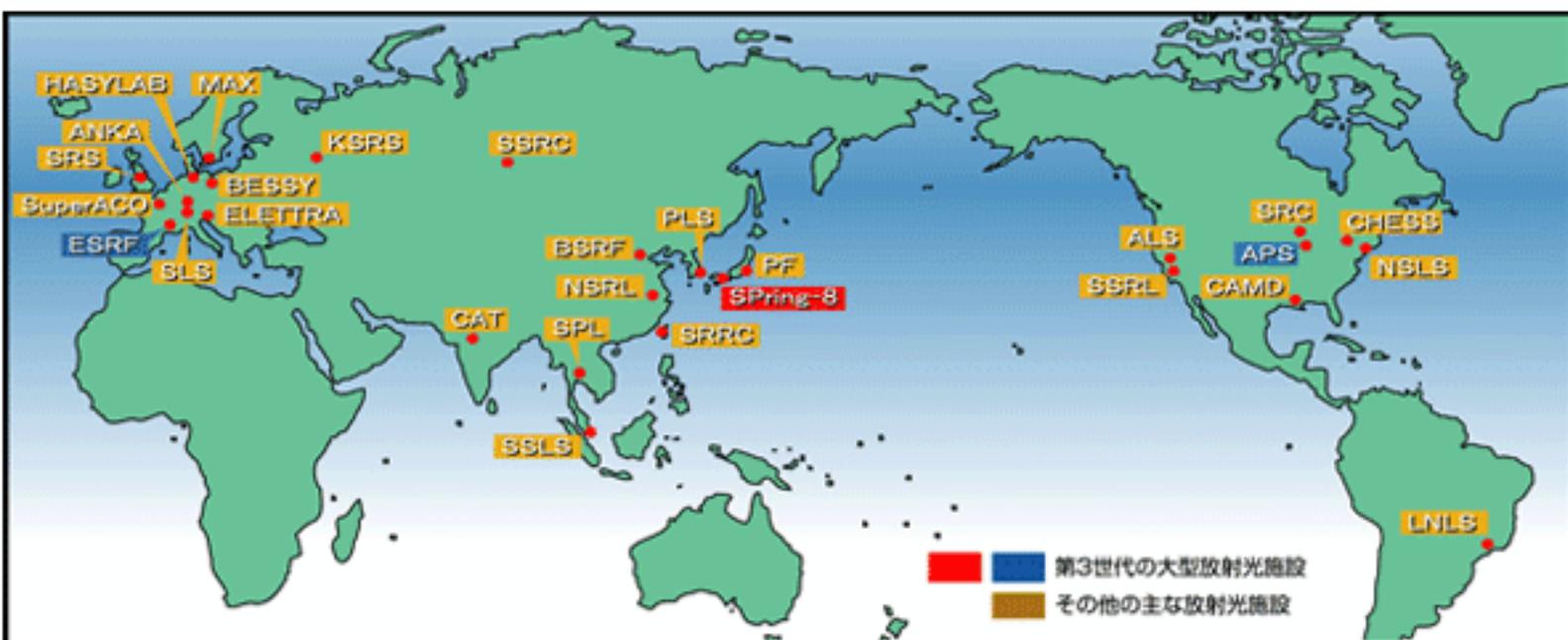


図3 第3世代の大型放射光施設とその他の主な放射光施設

[出所] (財)高輝度光科学研究センター; SPring-8について、概要、放射光の発生と性質、
http://www.spring8.or.jp/j/general_info/overview/

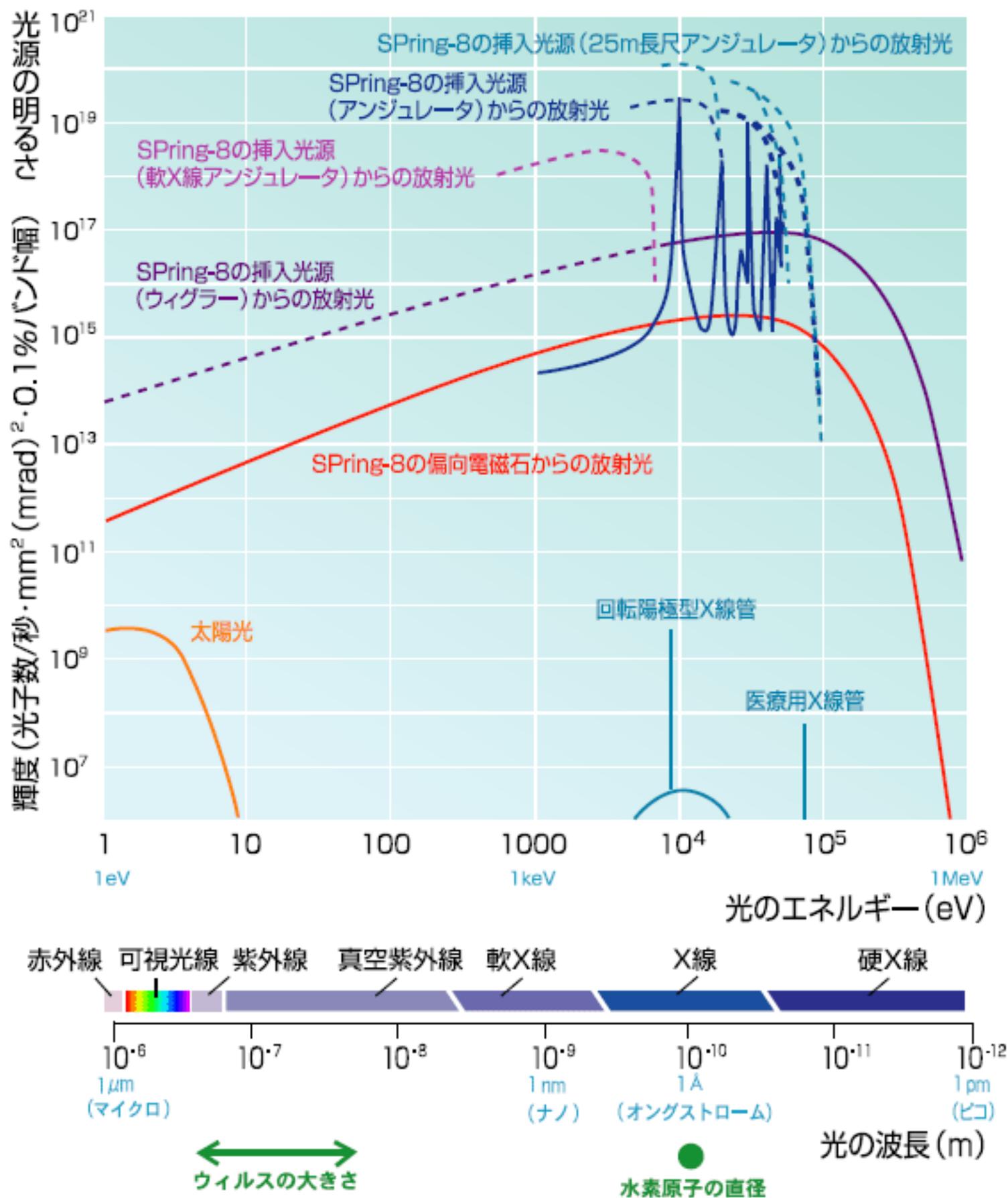


図4 SPring-8放射光スペクトル

[出所] (財)高輝度光科学研究センター; SPring-8について、概要、放射光の発生と性質、
http://www.spring8.or.jp/j/general_info/overview/

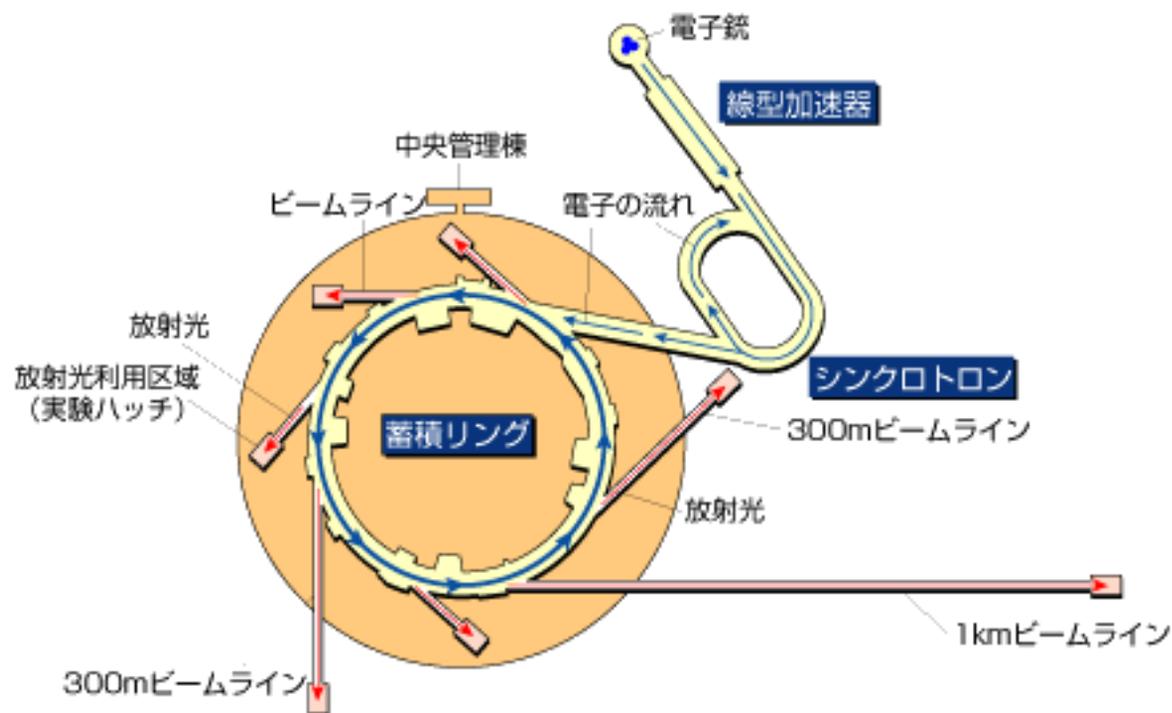


図5 SPring-8の主要施設

[出所] (財)高輝度光科学研究センター; SPring-8について、概要、SPring-8の主要施設、http://www.spring8.or.jp/j/general_info/overview/

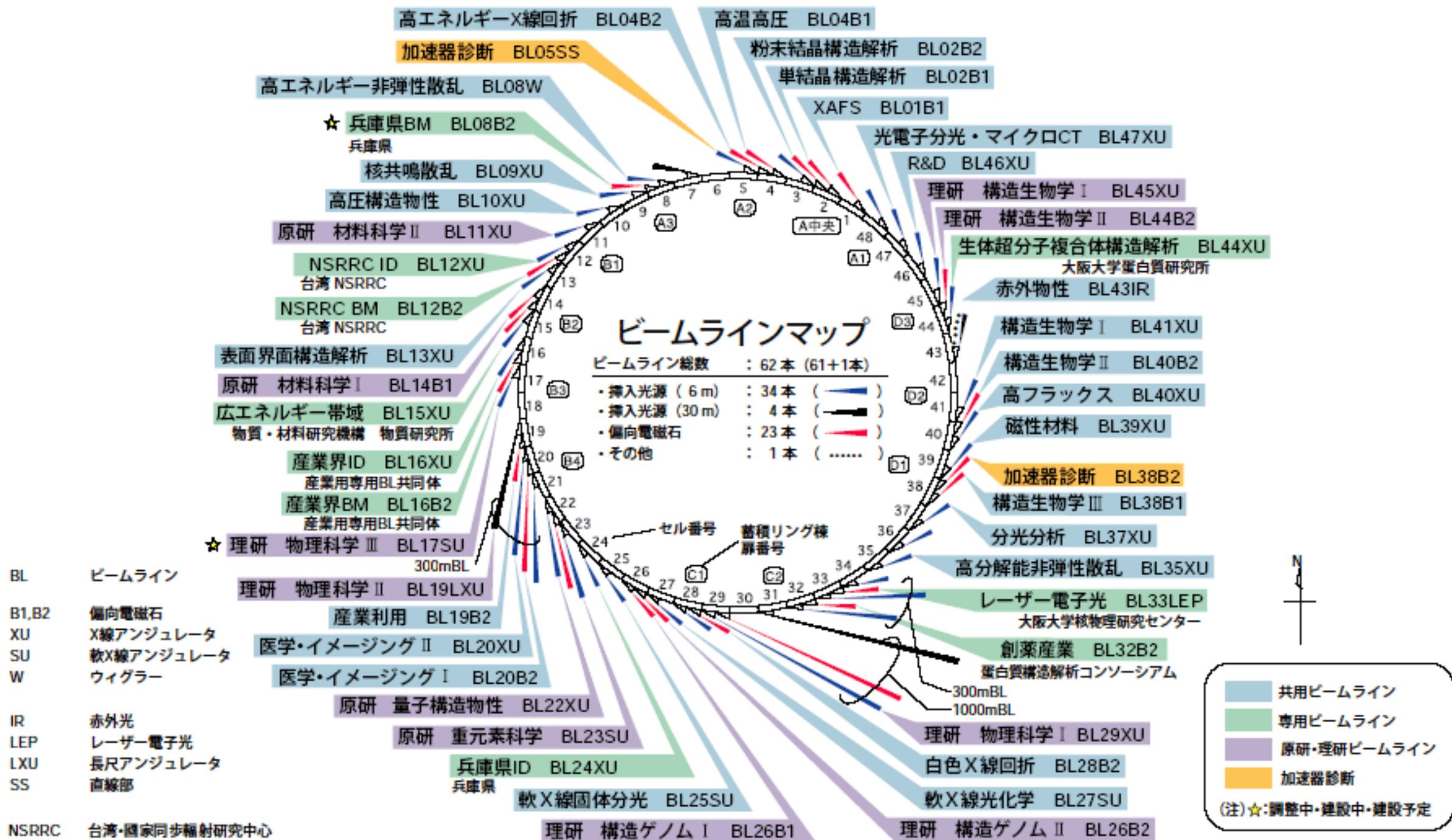


図6 SPring-8のビームライン配置

[出所] (財)高輝度光科学研究センター; SPring-8について、概要、SPring-8のビームライン、
http://www.spring8.or.jp/j/general_info/overview/