

原子力委員会長期計画策定会議第 4 分科会

＜未来を拓く先端的研究開発＞

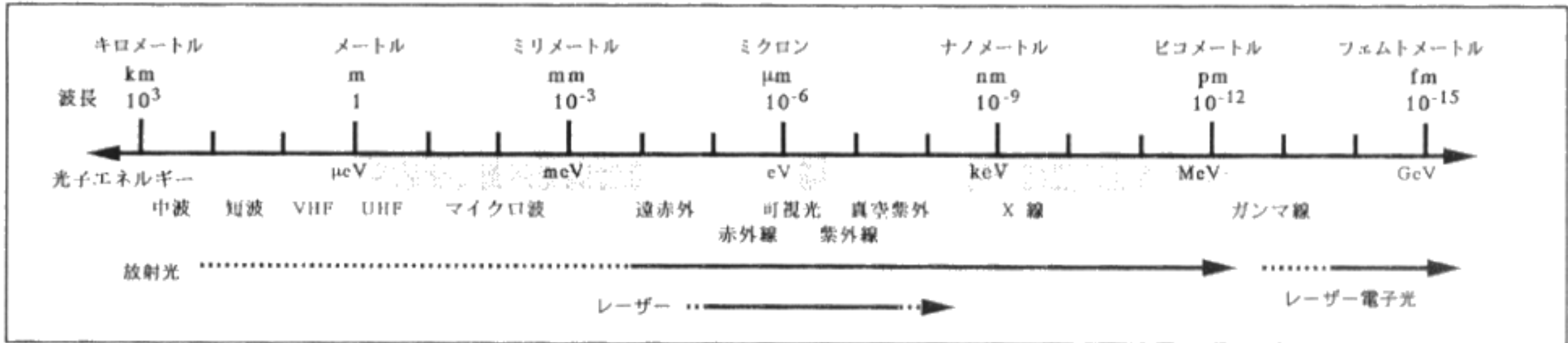
「放射光分野における研究開発の意義・将来展望」

説明用参考資料

上坪宏道

I. 電磁波の名称と波長領域（理科年表）

電磁波の波長が長いときには波長で、短い時にはエネルギーで表すことが多い。換算は $1\text{ nm} = 1.24\text{ keV}$ である



第1図 電磁波の名称と波長領域

II. 放射光の発生

(1) 高エネルギー電子が発生する電磁波

A. 放射光 (シンクロトロン放射)

高速 (〜光速) で走る高エネルギー電子が何らかの力 (主に磁場で) を受けて進路を曲げられるとき、進行方向に放射される電磁波 (真空紫外〜X線)

- ・指向性が良い
- ・広い波長範囲で連続スペクトル

B. 制動放射 (ブレムストラahlung)

高エネルギー電子が力を受けて減速したときに放射される電磁波 (ガンマ線)

- ・四方に放射される
- ・広い波長範囲の連続スペクトルである

C. レーザー電子光 (コンプトン後方散乱)

高エネルギー電子にレーザー光が衝突、後方に散乱されてくる指向性の良い電磁波 (ガンマ線)

- ・散乱角によってエネルギー (波長) が決まっている
- ・エネルギーが高い

高エネルギーとは？

電子エネルギー=E、電子質量= m_e 、光速= c とすると、
$$\gamma = \frac{E}{m_e c^2} \gg 1$$

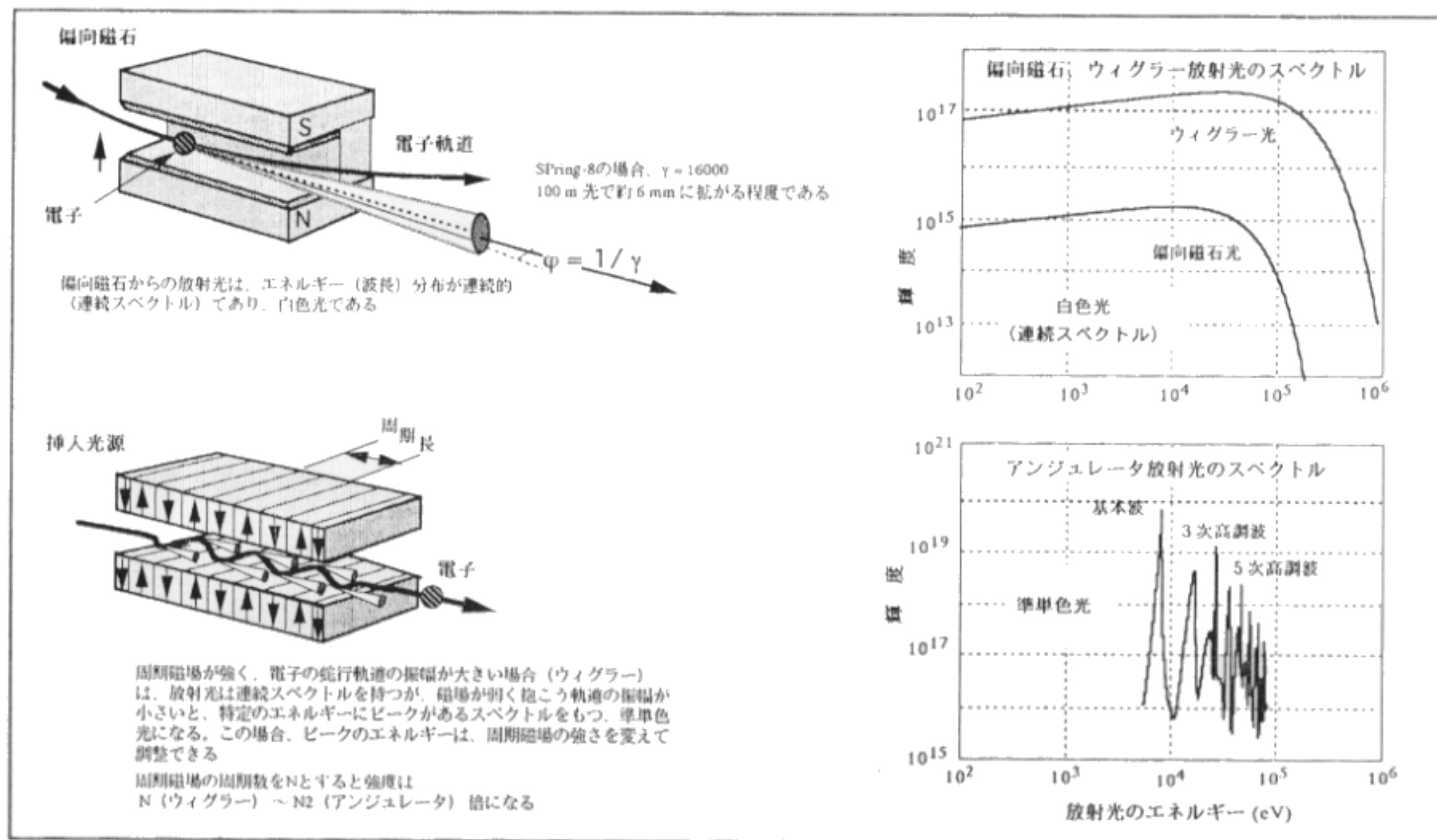
(2) 放射光の発生

高エネルギー電子が磁場で進路を曲げられるとき、進行方向に放射される指向性の良い光（電磁波）を放射光という

特長：高輝度、高フラックス、偏光、パルス光であり、第3世代放射光源では空間的にコヒーレント（可干渉性）である

輝度 光源の明るさを示し、単位は（光子数/秒/mm²/mrad² in 0.1%バンド幅）である

電子ビームの太さ ———— 電子ビームの広がり角



第2図 放射光の発生

(3) 放射光発生装置

A. 性能による分類

放射光の明るさ（輝度）、パルス特性、コヒーレンスなど放射光の特性

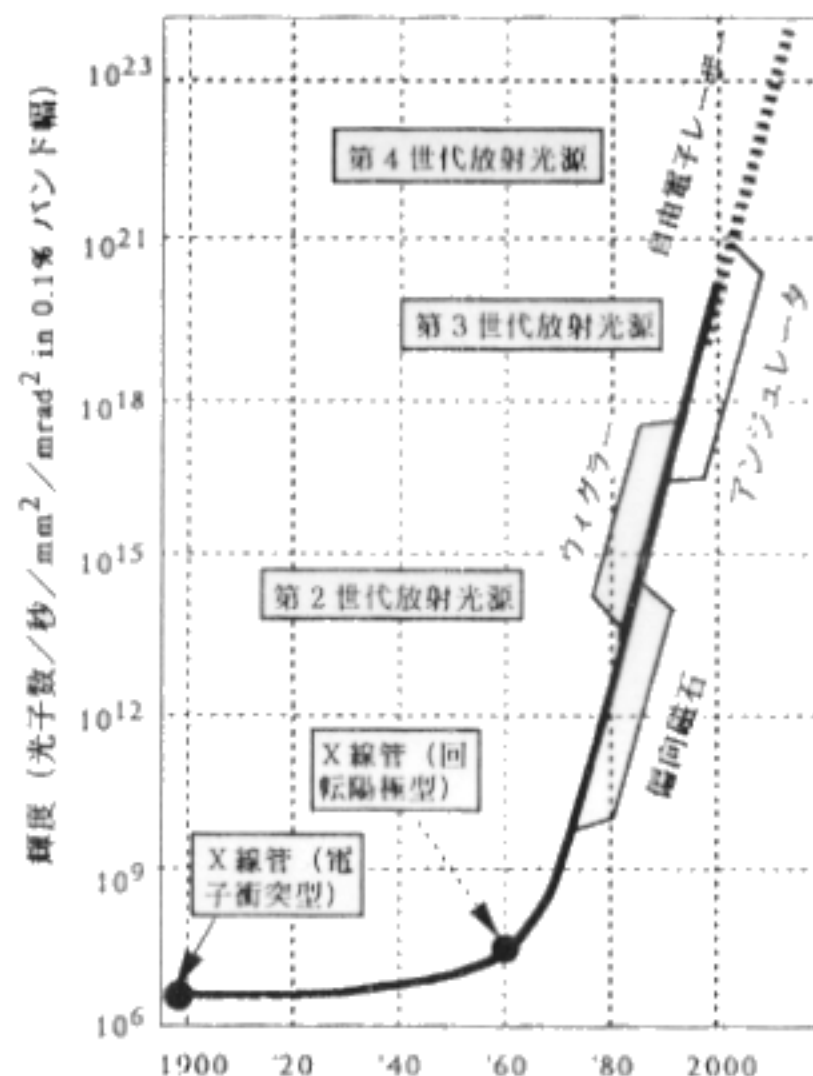
- ① コンパクト放射光源：産業利用
- ② 第1世代光源：高エネルギー実験のバラサイト利用
- ③ 第2世代光源：専用の蓄積リング、偏向磁石が主な光源
- ④ 第3世代光源：低エミッタンス蓄積リング、挿入光源が主な光源
- ⑤ 第4世代光源：高輝度自由電子レーザー、自己増幅・自発放射（SASE）

B. 波長領域による分類

- ① X線光源：数100eV～数100keV
- ② VUV・軟X線光源：放射光のエネルギーは数10電子ボルト(eV)～数keV
- ③ 赤外・可視光源：自由電子レーザー

C. 発生メカニズムによる分類と特徴

- ① 放射光：大強度、高輝度、偏光特性、時間構造（パルス）、安定性
- ② 自由電子レーザー：大強度、コヒーレンス（可干渉性）
- ③ レーザー電子光（厳密には放射光ではない）：単色ガンマ線



第3図 X線光源の発展

1895年レントゲンがX線を発見してから今日までのX線発生装置の発展を、「輝度」で示した図である。1960年代までは「X線管」のみが用いられていたが、放射光の実用化でX線の輝度が急激に高くなってきた。

(4) 主な放射光施設

A. 我が国の放射光施設

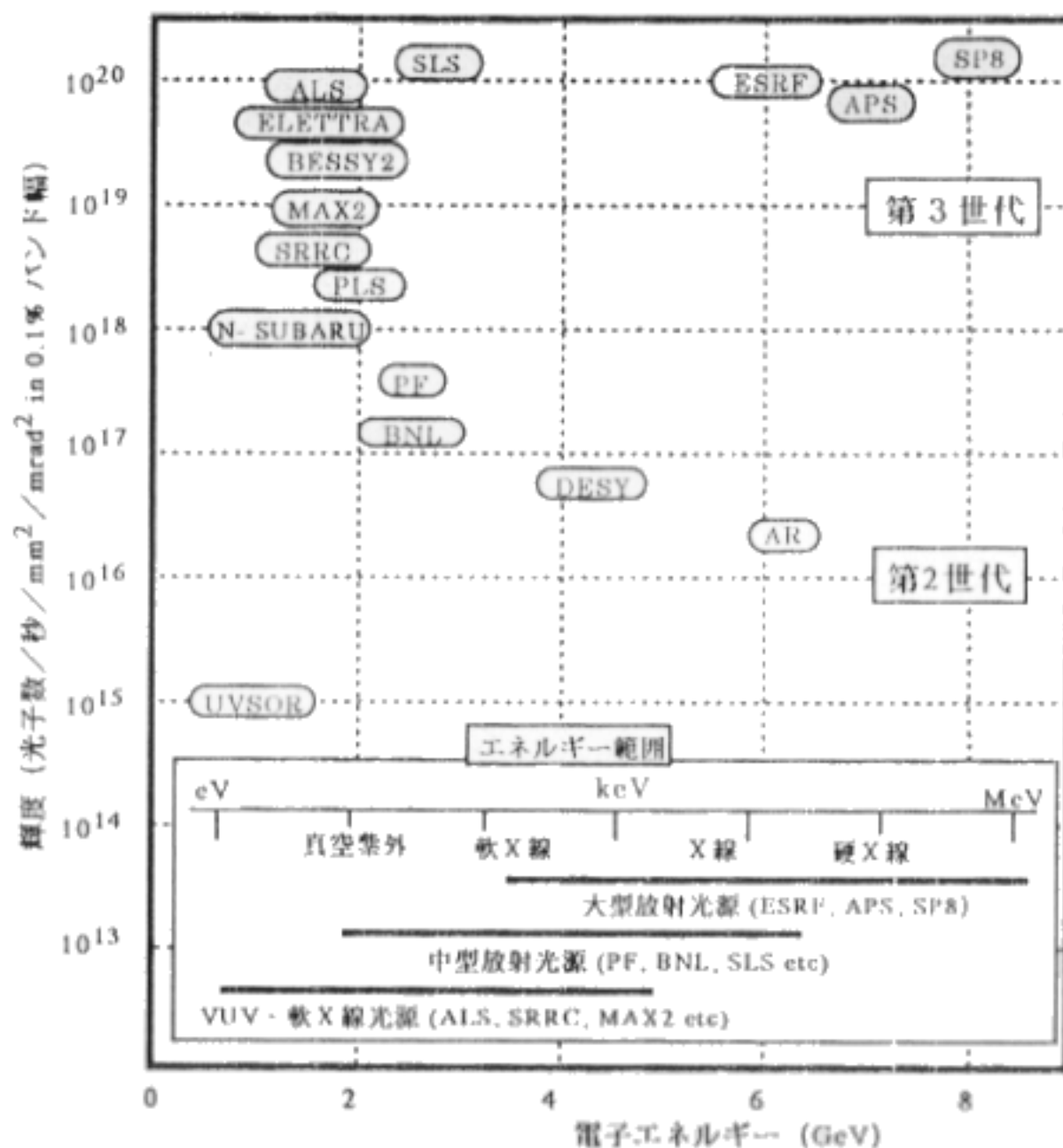
第1表 我が国の放射光施設 (稼働中)

注) II: 第2世代, III: 第3世代

設置機関	設置場所	施設名	エネルギー(GeV)	備考
JASRI	橘府	SPring-8	8	III, 全国共同利用
KEK	筑波	KEK-AR	6	II, 全国共同利用
KEK	筑波	KEK-PF	2.5	II, 全国共同利用
姫工大	橘府	New SUBARU	1.5	III, 学内共同利用
電総研	筑波	TERAS	0.8	II,
分子研	岡崎	UVSOR	0.75	II, 全国共同利用
広島大	東広島	HiSOR	0.7	小型, 学内共同利用
立命館大	草津	AURORA	0.6	小型, 超伝導, 共同利用
電総研	筑波	NIJ-II	0.6	小型
電総研	筑波	NIJ-IV	0.5	小型, FEL
NTT	厚木	NTT-I	0.8	小型
NTT	厚木	NTT-II	0.6	小型, 超伝導
石川島播磨重工業	土浦	LUNA	0.8	小型
住友電工	橘府	NIJ-III	0.6	小型
三菱電機	伊丹		0.585	小型

第2表 我が国の放射光施設 (計画中)

設置機関	設置場所	エネルギー(GeV)	備考
東京大学 物性研	柏キャンパス	1.5	提案中
東北大学	核研キャンパス	2	提案中
名古屋大学		1	検討中
放医研	桶毛	2.3	検討中
千葉大	市原	2.5	提案中
佐賀大	佐賀	1	提案中
青森大	六ヶ所		検討中



第4図 世界の主な第2世代、第3世代の放射光施設

B. 世界の主な放射光施設（稼働中及び建設中）

第3表 世界の主な放射光施設（第1世代）

設置場所	施設名	エネルギー(GeV)
Beijin, China	BEPC	1.5 - 2.8
Aarhus, Denmark	ASTRID	0.6
Orsay, France	DCI	1.8
Hamburg, Germany	DORIS III	4.5 - 5.3
Frascati, Italy	DAΦNE	0.51
Tsukuba, Japan	KEK-AR	6.5
Novosibirsk, Russia	VEPP-4	5 - 7
Ithaca, USA	CESR	5.5
Stanford, USA	SPEAR	3 - 3.5

第4表 世界の主な放射光施設（第2世代）

設置場所	施設名	エネルギー(GeV)
Campinas, Brazil	LNLS-I	1.37
Hefei, China	NSRL	0.8
Daresbury, UK	SRS	2
Indore, India	INDUS-1	0.45
Okazaki, Japan	UVSOR	0.75
Tsukuba, Japan	TERAS	0.8
Tsukuba, Japan	KEK-PF	2.5
Moscow, Russia	Siberia I	0.45
Moscow, Russia	Siberia II	2.5
Baton Rouge, USA	CAMD	1.2
Stoughton, USA	Aladdin	0.8 - 1
Upton, USA	NSLS I	0.75
Upton, USA	NSLS II	2.5 - 2.8

第5表 世界の主な放射光施設（第3世代）

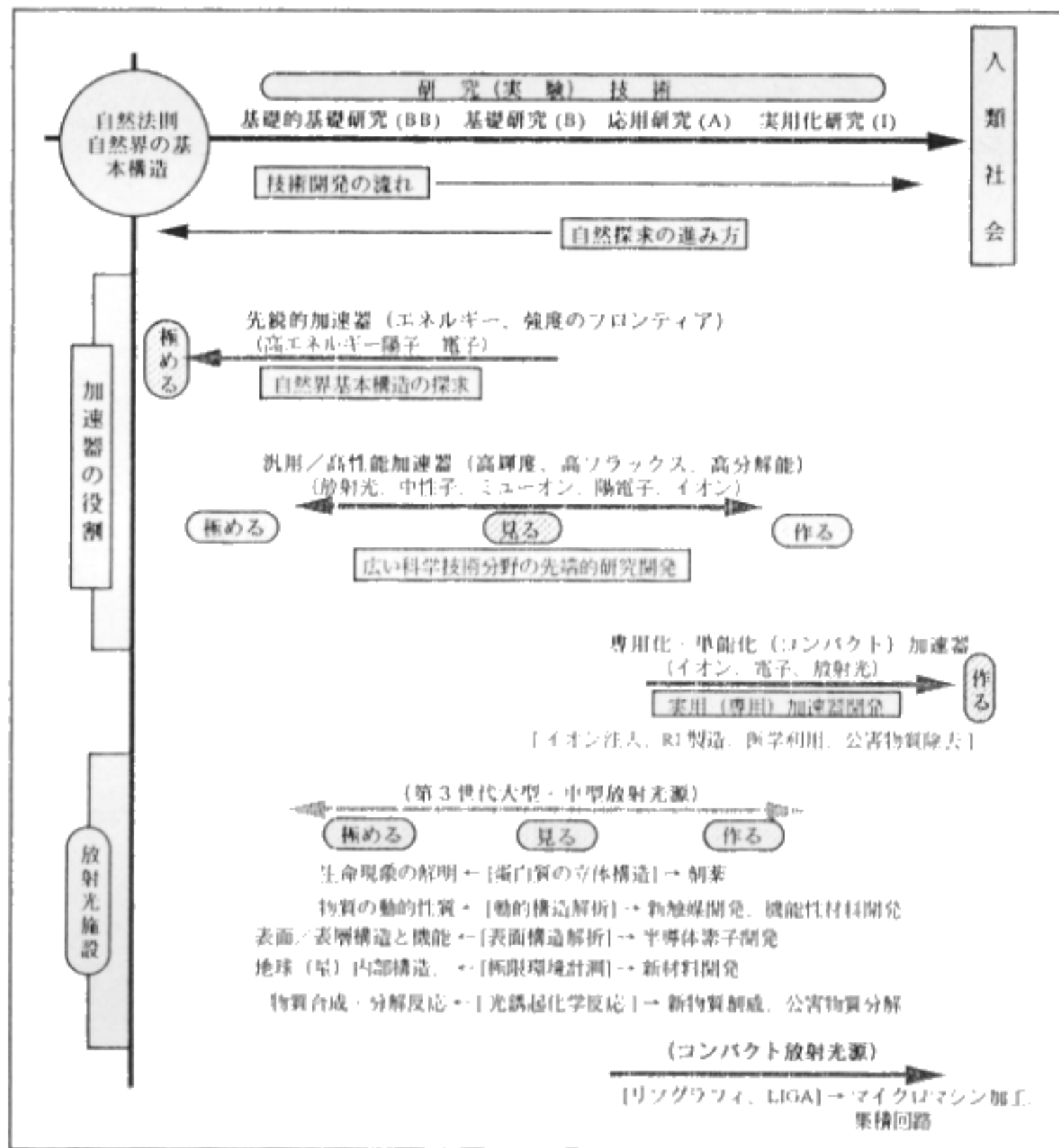
設置場所	施設名	エネルギー(GeV)	備考
Hsinchu, Taiwan	SSRC	1.3	
Grenoble, France	ESRF	6	
Orsay, France	SuperACO	0.8	
Hamburg, Germany	TTF-FEL*		FEL SASE
Dortmund, Germany	DELTA	1.5	FEL Use
Berlin, Germany	BESSY II	2	
Karlsruhe, Germany	ANKA	2.5	for industrial use
Trieste, Italy	ELETTRA	1.5 - 2	
Harima, Japan	SPring-8	8	
Pohang, Korea	PLS	2	
Lund, Sweden	MAX II	1.5	
Villigen, Switzerland	SLS*	2.5	
Argonne, USA	APS	7	
Berkeley, USA	ALS	1.5	
Durham, USA	FEL	1 - 1.3	FEL Use

* in construction as of Sept. '99

III 加速器科学における放射光の位置

(1) 科学技術研究開発と加速器の位置付け

加速器は科学技術の広い分野に亘る研究開発の基本的なツールであるとともに、実用化された技術の両面を持つ



第5図 科学技術研究開発と加速器の位置づけ

IV. 放射光の利用

(1) 現代科学技術の研究開発で果たしている役割

- A. 放射光は真空紫外からX線領域では唯一の高輝度、高フラックス光源である
- B. X線は物質の透過性が高く、物質内部の構造や状態を見るプローブである
- C. X線は波（電磁波）と粒子（光量子）の性質を示し、物質に対して多彩に作用する

I) 波としての性質が特長となる現象とその利用

- ・ 全反射、屈折、回折、干渉などの波動現象
- ・ 波長が物質中の原子間の距離とほぼ同程度
- ・ 特定の波長で起こる共鳴吸収

II) 粒子（光量子）としての特長

- ・ 散乱、吸収、励起、二次粒子放出（光電子、蛍光X線）などの現象
- ・ エネルギーと運動量の保存則
- ・ 波長の変化と強度の変化

- D. その結果、物質の構造解析、特性評価、機能解明、分析、物質分解・合成、加工、内部構造のイメージングなど広く利用されている

(2) 現在の放射光源に要求されている特性

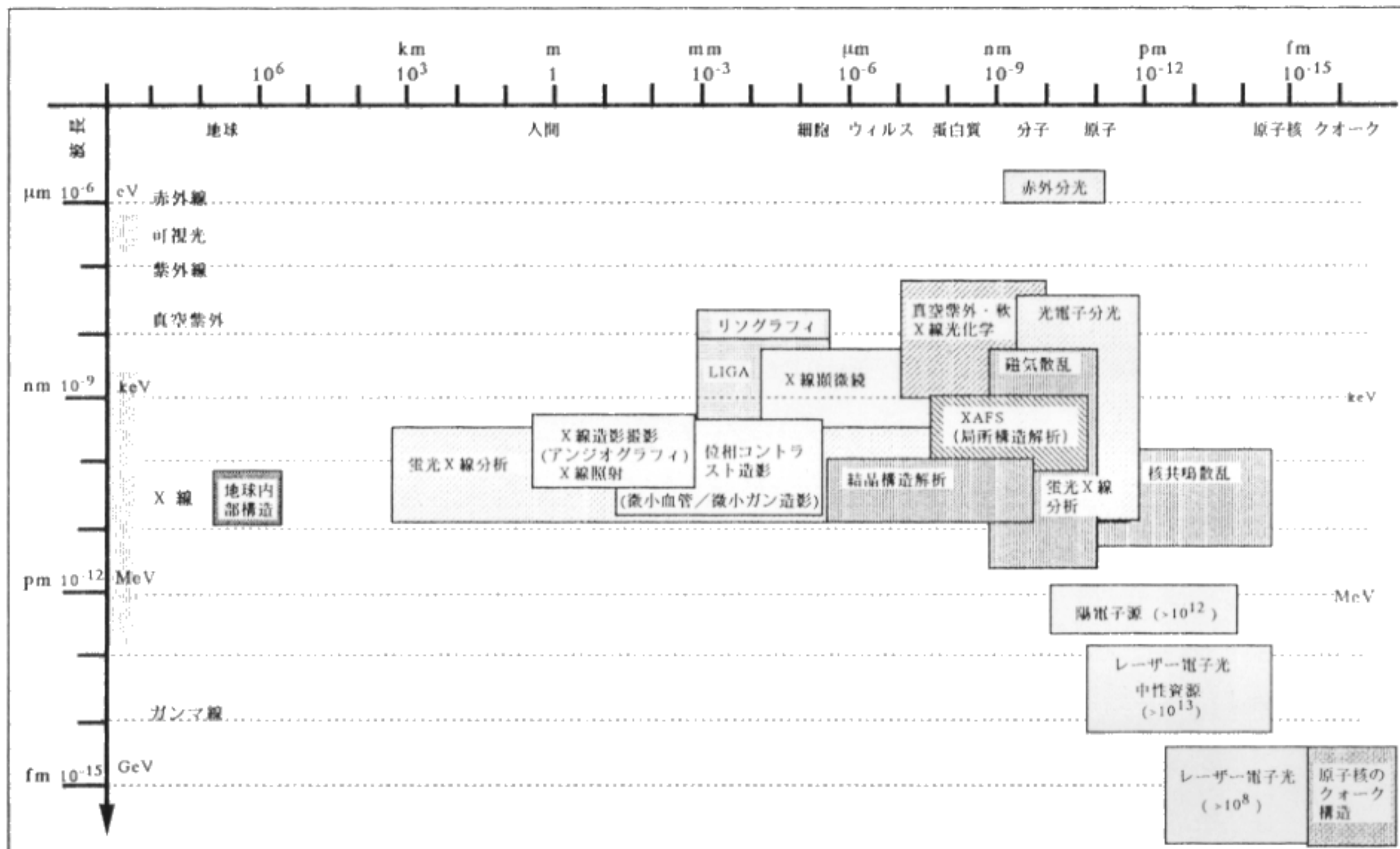
- A. 輝度、波長範囲：広い波長範囲に亘って、高輝度、高フラックスの放射光を提供する、できればより高エネルギーへ
- B. 時間特性（パルス特性）：短いパルス幅で高いピーク光子量を得る、繰り返しを可変にする
- C. 偏光特性：円偏光、速いスイッチング、直線偏光
- D. 可干渉性（コヒーレンス）

(3) 放射光科学の発展に向けて求められている研究技術

- A. 新しい光ビーム技術の開発：マイクロビームからナノビームテクノロジーへ
- B. 新しい測定手法の開拓：高エネルギーX線の利用、コヒーレンス
- C. 計測技術の高度化：高速検出系、極限環境下の計測

(4) 新しい利用分野の開拓

- A. 環境科学、考古学などへの展開
- B. 産業界の利用



第6図 放射光の利用

(2) わが国の放射光研究の特長と問題点

A. わが国における放射光研究の特長

I) 我が国における放射光研究

わが国は、放射光研究ではパイオニアの仲間に入っている。1960年代に建設された東京大学原子核研究所（当時）の電子シンクロトロンを用いて最初のパラサイト実験が行われ、その成果をもとにして世界最初の放射光専用専用の蓄積リング「INS-SOR」が建設された。その後、高エネルギー物理学研究所（当時、KEK）に放射光実験施設（PF）が設置され、多くの成果を上げてきた。現在、第3世代放射光施設では世界最高性能の大型放射光施設「SPring-8（SP8）」が稼働している。

II) わが国放射光施設が持つ、他の諸国にない特長

i) 高輝度X線光源

SP8は80億電子ボルト（8GeV）の低エミッタンスリングで、輝度の最も高い高エネルギーX線を発生できる。

ii) RI 実験

放射性物質の試料を用いた実験が可能であり（PF、SP8）、アクチノイドを含む物質の研究が行われている。とくにSP8では3本（現在1本が稼働中）のビームラインを用いて広い波長範囲で研究が可能で、原子力研究の裾野を広げる新しい基礎研究の展開が期待されている。

iii) 長尺ビームライン

SP8は62本のビームラインが設置可能であるが、そのうち3本は1kmまで延長可能である。このビームラインを用いて「X線の位相計測」による新しい研究領域の開拓が図られている。

iv) 長尺挿入光源

SP8には30mの長尺挿入光源（アンジュレータ）を設置できるビームラインが4本あり、既にその異本が建設中である。ここでは世界最高輝度にX線が利用でき、国際的な参加者を募って、コヒーレントX線による新しい研究の開拓が計画されている。

B. わが国における放射光研究の問題点

I) VUV・軟X線光源計画

最近、欧米諸国は中型の高輝度放射光施設を建設している。既存の施設ELETTRA（イタリア）に加えて、MAX2（スウェーデン）、BESSY2（ドイツ）が完成し、SLS（スイス）が建設中、DIAMOND（イギリス）計画がスタートしている。一方アジアでもSRRC（新竹、台湾）、PAL（浦項、韓国）が稼働中で、新しくSSRC（上海、中国）が建設を開始した。これは高輝度X線の基礎的、応用的研究における有用性が改めて認識され、放射光利用研究の拡大しているのに対応して、より広い科学技術分野の研究者に利用の機会を与えるためである。これに対してわが国では高性能の高輝度中型計画が提案されているが、未だ実現に至っていない。

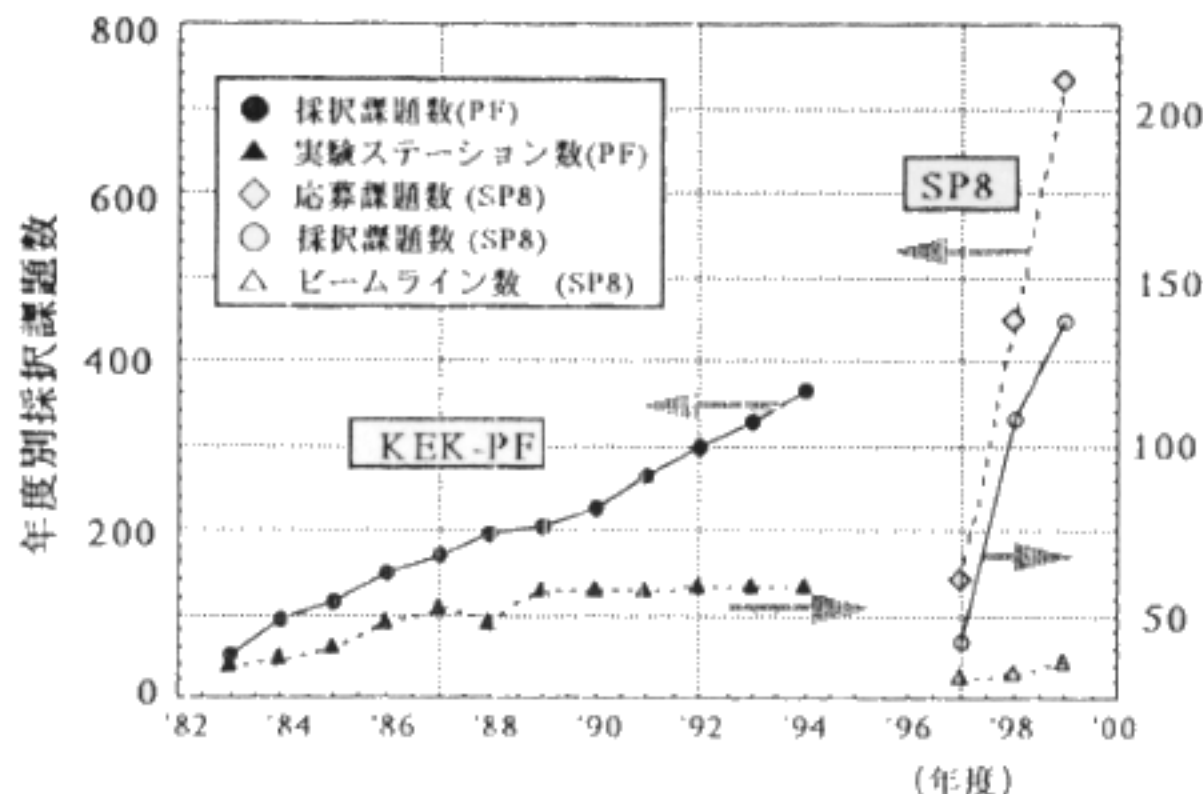
II) 産業界の利用

欧米諸国では産業界による放射光利用が進んでいる。とくに蛋白質の立体構造解析では、多くの企業研究者が大学の研究者と協力し、生体機能の解明と創薬にしのぎを削っている。一方わが国では企業研究者の放射光利用が限られた企業に偏っている。産業界の利用をもっと活発にするとともに産学協力も実施して、わが国産業の技術開発力を高めるのに貢献する必要がある。

(3) わが国の放射光研究の現状と将来展望

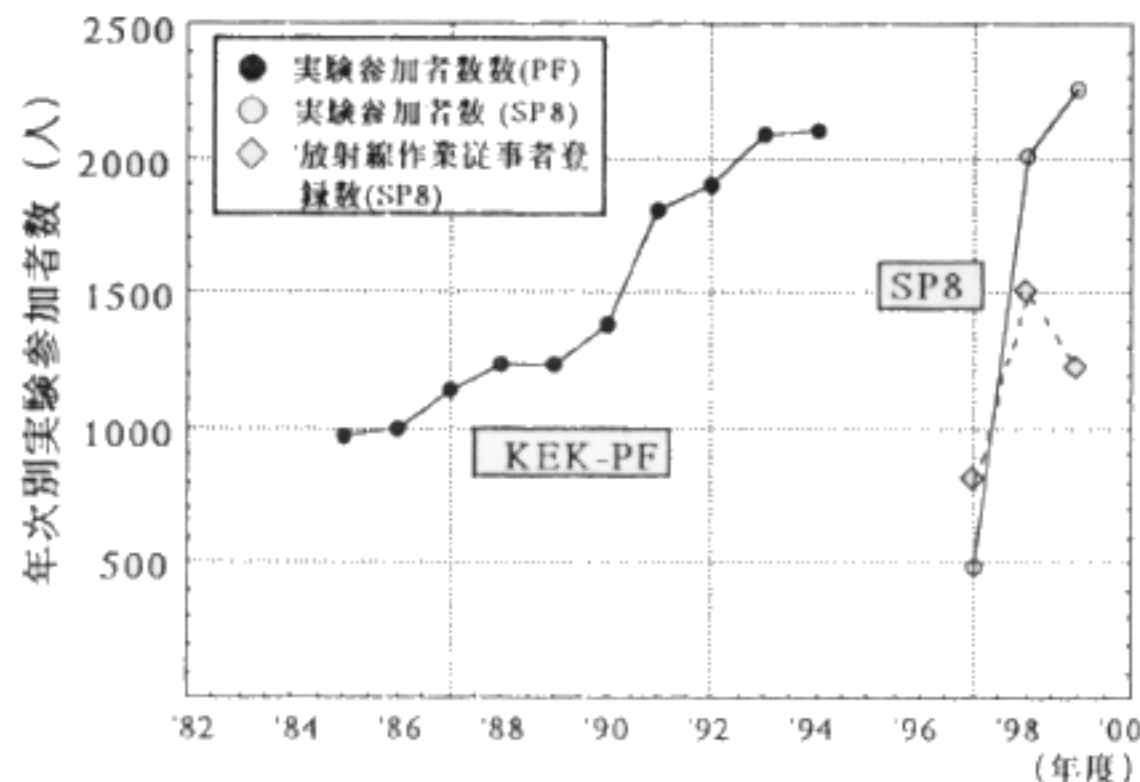
A. わが国における放射光研究の現状分析

KEK-PF及びSPring-8の年度別採択課題の変遷



註) KEEK-PF データは会計年度の統計。
SP8 データは暦年の統計 (97年は3カ月)

KEK-PF及びSPring-8の年次別実験参加者の変遷



註) KEEK-PF データは会計年度の統計。
SP8 データは暦年の統計 (97年は3カ月)
但し放射線作業従事者登録数は会計年度の統計で、99年度は6ヶ月のデータである

セクター別課題採択数 (第1回～第4回)

