

## 参考資料目次

- 参考資料 1. 次世代放射光源計画評価作業部会について
- 参考資料 2. 次世代放射光源の種類と特徴
- 参考資料 3. X線自由電子レーザーの開発・共用
- 参考資料 4. 国内の主な放射光施設
- 参考資料 5. SPring-8の現状と高度化の方向性 [理研/JASRI]
- 参考資料 6. PF次期放射光光源計画 [KEK]
- 参考資料 7. ERL型次世代放射光源の提案 [JAEA]
- 参考資料 8. UVSORの現状と将来 [分子研]
- 参考資料 9. 広島大学放射光科学研究センター [HiSOR]
- 参考資料 10. 海外の主な放射光施設
- 参考資料 11. 用語解説

## 次世代放射光源計画評価作業部会について

## 1. 趣旨

- ・放射光は、物質の解析・分析などの画期的な手段として、ライフサイエンス、ナノテクノロジーなどの様々な分野で、幅広く利用されている。近年における放射光を利用した先端的研究の進展などに伴い、「より微細な構造」、「より速い変化」の計測・分析に対するニーズが高まってきている。
- ・このため、高コヒーレント性、短パルス性、高ピーク輝度などの特徴を持った次世代放射光源の計画や構想が提案され、その実現が強く期待されている。
- ・このような状況を踏まえ、わが国の次世代放射光源の整備方針、利用研究方針、さらには運営体制等について検討し、評価するため、平成17年5月24日に、科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会研究評価部会に「次世代放射光源計画評価作業部会」を設置した。
- ・前半4回にわたって次世代放射光源の一つであるX線自由電子レーザー計画の評価を実施し、中間とりまとめを行った。
- ・後半4回では、「先端的基盤設備としての光源計画」として次世代放射光源を中心に、わが国の放射光施設全体のあり方について検討を行い、報告書を取りまとめた。

## 2. 審議の経過

### ○第1回

開催：平成17年6月21日（火）

議題：・次世代放射光源計画について  
・今後、検討・評価すべき項目について

### ○第2回

開催：平成17年7月19日（火）

議題：・X線自由電子レーザー計画について  
・評価項目について

### ○第3回

開催：平成17年8月5日（金）

議題：・X線自由電子レーザー計画の評価について

### ○第4回

開催：平成17年8月19日（金）

議題：・「X線自由電子レーザー計画評価について（中間とりまとめ案）」について

### ○第5回

開催：平成17年9月29日（木）

議題：・今後の次世代放射光源計画について

### ○第6回

開催：平成17年10月31日（金）

議題：・今後の次世代放射光源計画について  
・報告書の構成について

### ○第7回

開催：平成18年1月30日（月）

議題：・放射光を必要とする研究ニーズと対応する放射光の性質について  
・報告書（案）の骨子について

### ○第8回

開催：平成18年2月20日（月）

議題：・報告書のとりまとめ

### 3. 委員名簿

#### 主査

太田 俊明 (東京大学 大学院理学系研究科 教授)

#### 委員

雨宮 慶幸 (東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授)

大泊 巖 (早稲田大学 理工学部 教授)

神谷 幸秀 (高エネルギー加速器研究機構 理事・加速器研究施設長)

菊田 惺志 (高輝度光科学研究センター 参与)

熊谷 教孝 (高輝度光科学研究センター 加速器部門長兼施設管理部長)

腰原 伸也 (東京工業大学 フロンティア創造共同研究センター 教授)

小杉 信博 (自然科学研究機構分子科学研究所 研究総主幹)

今野 美智子 (お茶の水女子大学 理学部化学科 教授)

田島 節子 (大阪大学 大学院理学研究科 教授)

谷口 雅樹 (広島大学 理事・副学長)

中迫 雅由 (慶應義塾大学 理工学部物理学科 教授)

西島 和三 (持田製薬株式会社 開発本部開発企画推進部 主事)

丹羽 紘一 (株式会社富士通研究所 顧問)

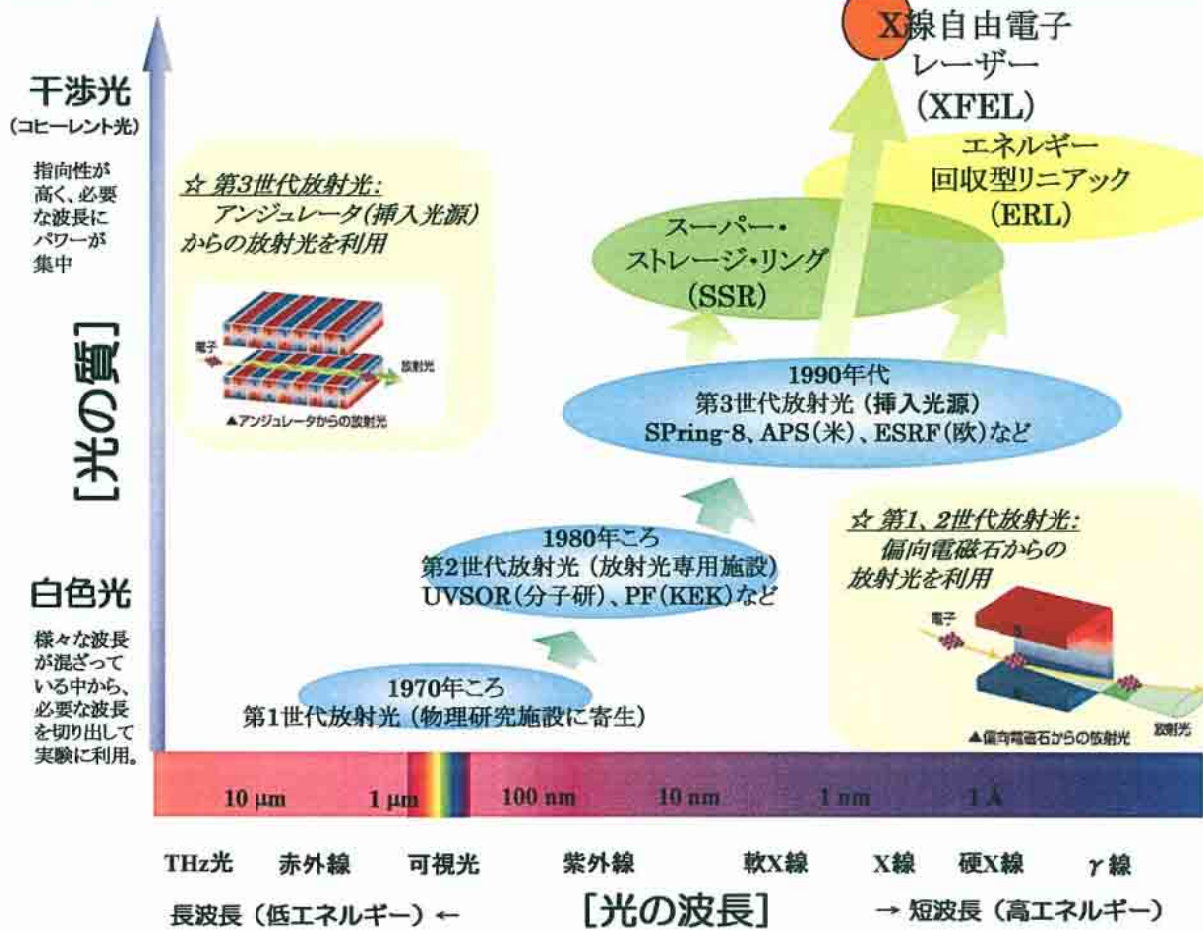
林崎 良英 (理化学研究所 ゲノム科学総合研究センター プロジェクトディレクター)

水木 純一郎 (日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門 上級主席研究員  
放射光科学研究ユニット長)

(五十音順)

# 次世代放射光源の種類と特徴

参考資料2



| 形式              | X線自由電子レーザー                        | エネルギー回収型リニアック              | スーパー・ストレージ・リング                  | (参考) 第3世代大型放射光      |
|-----------------|-----------------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------|
| 計画・提案           | SCSS (理研)                         | KEK-ERL<br>原研ERL           | SSR (KEK)                       | SPring-8<br>(原研/理研) |
| コヒーレント特性        | ◎<br>100%                         | ○<br>15~20%                | ○<br>15~20%                     | △<br>0.1%           |
| 短パルス特性          | ◎<br>数十フェムト秒                      | ○<br>数百フェムト秒               | ○<br>数百フェムト秒                    | △<br>数十ピコ秒          |
| 高輝度性            | パルス輝度 ◎<br>平均輝度 ○                 | パルス輝度 ○<br>平均輝度 ◎          | パルス輝度 ○<br>平均輝度 ○               | パルス輝度 △<br>平均輝度 ○   |
| 普遍的特性 (同時利用可能数) | △<br>同時利用は困難                      | ○<br>最大電流100mA             | ◎<br>最大電流500mA                  | ○<br>最大電流100mA      |
| 開発要素            | あり<br>高輝度・高電流電子源、光学系 (超高輝度による損傷等) | あり<br>高輝度・高電流電子源、超伝導加速空洞技術 | あり<br>設計研究、コヒーレントX線発生、短パルス光発生技術 |                     |

# X線自由電子レーザーの開発・共用

平成18年2月

文部科学省研究振興局  
基礎基盤研究課

## 目 次

1. X線自由電子レーザーの開発・共用
2. 欧米におけるXFEL開発計画
3. 我が国独自の戦略(1) ... 独自技術によるコンパクト化
4. 我が国独自の戦略(2) ... SPring-8との相乗効果
5. XFELで初めて可能となる画期的な研究テーマ
6. 創薬に直結する「膜タンパク質」の構造解析
7. 単一細胞レベルでの多チャンネルRNA同時測定(セルマップ法)
8. XFELによる細胞イメージング 広い時間・空間での生命現象追跡
9. ナノ細孔への気体吸着を利用した新機能性材料の創成
10. 強光子場を利用した新しいナノテクノロジーの創成
11. 事前評価：国際レビュー委員会 & 計画評価作業部会
12. 総合科学技術会議：国家的に重要な研究開発の評価
13. 国家基幹技術としてのX線自由電子レーザー
14. XFELの利用に向けた技術開発
15. 年次計画
16. X線自由電子レーザー施設

# X線自由電子レーザーの開発・共用

- ・プロジェクト総経費 355億円 (平成18年度～22年度)
- ・平成18年度予算案 2,306百万円 (新規)

## ☆X線自由電子レーザーの概要

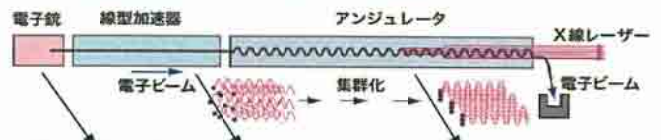
SPRING-8の10億倍を上回る高輝度のX線レーザーを発振し、一原子レベルの超微細構造、化学反応の超高速動態・変化を瞬時に計測・分析することを可能とする世界最高性能の研究基盤「X線自由電子レーザー(X-FEL)」を実現する。これにより、ライフサイエンス分野やナノテクノロジー・材料分野など、様々な科学技術分野に新たな研究領域を開拓する。

## ☆X線自由電子レーザーの特徴

放射光による強力な“高干渉性硬X線”の実現。  
⇒レーザーと放射光の特徴を併せ持つ光

- ・短い波長【硬X線(波長0.1ナノメートル以下)】  
→ 原子・分子レベルでの構造解析
- ・短いパルス【フェムト秒パルス(10兆分の1秒)】  
→ より高速な動態・変化を捕捉
- ・質の良い光【高干渉性(完全コヒーレント性)】  
→ よりシャープな線の取得・精密計測
- ・強力な光【超高輝度(SPRING-8の10億倍)】  
→ 非常に強い電場を形成  
→ 短時間での解析が可能

## ☆X線自由電子レーザーの構成



熱駆動型電子銃：より鋭い電子ビームを発生。



Cバンド型加速器：高加速勾配により、短い距離で高いエネルギーまで加速。



真空封止型アンジュレータ：短波長・高干渉性・高輝度なX線レーザーを発振。

## 欧米におけるXFEL開発計画

【米国】 SLAC: Stanford Linear Accelerator Center (スタンフォード線形加速器研究センター)

Liniaic Coherent Light Source : LCLS  
[線形加速器コヒーレント(高干渉性)光源]

- ・既存2マイルライナックの1/3(約1km)をそのまま活用
- ・総プロジェクトコスト \$615M以上(約700億円)  
(既存施設の活用により\$300M以上を節減)
- ・全長 2キロメートル
- ・発振波長 0.15 ナノメートル
- ・FY2005予算 \$54M → 2009年運転開始に向け始動
- ・DOEの研究施設整備計画においてプライオリティ第3位

米国カリフォルニア州



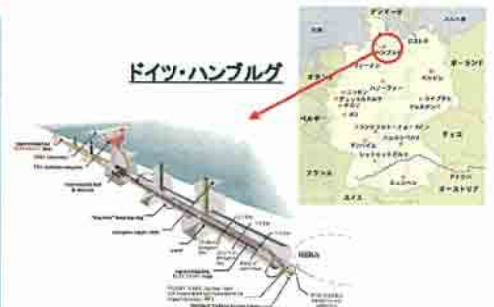
LCLS 概略図

【欧州】 DESY: Deutsches Elektronen-Synchrotron (ドイツ電子シンクロトロン研究所)

European X-Ray Free-Electron Laser  
[ヨーロッパX線自由電子レーザー]

- ・欧州11ヶ国による共同プロジェクト
- ・総プロジェクトコスト 908MEuro(約1,200億円)
- ・全長 3.4 キロメートル
- ・発振波長 0.085 ナノメートル
- ・2012年 運転開始を計画
- ・VUV(波長6nm)・FELを開発。XFELに向け試験研究を実施。

ドイツ・ハンブルグ



European XFEL 概略図

## 我が国独自の戦略 (1)

- ☆ 我が国独自の戦略 (1) 独自技術によるコンパクト化 ⇒ 早期実現可能、優れた拡張性  
 (2) SPring-8との相乗効果 ⇒ 多様な研究手法の展開

### ◆ 電子銃

従来の常識を破る熱電子銃を用いた高密度低エミッタンス電子ビーム発生 (← SPring-8)



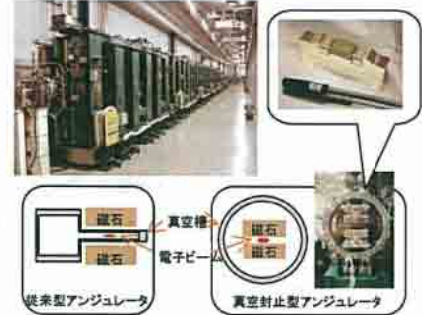
### ◆ 線型加速器

我が国が誇る精密加工技術を使用して、従来の2倍の加速効率をもつ加速器を開発 (← KEK)



### ◆ アンジュレーター

我が国が独自に開発した真空封止型アンジュレーターを採用することで、効率良くX線レーザーを発振 (← SPring-8)



・平成17年度科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞

大幅なサイズダウンを実現 ⇒ 全長 800メートル

さらに、電子の加速エネルギーを低く抑えてもX線の発振が可能に  
 ⇒ 建設コストとともに運転コストも軽減

3

## 我が国独自の戦略 (2)

- ☆ 我が国独自の戦略 (1) 独自技術によるコンパクト化 ⇒ 早期実現可能、優れた拡張性  
 (2) SPring-8との相乗効果 ⇒ 多様な研究手法の展開

X線自由電子レーザーとSPring-8を併設することにより、世界にも例を見ない、同一サイトに集積された世界最高性能の光源拠点が実現。



☆ X線レーザーと放射光の同時照射、レーザー電子光など、世界でここだけが実現可能な利用研究が展開。

☆ X-FELで加速した電子ビームをSPring-8に入射することで、SPring-8の一層の性能向上を実現。

4



# XFELで初めて可能となる画期的な研究テーマ

## 従来技術の限界

X線領域の強度が不足  
非結晶物質の構造解析困難

時間分解能: ピコ秒  
電子状態制御困難

X線領域のコヒーレント光が存在しない  
イメージング: 極めて低解像度

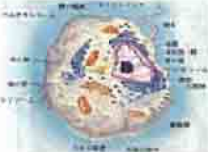
## X線自由電子レーザー (XFEL)

10億倍強いX線

フェムト秒時間分解能

完全コヒーレントX線

高分解能細胞イメージング



生物学・医学

非結晶物体の原子レベル構造解析  
超高精度・超高速イメージング

観測データの地上再現

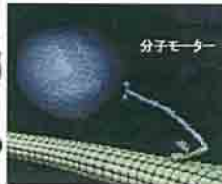


強光子場ポンプ  
X線回折プローブ

膜タンパク質一分子構造解析  
(結晶化不要)



生体ナノマシンの  
ダイナミクス



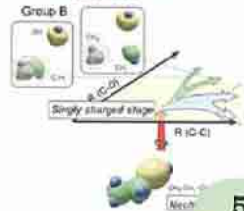
ナノサイエンス・ナノテクノロジー



電子状態観測  
電子・分子制御



ナノダイナミクス



5

# 創薬に直結する「膜タンパク質」の構造解析

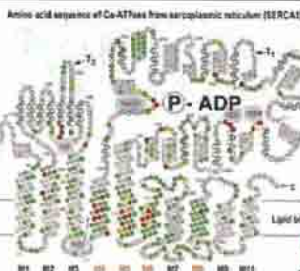
膜タンパク質:

脂質(細胞膜)と結合  
細胞の活動を左右  
ヒトの疾病に深い関連  
結晶化が極めて困難

PDB登録  
水溶性タンパク質  
約 31200  
膜タンパク質  
約 100

ヒトゲノム  
タンパク質  
約 3-40000  
うち膜タンパク質  
約 10000

膜タンパク質の発現・精製

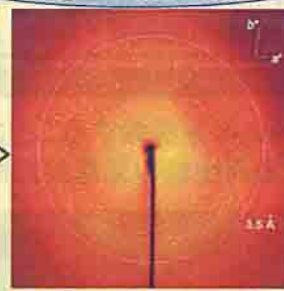


SPring-8の場合(現状)

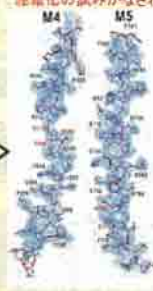
結晶化の試みがなされてから構造モデルの取得までほぼ10年



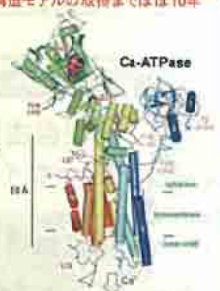
結晶化



回折・散乱実験

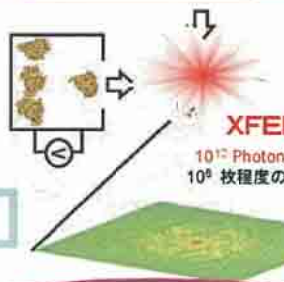


構造解析

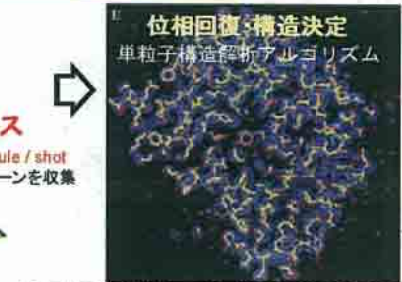


現状では  
極めて困難

結晶化不要



X線自由電子レーザー



計算機実験結果(Miao et al. (2002) PNAS 98, 6641)

構造解析の全過程を大幅に短縮

極めて輝度が高い (SPring-8の10億倍以上) ため、結晶化  
せずとも、1分子で構造解析に必要な散乱データが得られる

6

## 単一細胞レベルでの多チャンネルRNA同時測定(セルマップ法)

☆ 従来はタンパク質にしかできないとされていた、発生・分化等の重要な生命現象に関与するRNA(機能性RNA)の存在が明らかになり、世界中の注目を集めている。

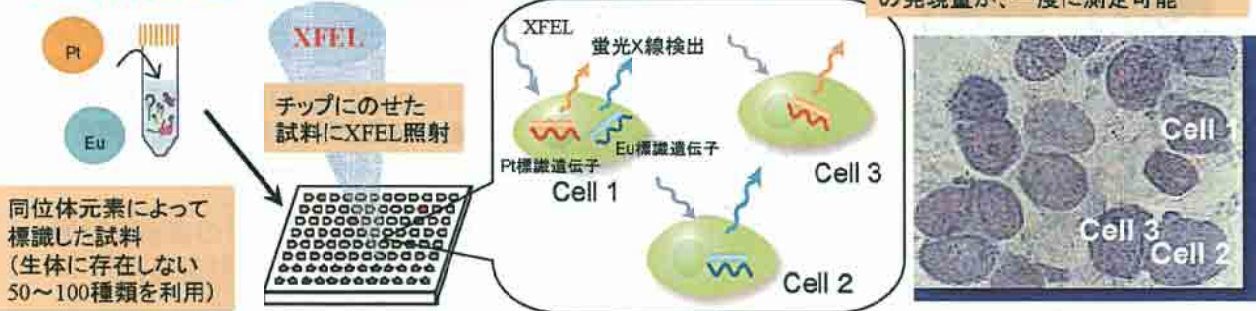
しかし!

機能性RNAは、細胞内でタンパク質との複合体を形成していると考えられているが、周囲のDNAやタンパク質の存在に紛れているため、既存技術では細胞内での位置の特定が困難であり、機能が解明されていない。

### XFELによるセルマップ法を用いると

短波長レーザーのため、細胞内の位置を特定可能!  
極めて輝度が高いため、微量な標識でも検出可能!

異なる元素で標識した複数のRNAの発現量が、一度に測定可能



XFELにより、単一細胞レベルの精密なRNA発現マップ(セルマップ)が実現

機能性RNAの機能解明

生物学の新たな展開  
医薬品、治療効果判定への応用

7

## XFELによる細胞イメージング 広い時間・空間での生命現象追跡

遺伝子産物が、

何時どこに現れ(RNA)、どんな格好で(立体構造)、如何に機能するのか(動的構造変化)、周辺溶媒分子(水)や有機化合物(脂質、糖)とどのような相互作用を行うのか?

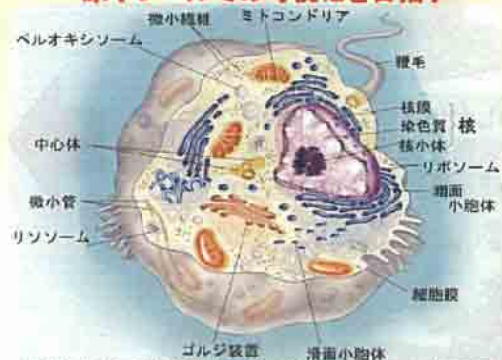
細胞内での生体分子の活動を時間・空間軸で追跡する必要性 ⇨ 高分解能細胞イメージング



完全コヒーレンス  
高強度

### X線自由電子レーザー

サブミクロンからサブナノの空間領域  
細胞構成生体分子の相互作用  
原子レベルでの可視化を目指す



組織特異的細胞やがん細胞の観察

完全コヒーレンス、高強度であるため、X線本来の分解能で観察可能!

8

## ナノ細孔への気体吸着を利用した新機能性材料の創成

**気体吸着素子の開発**： SPring-8による構造解析でナノサイズの細孔に気体分子が整列して吸着することを発見！ ⇒ 気体分子出し入れ機構、種類選別機構が明らかになれば、新しい気体吸着素子の開発につながる！

### SPring-8構造解析

⇒ ナノ細孔内で気体分子が整列する事を発見！



Nature 436(2005)238

これを機能性材料として活用するためには...

**気体分子の出し入れ機構の解明**  
**気体分子の種類選別機構の解明**

が必要！

X線自由電子レーザーのフェムト秒時間分解能により、細孔に分子が吸着される際の細孔と気体分子の相互作用をリアルタイムに直接観察。

従来技術では機構の解明ができないため、試行錯誤による探索が唯一の手段。

目的の気体分子を意のままに制御できるナノ細孔の設計を可能に！

### 新規ナノテクノロジー

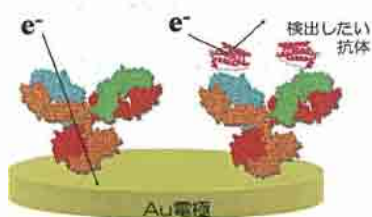
- 気体スイッチング素子、ガス回路(電子材料)
- 燃料電池、水素吸蔵(エネルギー)
- シックハウス対策壁(環境)

9

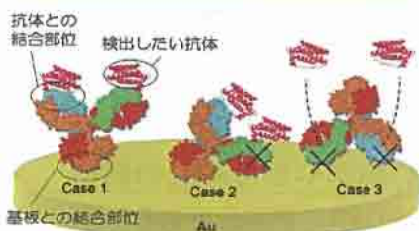
## 強光子場を利用した新しいナノテクノロジーの創成

**機能性バイオチップの開発**： 金(Au)の基盤電極の上にあるバイオ分子を整列させると、何も結合していない時は導体であるが、特定の抗体が結合したときには絶縁体になり、その抗体を検出するためのチップとして活用が可能となる。

電気化学を利用したバイオチップ



☆しかし、金の基盤電極に安定に結合させることが非常に困難で量産できない！



強光子場(=極めて強力な光によって形成される強い電場)を利用



X線自由電子レーザーの定在波による強光子場(強い電場)により、基盤上にバイオ分子を安定に整列させることが可能！

高機能バイオチップの量産技術の確立！

10

## 事前評価：国際レビュー委員会 & 計画評価作業部会

☆ 2つの事前評価を実施。いずれも「早期に着手すべき」と評価。

### ● 国際レビュー委員会

- ☆ 理研において2005年2月3日、4日に実施。
- ☆ 当分野における世界の第一人者を集め、計画の技術的内容や実現性についてレビュー。
- ☆ 委員：Kwang-Je Kim(米 APS)、M.-E. Couprie(仏 ACO)、Won Namkung(韓 PAL)、J. Hastings(米 SLAC)、J. Schneider(独 DESY)、J. N. Galayda(米 SLAC)、黒川眞一(KEK)

#### 主な提言

- 本計画は、大強度かつコヒーレントな短パルスX線の発生とその利用研究のための**革新的なプロジェクト**である。
- 目標は欧米と同様であるが、本計画は、**コンパクトな設計思想**に加え、世界をリードする放射光源**SPring-8**と併設する点で**ユニーク**。
- 本計画の建設スケジュールと技術的難度は**野心的**であるが、メンバーには困難な課題に対して**革新的な解決策を生み出してきた実績**がある。
- 委員会は、提案されたスケジュールで建設可能であることを支持し、**早期建設開始を勧告**する。

### ● 次世代放射光源計画評価作業部会

- ☆ 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 研究評価部会のもと、当作業部会を設置し、8月までに4回実施。
- ☆ 国内の有識者を集め、計画の必要性、効率性、有効性について評価。
- ☆ 委員：太田俊明(東大)、雨宮慶幸(東大)、大泊巖(早大)、神谷幸秀(KEK)、菊田惺志(JASRI)、熊谷教孝(JASRI)、腰原伸也(東工大)、小杉信博(分子研)、田島節子(阪大)、谷口雅樹(広大)、中迫雅由(慶大)、西島和三(持田製薬)、丹羽紘一(富士通研)、今野美智子(お茶女大)、林崎良英(理研)、水木純一郎(原研)

#### 総合評価

- ・ 本計画は、**科学技術・学術的な意義が極めて大きく、経済的・社会的な意義も認められ、今後のわが国の基礎研究と産業の発展に大きく寄与するもの**である。
- ・ 本施設を利用する先端的研究により**幅広い分野で新たな研究開発の展開が期待される**。
- ・ 以上を総合し、本作業部会としては、本計画は**積極的に進めるべきであり、早期に着手すべきである**と評価。

11

## 総合科学技術会議：国家的に重要な研究開発の評価

総合科学技術会議(CSTP)では、国費総額300億円以上の研究開発について、あらかじめ評価専門調査会が、専門家・有識者を活用して調査・検討を行い、その結果を受けて評価を行い、評価結果を推進体制の改善や予算配分に反映させることとしている。

### ● 審議過程

- 9月16日 評価専門調査会  
評価対象、担当議員・委員、進め方を確認
- 9月22日 第1回評価検討会  
ヒアリング、追加質問と論点候補の抽出
- 10月12日 第2回評価検討会  
追加ヒアリング、論点整理
- 11月4日 評価専門調査会  
評価案の検討
- 11月28日 総合科学技術会議  
評価案に基づく審議・結論

### ● 評価検討会 担当議員・委員

岸本 忠三、黒田 玲子 [以上 CSTP議員]  
川合 眞紀 (主査:東大)、  
北里 一郎 (明治製菓)、原山 優子 (東北大)  
[以上 評価専門調査会専門委員]  
板東 義雄 (物材機構)、堀 利匡 (広大)、  
松下 正 (KEK)、山田 家和勝 (産総研)、  
若槻 壮市 (KEK)

### ● 評価結果

#### 総合評価

- ・ 本プロジェクトは、幅広い分野における**産業や国民生活の向上に役立つ成果を諸外国に先駆けて創出するもの**である。
- ・ 放射光分野における我が国の**国際競争力強化及び国際貢献にも寄与すると期待される**。
- ・ 以上のことから、本プロジェクトは**実施することが適当**である。

#### 指摘事項

- ・ 科学技術に対する貢献と社会・経済への波及効果に対する、国民にわかりやすい説明の努力。
- ・ プロトタイプ機の活用とその成果の還元。
- ・ 利用研究の充実と速やかな推進。
- ・ 運営・評価体制の整備

X-FEL利用推進協議会を設置

12

## 国家基幹技術としてのX線自由電子レーザー

**国家基幹技術**：国が主導する一貫した推進体制の下で実施され世界をリードする人材育成にも資する長期的かつ大規模なプロジェクトにおいて、国家の総合的な安全保障の観点も含め経済社会上の効果을最大化するために基本計画期間中に集中的に投資が必要なもの。

諮問第5号「科学技術に関する基本政策について」に対する答申(平成17年12月27日総合科学技術会議)より

### ★ X線自由電子レーザーは...

#### 【国が主導する一貫した推進体制】

##### ・利用推進協議会の設置による一貫した推進：

XFELの完成直後から効果的・効率的な利用研究を実施し、革新的な研究成果を多数輩出することを目的として、文部科学省のもと利用推進協議会を設置。戦略的な研究課題の絞り込み、利用研究に関しての技術的基盤の整備と実験技術に関する準備等に注力。

#### 【世界をリードする長期的かつ大規模なプロジェクト】

##### ・独自技術による世界最高性能の研究基盤の実現：

欧米との熾烈な国際競争のもと、SPring-8やKEKにおいて独自に開発した技術を駆使し、よりコンパクトで世界最高性能の研究基盤を実現。その成果の普及と海外の研究者も含めた利用促進により、特にアジアのリーダーとしての国際貢献が期待され、我が国の国益に資する。

#### 【経済社会上の効果】

##### ・幅広い分野で産業や国民の生活向上に役立つ成果を創出：

「放射光とレーザーの特徴を併せ持つ光」として、従来の手法では実現不可能な分析が可能に。新たな気体吸蔵素子の開発への展開や重要なタンパク質の構造・機能の特許化や創薬・新規診断法への波及など、幅広い分野で産業や国民の生活向上に役立つ成果を創出。

◎ 総合科学技術会議が実施する国家的に重要な研究開発の評価(平成17年11月28日)

「本プロジェクトは実施することが適当」▶ 特に優先度の高い施策として位置づけ

13

## XFELの利用に向けた技術開発

平成18年度予算案 377百万円(新規・内局)

X線自由電子レーザー装置が発振する極めて強力なX線レーザーを効果的に利用するため、関連分野の動向調査等に基づいて利用方針、利用計画を策定するとともに、X線自由電子レーザーの実現が待たれる利用研究課題について、実際に利用研究を実施する際に生じる問題点を抽出し、それを解決する手法の開発、SPring-8やプロトタイプ機による検証試験を行う。

### ★ 利用研究の調査

- ・ 科学技術や産業等への波及効果に関する調査
- ・ 欧米動向調査

**文部科学省**  
大型放射光施設利用推進室

方針策定委託  
調査結果報告

**X-FEL利用推進協議会**

### ★ プロジェクト・ディレクター

⇒ 大学等第三者機関から選任されたPDのリーダーシップ

### ★ 主な活動内容

- ・ 利用方針、利用計画の策定
- ・ 利用研究の実施における技術的課題の解決のための研究開発  
→ ★ 試験研究委託費：公募等により開発項目を選定・実施(プロトタイプ機/SPring-8を使って研究を実施)
- ・ 情報公開  
→ シンポジウムの開催等

発展させ  
業務を  
継承

**利用研究  
促進懇談会**

⇒ 将来の利用者となる研究者を集め、そこでの議論を基に利用研究計画を集約。

14

## 年次計画

|          |                            | 2006<br>(H18)         | 2007<br>(H19) | 2008<br>(H20) | 2009<br>(H21) | 2010<br>(H22)  | 2011<br>(H23)                          | 2012<br>(H24) | 2013<br>(H25) |  |
|----------|----------------------------|-----------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|--|---------------|---------------|--|
| 全体計画     |                            | ← 建設期 →               |               |               |               |                | → 硬X線FEL(8GeV,0.06nm)発振<br>調整・試運転/共用 → |               |               |  |
| 施設整備等    | 建屋建設<br>(合計 117.4)         | 光源収納建屋 [95.1億円]       |               |               |               |                |  |               |               |  |
|          |                            | 実験ホール、研究棟 [22.3億円]    |               |               |               |                |  |               |               |  |
|          | 加速器等<br>装置整備<br>(合計 219.1) | 入射系、電子ビーム輸送系 [20.2億円] |               |               |               |                |  |               |               |  |
|          |                            | 加速器 [145.4億円]         |               |               |               |                |  |               |               |  |
|          |                            | ビームライン [48.0億円]       |               |               |               |                |  |               |               |  |
| 利用開発等    |                            | 利用開発 [3.8億円/年]        |               |               |               |                | 利用研究                                   |               |               |  |
| 予算 [億円]  |                            | 23.1                  | 66.6          | 108.2         | 75.1          | 82.5           |  |               |               |  |
| ※(参考)運営費 |                            |                       |               |               |               | 試運転費<br>[14億円] | 運転費 [28億円/年]                           |               |               |  |

15

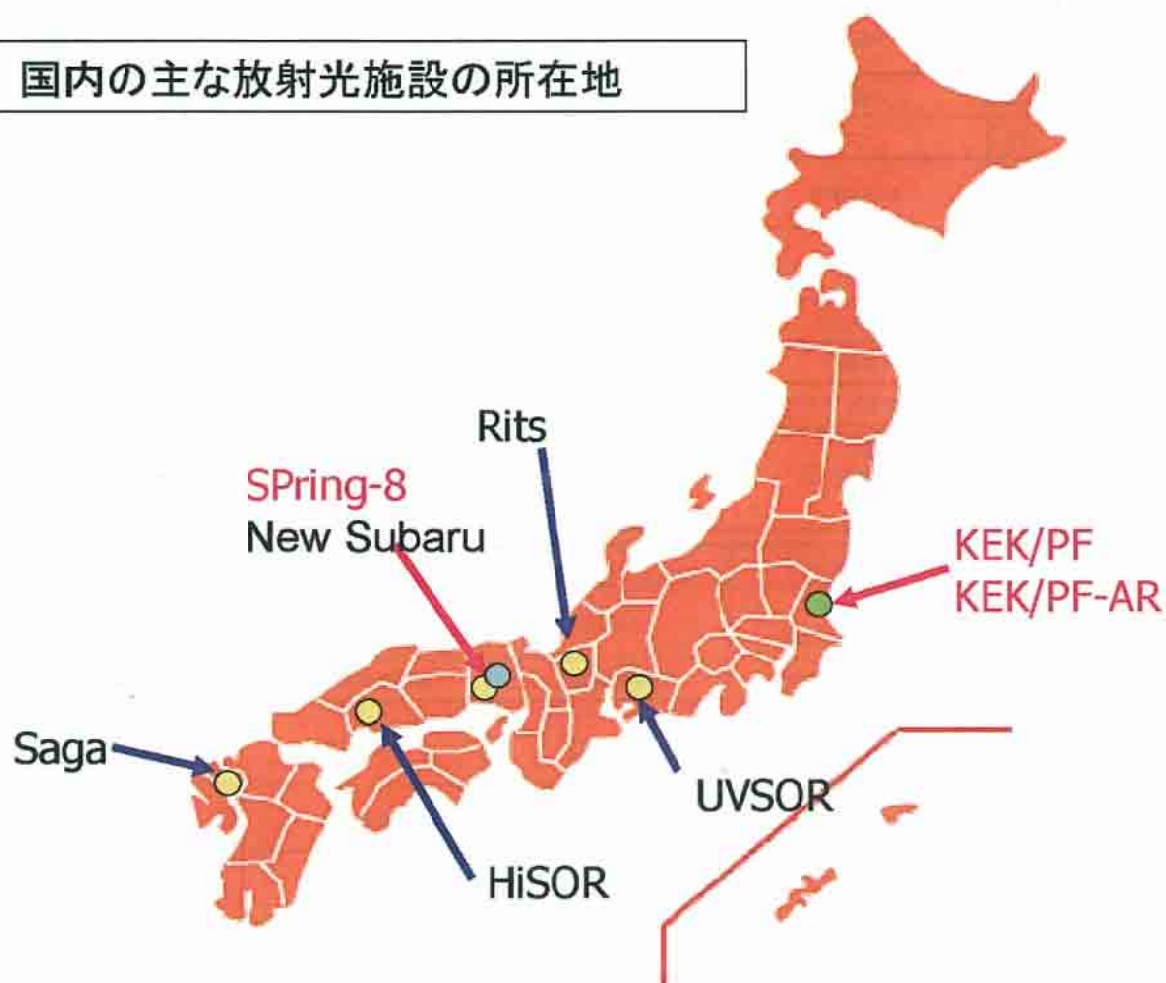
## X線自由電子レーザー施設



16

国内の主な放射光施設

国内の主な放射光施設の所在地



|             | SPring-8  | New SUBARU  | Photon Factory PFリング  | Photon Factory PF-ARリング   |
|-------------|---|---|---|---|
| 利用開始年       | 1997年   | 2000年   | 1982年<br>(高度化 2005年)  | 1996年<br>放射光専用化   |
| 所在地         | 兵庫県佐用郡  | —   | 茨城県つくば市   | —   |
| 運営者         | 高輝度光科学研究センター  | 兵庫県立大学  | 高エネルギー加速器研究機構<br>(物質構造科学研究所)  | —   |
| 環長(蓄積リング周長) | 1,436 m   | 118 m   | 187 m   | 377 m   |
| 電子エネルギー     | 8.0 GeV   | 1.5 GeV   | 2.5 GeV   | 6.5 GeV   |
| 蓄電値         | 100 mA  | 460 mA  | 450 mA  | 60 mA   |
| 波長領域        | ～硬X線  | ～軟X線  | ～X線   | ～硬X線  |
| 輝度          | ～10 <sup>21</sup>   | ～10 <sup>18</sup>   | ～10 <sup>18</sup>   | ～10 <sup>18</sup>   |
| 年間運転時間      | 5,363時間   | 3,400時間   | 4,864時間   | 4,857時間   |
| 年間利用者数      | 9,336人  | 3,658人  | 29,376人(PF,ARの合計)   |   |
| 建設費         | 1,089億円   | 53億円  | 195億円   | 68億円  |
| 年間維持費       | 106億円   | 3億円   | 17億円  | 14億円  |
| 主な特徴        | <ul style="list-style-type: none"> <li>世界最高性能、最先端研究</li> <li>国内外/産学官の研究者へ開かれた利用</li> <li>多種多様な研究分野</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>地域産業支援</li> <li>SPring-8の入射器を活用</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>大学共同利用機関</li> <li>産学官連携共同研究</li> <li>多種多様な研究分野</li> <li>放射光関連技術R&amp;Dの先陣</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>—</li> <li>—</li> <li>—(医学臨床応用を含む)</li> <li>世界唯一の常時単バンパ運転</li> </ul> |

|             | UVSOR   | SR Center  | HISOR  | SAGA LS  |
|-------------|---|--|--|--|
| 利用開始年       | 1984年<br>(高度化 2002年)  | 1996年  | 1996年  | 2005年(予定)  |
| 所在地         | 愛知県岡崎市  | 滋賀県草津市   | 広島県東広島市  | 佐賀県鳥栖市   |
| 運営者         | 自然科学研究機構<br>(分子科学研究所)   | 立命館大学  | 広島大学   | (財)佐賀県地域産業支援センター   |
| 環長(蓄積リング周長) | 53.2 m  | 3.14 m   | 21.95 m  | 75.6 m   |
| 電子エネルギー     | 0.75 GeV  | 0.575 GeV  | 0.7 GeV  | 1.4 GeV  |
| 蓄電値         | ～350 mA   | 300 mA   | 300 mA   | 300 mA   |
| 波長領域        | ～真空紫外   | 軟X線  | 真空紫外～軟X線   | ～X線  |
| 輝度          | ～10 <sup>17</sup>   | ～10 <sup>12</sup>  | ～10 <sup>15</sup>  | ～10 <sup>13</sup>  |
| 年間運転時間      | 2,500時間   | 1,600時間  | 1,580時間  | 5,200時間(計画)  |
| 年間利用者数      | 約800人   | 約250人  | 約270人  | —  |
| 建設費         | 37億円(建屋含む)  | 20億円   | 30億円(建屋除く)   | 51億円   |
| 年間維持費       | 3.8億円   | 1.2億円  | 2.7億円  | 4億円  |
| 主な特徴        | <ul style="list-style-type: none"> <li>トップアップ運転</li> <li>基礎的な分子科学研究分野での高輝度・低エネルギー放射光の重点的利用</li> <li>次世代光調製に向けての基礎研究</li> <li>小型施設で世界最高性能</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>学内教育・研究による高度な人材育成</li> <li>産学官共同研究</li> <li>マイクロシステムセンター(隣接)との連携</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>固体物理学を中心とする革新的物質科学研究</li> <li>学部・大学院生と若手研究者の育成</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>地域産業の高度化、新産業の創出</li> <li>産学官連携の拠点形成</li> <li>地方自治体と地域の大学との連携</li> </ul> |



## SPring-8の現状と高度化の方向性

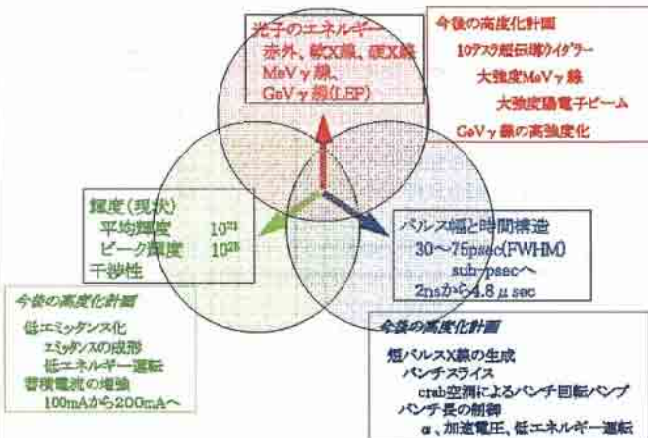
**SPring-8: 電子ビームエネルギーが8GeVの世界最先端の高輝度X線光源**

現段階 : 世界で最も「輝度」および「光束」が高いX線を本格活用

今後 : 随時トップアップ入射の導入で最先端光子の生成と利用へ

「光子のエネルギー」及び「パルスの時間構造と幅」を本格活用

### SPring8のビーム性能と発展の方向性



### SPring-8の電子ビームの性能

- 水平および垂直方向のエミッタンスが世界最小
- 軌道変動が水平で3ミクロン、垂直で0.7ミクロンと小さい
- 蓄積電流が8GeVで100mAと高い
- バンチ当たり14mA(67nC)、ピーク電流840Aと高い
- バンチ長が30から75ps(FWHM)と短い
- バンチの純度が $10^{-10}$ と高い
- バンチの時間間隔が2nsecから4.8  $\mu$  secまでの任意の値
- ビーム電流が随時トップアップ入射で0.1%以内で一定

### 施設の特徴

- 全エネルギー入射器システム
- 蓄積リングの4カ所に30m長直線部が設置

### 放射光利用の特徴

多数の利用者が高機能高精度X線を同時利用 → 加速器とビームライン機器の高精度制御

先端的研究と多様な汎用的研究の同時利用 → 柔軟性の高い加速器運転システムの構築

SPring-8の高度化:最先端のビーム性能と最先端の科学技術と施設の特徴を最大限活用することで

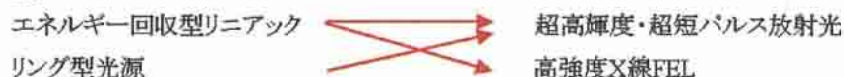
次世代放射光で目指す科学分野およびその他の先駆的研究の開拓を目指す

- 空間干渉性の利用: 低エネルギー運転やround-beamによる電子ビームの低エミッタンス化と挿入光源の高度化**  
サブミクロンサイズの結晶構造解析: 低分子からタンパク質等巨大分子まで  
ナノイメージング(ナノビーム蛍光X線分析、超微量分析)  
X線コーヒーレント回折顕微鏡、X線磁気顕微鏡による物性研究
- サブピコ秒短パルスおよび電子ビームの時間構造の利用: 超伝導crab空洞+30m超直線部+アンジュレータ**  
生命、物質科学でのサブピコ領域の過渡現象、光誘起相転移、構造物性・電子物性ダイナミクスの映像化等
- 高エネルギーX線および $\gamma$ 線の利用: 超伝導ウイグラー、インバースコンプトン $\gamma$ 線**  
数100keVからGeV  $\gamma$ 線までの広範囲な光子生成と利用  
高エネルギー非弾性散乱を用いたスピンエレクトロニクス  
MeV-ガンマー線: 元素起源の解明(天体核物理)、ハドロン核物理(核準位のパリティ混合比の測定)  
GeV-ガンマー線: クォーク核物理  
二次生成粒子(陽電子、中性子)の利用: 陽電子ビームによる微小格子欠陥の診断
- その他: sase-FEL、エネルギー回収型リニアック(ERL)等次世代X線光源に関連した技術開発**  
エクセス線ハンドリング技術の開発、高精度光学素子の開発、時分割測定手法の高度化等

### SPring-8の30m長直線部3本を含めた15本のビームラインの有効活用と次世代光源への展望

真空紫外・軟X線の利用、産業利用等での利用拡大、緊急性等に関しては、加速器施設研究者と利用研究者間で問題の共有化を図ることで対応が可能。

今後、第三世代の到達性能と、超伝導等加速器科学とX線FELの進展、および利用の動向と緊急性を考慮しつつ次世代光源を策定する。



# SPring-8の高度化の概要

## 1. 高輝度化・高空間干渉化

### a) Round beamの生成

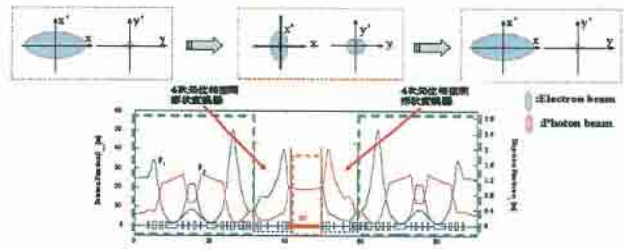
30m長直線部に設置した4次元位相空間形状変換器でほぼ回折限界の垂直方向のエミッタンスを水平方向に局所的に割り振ることで高干渉性と高輝度化を実現する。位相空間面積:

0.3nmrad×0.3pmradと33pmrad×33pmradは等価

現在、実現に向けて計算機シミュレーションを実施中、建設費はリングの改造とビームラインの新設で10億程度

### b) 低エネルギー運転

エミッタンスおよびエネルギー分散がそれぞれビームエネルギーの二乗および1乗に比例することを利用して低エネルギー運転で高輝度化を図る。次世代光源のERLと、干渉度と利用できる干渉光束(coh-flux)を比較したものが右表で、TCFはERLに較べないし2桁ほど低いが、ビーム電流が1桁高いため、10keVのX線で干渉光束は、8GeV運転でERLの10分の1、4GeV運転ではほぼ同水準となる。今後蓄積エネルギー短時間での切り換えや周期長のより短い超伝導電磁石型のアンジュレータ等の開発が課題

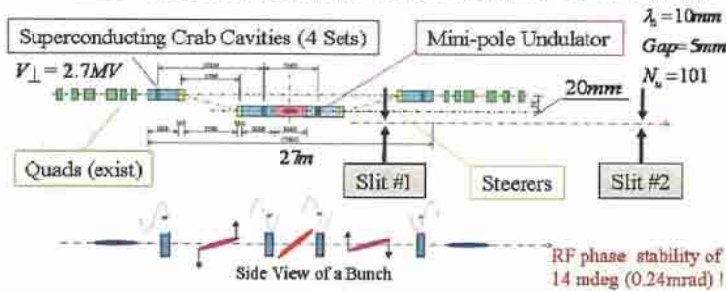


干渉度(二次元干渉性(TCF),1次元(VCF)と干渉光束(coh-flux)の比較

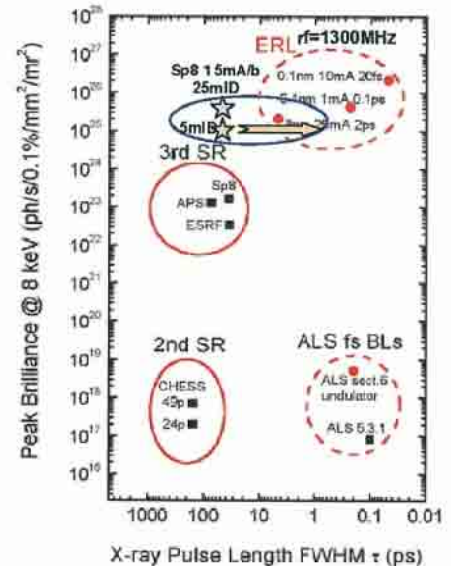
| 10keV-X線                  | TCF    | VCF | coh-flux |
|---------------------------|--------|-----|----------|
| SPring-8 (100mA)          |        |     |          |
| 8GeV(3nmrad,3pmrad)       | 0.0015 | 0.5 | 0.15     |
| 4GeV(0.75nmrad,0.75pmrad) | 0.01   | 0.8 | 1        |
| Cornell-ERL(10mA)         |        |     |          |
| 5.3GeV(15pmrad,15pmrad)   | 0.15   | 0.4 | 1.5      |

## 2. 短パルス高強度X線の生成

ERLに匹敵するピーク電流と世界最小の垂直エミッタンスを生かし、30m長直線部に設置した2台の超伝導crab空洞を用いてパンチの進行方向の時間情報を垂直方向の位置情報に変換し、中央部に設置したアンジュレータからの準単色X線をスライスすることでサブピコ秒の高強度短パルスX線(右図参照)を生成する。アンジュレータを通過した電子ビームは下流側の2台のcrab空洞で逆変換され初期状態に戻もどされ周回する。(下図参照)



平均光束はスライスする幅にもよるがFWHMで2psの場合で $10^{10-12}$  p/s程度となり、レーザースライスの $10^5-6$ 倍以上の高い光速が期待される。現在crab空洞(KEKで開発)やrfタイミング制御システムの検討が進められており、建設費用はヘリウム液化システム、建物等を含め概算30億程度



X-ray Pulse Length FWHM  $\tau$  (ps)  
By Qun Shen (CHESS)  
April 14, 2004

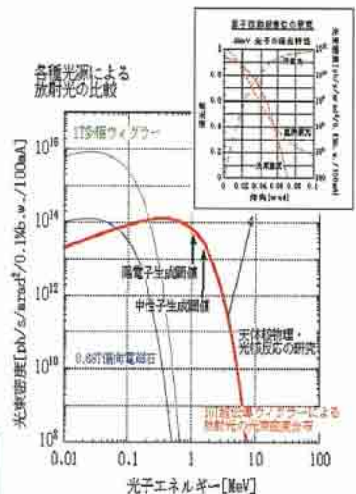
## 3. 高エネルギーX線・ $\gamma$ 線の生成と利用

### a) 大強度MeVX線の生成

8GeV電子ビームと10テラ超伝導ウイグラの融合することで数100keVからMeV領域で大強度で偏光特性を利用できるX線(右図参照)が世界で初めて利用可能。さらに、垂直方向のエミッタンスと軌道変動が小さいことから、分光器への浅い角度での入射が必須な高エネルギーX線の単色化も可能となる。現在、超伝導ウイグラーの実ビーム性能試験、高熱負荷対応機器等の開発、および利用分野の開拓等の作業が進行中である。建設費は加速器の改造とビームラインの新設を合わせて概算約10億

### b) 10から数10MeV領域の高強度ガンマ線の生成

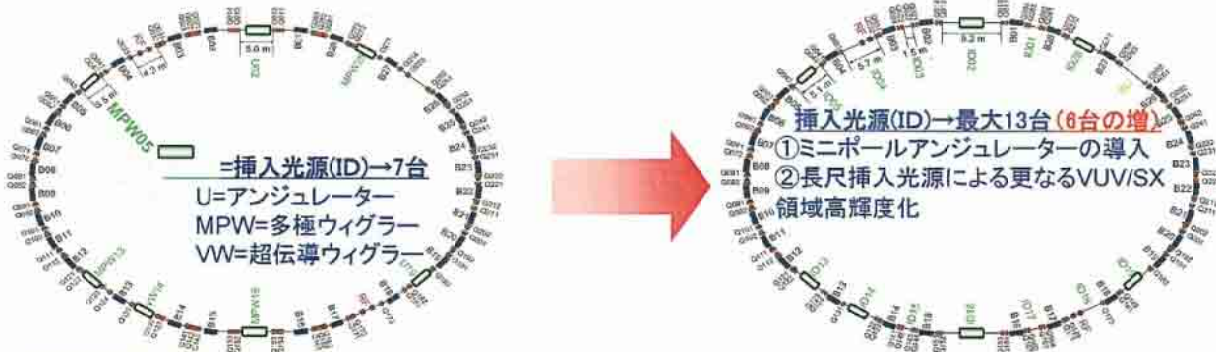
電子ビームのエネルギーが8GeVと高いこと、および運動量許容値が大きいことを利用して、レーザと電子の相互作用を利用して高強度 $\gamma$ 線を生成する。現在10MeV領域の $\gamma$ 線を生成するための大強度遠赤外レーザーの開発が順調に進み、電子ビームを用いた検証実験が進んでいる。また、LEPSの高強度化・高機能化も検討中



meVからGeVまでの全ての光子に関連した研究を可能とする光科学の拠点を目指して各種高度化が検討中

# PF次期放射光光源計画

PFの高度化(現在計画)→直線部増強計画



※高度化の狙い → ますます高度化・多様化する放射光利用研究に対応するため、PF光源加速器を改造し、第三世代の放射光源に匹敵する性能を「低コスト」かつ「短期間」で実現している。さらにトップ・アップ運転の導入等の改良を行い、今後5~8年程度の競争力を保つ。

5~8年後に稼動始める次期放射光源が持つべき機能は？

基盤的研究ツール(高輝度光源)と  
先端的研究ツールの両面性が不可欠

1) 試料は益々微小化  
(マイクロメートルから数10ナノメートル)

2) 詳細な電子状態解明  
(エネルギー分解能  
上:1meV→0.1meV)

基盤的ツールとしての  
高輝度光源

+

3) 結晶ではない試料の構造決定  
(コヒーレントX線が不可欠)  
(エミッタンス~10pmrad)  
4) 非平衡状態の解明  
(短時間パルス放射光が不可欠)  
(サブピコ秒以下)

先端的研究ツール

次期放射光光源の光の仕様

○VUV-X線領域をカバー  
(30eV-30keV(コア領域50eV-20keV))  
○輝度:  $10^{21}$ - $10^{23}$   
photons/sec/mrad<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>/0.1%B.W. @1-10 keV  
○コヒーレントフラクション:  
10~20% @ 10keV  
(現在のSPring-8では~0.2%程度)

○エミッタンス:  
10pmrad ~  $\lambda/4\pi$  @ 10keV  
○極短光パルス:  
~100fs  
○挿入光源ビームラインの数:  
~30本

## 次期放射光光源で夢開く研究分野

### 1. 極短光パルスの利用研究 (サブピコ秒光パルス)

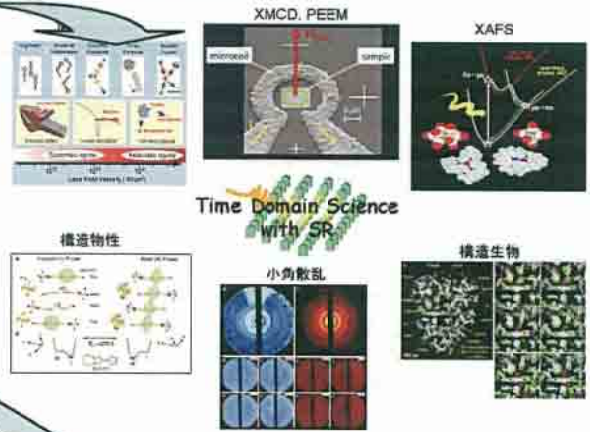
「非平衡状態からの秩序形成」、「スピンドYNAMIKSの解明」、「触媒科学、反応機構の解明」、「光誘起相転移現象の解明」、「生命科学の機能解明」、etc.

### 2. コヒーレントX線の利用研究

「結晶ではない物質、極微小結晶の構造決定」、「位相型X線イメージング」「スペックルによる秩序状態の解明」、etc.

### 3. マイクロビームからナノビームへ (~10nmφ)

「局所元素分析」、「局所構造評価」、「局所電子状態」、「顕微分光」、「光電子顕微鏡」、etc



### コヒーレンス・ナノビームの利用研究

生体高分子複合体や膜蛋白質のナノ結晶の構造解析に向けた輝度1000倍ナノフォーカスビームラインの必要性

|  |                                       |                                    |   |       |                         |       |                  |                                    |   |
|--|---------------------------------------|------------------------------------|---|-------|-------------------------|-------|------------------|------------------------------------|---|
| <p>標準的な結晶<br/>100nmオーダー<br/>(電子顕微鏡)</p>  | <p>微細な結晶<br/>10nmオーダー<br/>(X線結晶学)</p> | <p>微小結晶<br/>10nm以下<br/>(X線結晶学)</p> | <p>リング型放射光の境界への拡張<br/>超微小結晶<br/>ナノメートル<br/>タンパク質~100個<br/>かつ平行性の高いナノビーム</p> |       |                         |       |                  |                                    |   |
| <p>分子量</p>   |                                       |                                    | <p>超微小結晶や複合体等を測るためのナノ結晶のハンドリング<br/>マイクロハンドシステムやレーザーピンセット</p>                |       |                         |       |                  |                                    |   |
| <p>微小結晶サイズに最適化したナノビーム<br/>現状 (SPring-8) 目標</p> <table border="1"> <tr> <td>ビームサイズ</td> <td>10×10</td> <td>0.1×0.1 μm<sup>2</sup></td> </tr> <tr> <td>ビーム輝度</td> <td>10<sup>20</sup></td> <td>10<sup>21</sup>~10<sup>22</sup></td> </tr> </table> |                                       |                                    | ビームサイズ  | 10×10 | 0.1×0.1 μm <sup>2</sup> | ビーム輝度 | 10 <sup>20</sup> | 10 <sup>21</sup> ~10 <sup>22</sup> | <p>超微小結晶の超高精度設計<br/>超微小結晶100nm未満の超高精度設計</p> |
| ビームサイズ   | 10×10                                 | 0.1×0.1 μm <sup>2</sup>            |   |       |                         |       |                  |                                    |   |
| ビーム輝度  | 10 <sup>20</sup>                      | 10 <sup>21</sup> ~10 <sup>22</sup> |   |       |                         |       |                  |                                    |   |

|            |                    |
|------------|--------------------|
| 位相型ラジオグラフィ | 生体組織イメージング         |
| X線顕微鏡      | 組織イメージング           |
| X線コヒーレント散析 | 分子イメージング (顕微鏡・顕微鏡) |

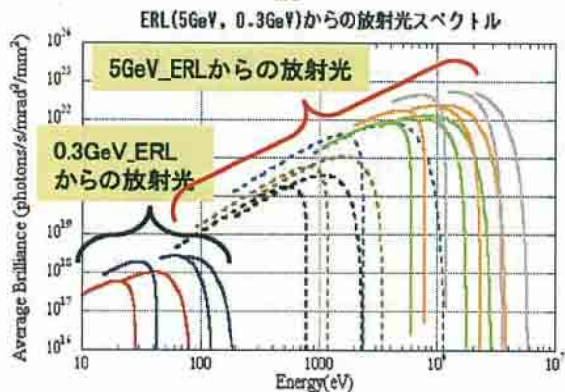
## 次期放射光光源としてERLを選択

ERLの鍵となる技術は電子銃の性能向上と超伝導空洞技術。

電子銃は5~8年後の稼動に向けて開発を進める。  
超伝導空洞の開発はKEK内でILCに向けた技術開発で進行中。

- すべてのビームポートで先端的な光源仕様を満足。
- 0.3GeVの実証機を用いてVUVのビームポートを整備。

5GeV ERLおよび0.3GeV ERLに適切なアンジュレーターを用いることで数10eVから数10keVまでの放射光を得る。





日本原子力研究開発機構

# ERL型次世代放射光源の提案

## ◆ 先進レーザー技術



フェムト秒超短パルス  
コヒーレント光  
高繰り返し、高出力化

## ◆ 先進加速器技術



超伝導加速器  
フェムト秒、高輝度電子ビーム  
エネルギー回収技術

## ◆ 高輝度放射光技術



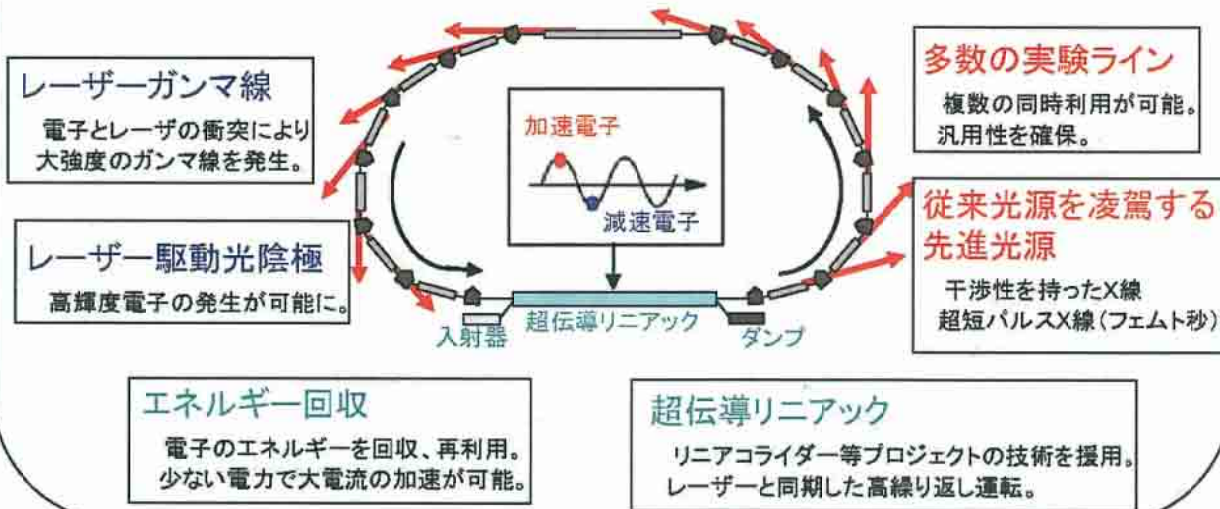
多数ユーザーの同時利用  
極めて高い安定性  
利用分野の拡大、実験技術の蓄積



## エネルギー回収型リニアック(ERL)次世代放射光源

従来の放射光と同等の汎用性を保ったまま、先進性を実現

XFELとは異なり、高い繰り返し(最大、毎秒10億パルス)でX線を発生 = 汎用性  
質の良い(干渉性のある)、短いパルス(フェムト秒)のX線を発生 = 先進性



## 原子力機構におけるERL研究開発

### ERL基盤技術の獲得

1987年、超伝導リニアックの開発をスタート  
2001年、ERLを完成  
ERLを使った赤外FEL実験を実施中



### ERL次世代光源へ

2005年、ERLグループ発足  
ERL次世代光源のR&D

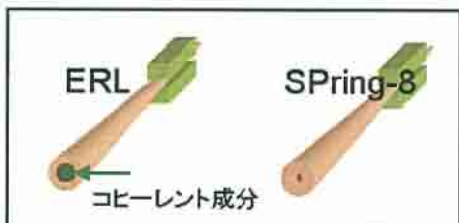


高輝度大電流電子銃

ERL基盤技術と経験を生かして、  
X線光源(5-6GeV ERL)の実現へ

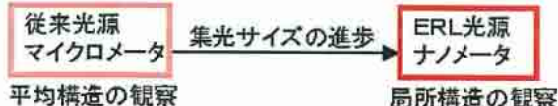
## ERL放射光の特長(1) = コヒーレントX線、ナノビーム

極小電子ビームからの放射光  
点光源 = コヒーレント光



ERL放射光は、コヒーレント成分を多く含み、レーザーと同様の干渉性の特徴を持つ。ホログラフィーなど干渉利用実験が可能に。

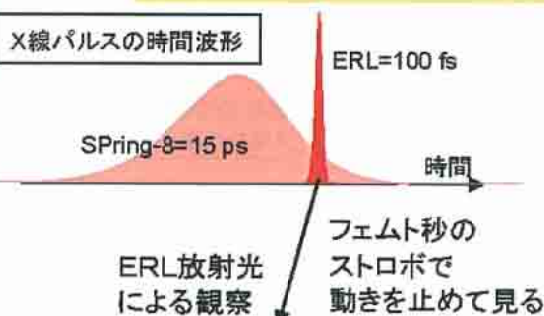
極小スポットへの集光が可能に



ナノテクノロジーの大きな武器  
ナノサイズ局所構造の観察

## ERL放射光の特長(2) = 超短X線パルス(フェムト秒)

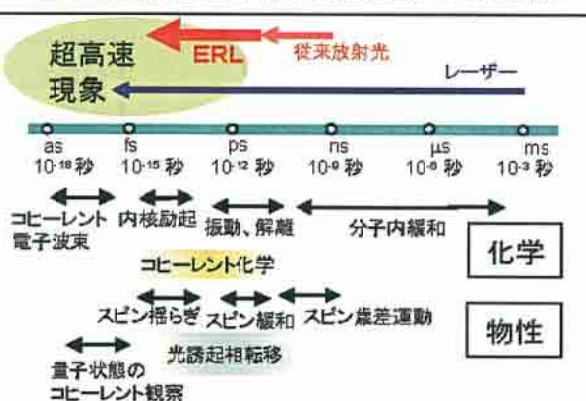
X線パルスの時間波形



ERL放射光による観察  
化学反応、物質のダイナミクス

有害物質除去のための新しい触媒の開発、超高速動作可能なスイッチングデバイスの開発など。

超高速現象を解き明かす、超短パルス光源



## 海外におけるERL研究開発

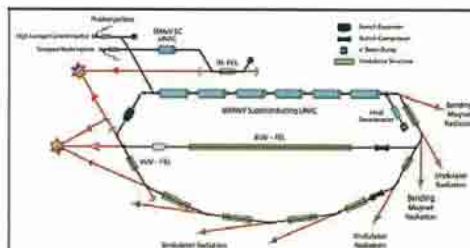
米国: コーネル大学、5GeV-ERL

既設放射光のアップグレードとしてERL光源の計画  
高輝度、大電流入射器建設中、2004-2007年  
入射器の予算 = \$18M (20億円)



英国: ダーズベリー研、0.6GeV-ERL

DIAMOND 放射光施設を補完する波長領域、  
XFELを組み込んでいる。(VUVから軟X線)  
プロトタイプ建設中: £14M (28億円)、2003-2006年



# UVSORの現状と将来

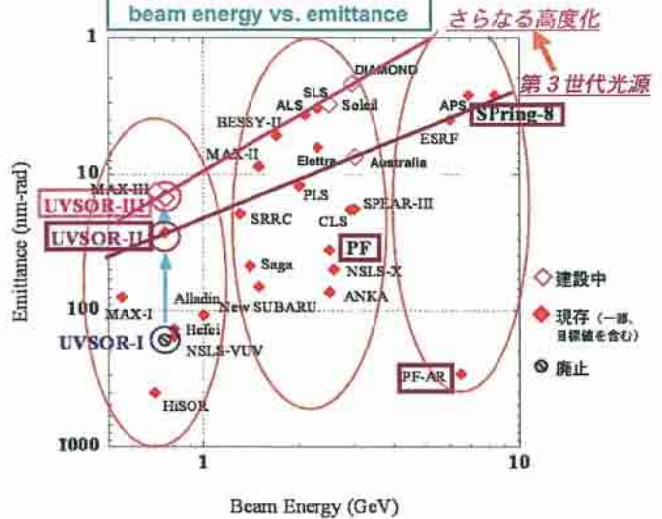
## UVSOR-II 以前

- UVSOR光源加速器のレイスはChasman-Green型といって直線部を多数持っているいわゆる第3世代高輝度(低ミッタンス)光源の基本形になっているが、1983年完成後20年間は典型的な第2世代光源における研究が中心で、専ら偏向電磁石からの放射光を利用して分子科学、物性科学、材料科学の研究が行われてきた。
- 世界的に第2世代光源から第3世代光源が主流となり、直線部に挿入したアンジュレタの高輝度性を利用した研究にシフトしている中で、5年ほど前からUVSOR光源加速器を本来のアンジュレタ中心の第3世代高輝度光源として強化し直す高度化の検討が始まり、平成14年度にはその予算が認められた。

## UVSOR-IIの現状

- 平成14年度(2003年)に実施した光源加速器の大改造による高輝度化(低ミッタンス化)、アンジュレタ対応直線部の増強、高周波加速空洞の増強等によりUVSORはUVSOR-IIへと生まれ変わり、電子ビームエネルギー1GeV以下の小型放射光源として今や世界で最も高輝度な光源となった。
- 現在、アンジュレタビームラインを順次建設しており、世界最高分解能軟X線発光分光や1meV分解能光電子分光など、世界的に見ても競争力のある高分解能分光研究を重点化しつつある。
- 偏向電磁石部からの放射光は小分けにせず200mrad以上の水平分散光をすべて集め、UVSOR施設が最も得意とする低エネルギー領域で既存ラインの統廃合を進めている。すでに赤外・遠赤外(テラヘルツ)分光ラインは世界で最強となっている。

## UVSORの位置付け



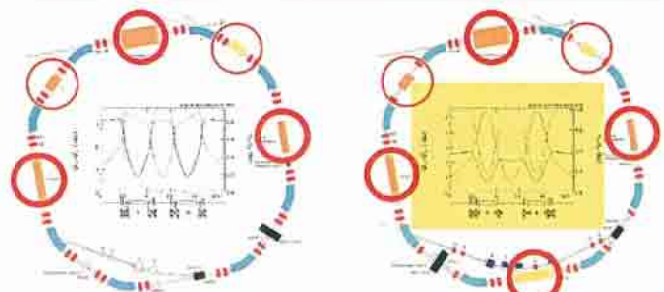
## UVSOR-II以降の計画

- 今後も世界最高性能の光源性能を維持・強化していくため、①トップアップ運転(電流値350mA・寿命6時間程度から電流値500mA一定へ) ②レイス再改造によるさらなる低ミッタンス化(現27nmradから15nmradへ) ③加速器再配置による直線部増強(アンジュレタ挿入可能な4mの長直線部4ヶ所、1.5mの短直線部2ヶ所)を実現し、次世代光源UVSOR-IIIへステップアップする。これによって真空紫外領域から~500eVの軟X線までbrillianceが現在の $\sim 10^{17}$ レベルから $\sim 10^{18}$ レベルに向上する。
- UVSOR施設の特徴である新しい光発生法に関する開拓的研究: ①世界に誇る波長可変円偏光自由電子レーザーでの最短波長とパワーを215nm 0.1Wクラスから200nm以下1Wクラスまで高度化、②コヒーレントテラヘルツ光の実用化など、をさらに推進する。



・1日12hr、年間2500~3000hr運転  
・年間600~800名利用(のべ)

\* 現在、24hr 500mA Top-up 運転に向けて  
・0.75GeV 7<sup>th</sup> エネルギ - 入射化(進行中)  
・放射線遮蔽増強(進行中)



0.75 GeV  
27nm-rad → 15nm-rad  
24hr 500mA Top-up

・全ての長直線部をアンジュレタ用に入射路移設、一部収束電磁石撤去  
・更なる低ミッタンス化  
複合機能型偏向電磁石導入  
・低XYカップリング化(→1%)  
・軌道安定性向上(<数μm)

# 広島大学放射光科学研究センター (HiSOR)

## 経緯と現状

- H7 学術審議会加速器科学部会ヒヤリング
- H8 放射光科学研究センター (学内共同利用施設) 新設
- H10 放射光利用開始
- H13 アンジュレータビームライン本格稼働  
(高分解能低温光電子分光)  
第13回日本放射光学会 (広島大学)
- H14 放射光科学研究センター (全国共同利用施設) 新設
- H17 特別教育研究経費 (拠点形成)  
「放射光ナノサイエンスの全国展開」

### 【教職員】

|                       |    |
|-----------------------|----|
| 教員 (内 外国人教員 (客員Ⅲ種) 1) | 9  |
| 講師 (研究機関研究員)          | 5  |
| 客員教授・助教授 (I種、II種)     | 3  |
| センター研究員 (内 客員研究員 12)  | 43 |
| 技術職員                  | 2  |
| 研究支援推進員               | 1  |
| 事務職員                  | 2  |

## 全国共同利用

- ◆全国共同利用に供するビームライン  
アンジュレータビームライン 2  
偏向電磁石ビームライン 6
- ◆国際共同研究  
・日本学術振興会拠点大学交流事業  
(高エネルギー加速器研究機構・中国科学院)  
放射光科学に関する共同研究  
・国際共同研究  
米国、ドイツ、ロシア、ベルギー、ポーランド、韓国、中国
- ◆研究分野  
・固体物理学を中心とする物質科学研究  
及び生命科学の基礎研究  
・放射光ナノサイエンス



## 研究成果

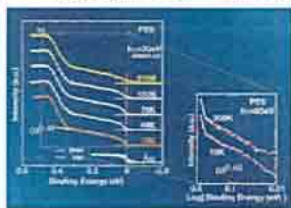
### 光電子分光

高いエネルギー分解能、運動量分解能、及び放射光エネルギー可変性を活用

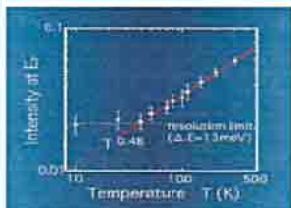
#### 研究成果1

朝永ラッティンジャー液体の直接観測  
— 数 meV の分解能で検証 —

1次元電気伝導体 (カーボンナノチューブ)  
強い電子相関 Fermi 端の消失



状態密度  
 $I(\omega) \propto \omega^\alpha$   
 $\alpha = 0.46 \sim 0.48$



フェルミ端強度  
 $I(E_F, T) \propto T^{-\alpha}$



カーボンナノチューブの  
電子構造解析 (首都大学  
東京との共同研究)

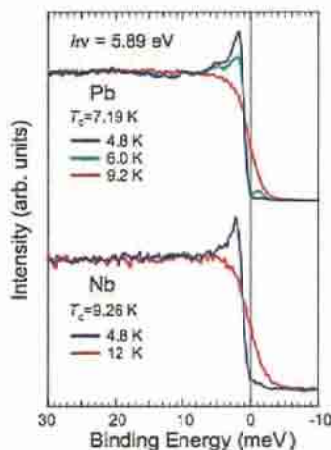
Nature 426 (2003)

#### 研究成果2

世界最高レベルのエネルギー分解能  
— 分解能 meV から  $\mu\text{eV}$  へ —

エネルギー分解能 約  $600 \mu\text{eV}$   
(到達温度 4K) ( $@h\nu \sim 8\text{eV}$ )

レーザーに匹敵する分解能を達成  
さらに励起エネルギー可変  
(電子状態の分離観測に本質的)



光電子のエネルギー分布

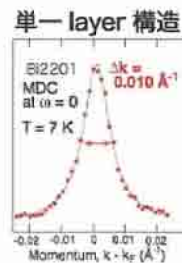
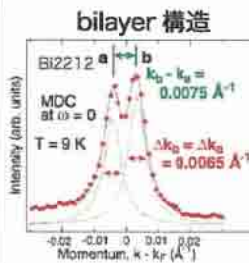
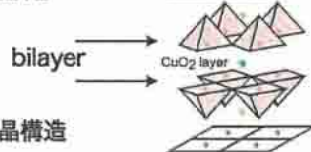
#### 研究成果3

世界最高レベルの運動量分解能  
— 高温超伝導体の研究 —

運動量分解能  $4 \times 10^{-3} \text{\AA}^{-1}$  ( $@h\nu \sim 8 \text{eV}$ )

"bilayer splitting" の直接分離による  
分裂エネルギーの定量評価

高温超伝導体  
Bi2212



光電子の運動量分布

## 将来計画

- 可視から紫外域の大強度放射光の重点利用
- 固体物理学を中心とする革新的物質科学研究
  - ・高精度電子構造解析 : 3次元電子構造の完全決定
  - ・偏向特性解析 : スピン軌道秩序の決定
  - ・スピン偏極光電子分光によるスピンの直接観測 : 表面・超薄膜の磁性
  - ・挿入型光源の増強 : 光源—観測システム一体化による先端研究推進



## 海外の主な放射光施設 (所在地)



## 海外の主な放射光施設(1/2)




[3極を成す日米欧の第3世代大型放射光施設]

|                             | ESRF<br>European Synchrotron Radiation<br>Facility                                  | APS<br>Advanced<br>Photon Source  | SPring-8  |
|-----------------------------|---|---|---|
|                             |  |  |  |
| 所在地                         | グルノーブル (フランス)   | アルゴンヌ (米国)  | 播磨科学公園都市 (兵庫県)  |
| 設置者 / 運転機関                  | 欧州18ヶ国  | DOE   | 理研 / JASRI  |
| 電子エネルギー                     | 6 GeV   | 7 GeV   | 8 GeV   |
| 蓄積電流                        | 200 mA  | 100 mA  | 100 mA  |
| 施設規模<br>(蓄積リング周長)           | 844 m   | 1,104 m   | 1,436 m   |
| ビームライン本数<br>(稼働本数 / 最大可能本数) | 41 / 56   | 48 / 68   | 46 / 62   |
| 利用開始年                       | 1994年   | 1996年   | 1997年   |
| 年間運営費<br>(2002年度日本円換算)      | 95億円 (72MEuro)  | 96億円 (89M\$)  | 110億円   |
| 年間ユーザー時間数<br>(2003年度実績)     | 5,275 時間  | 4,960 時間  | 3,930 時間  |
| 年間利用者数<br>(2002年度のべ人数)      | 4,802人  | 6,135人  | 9,112人  |
| 論文発表数<br>(共用開始7年目)          | 878編  | 655編  | 424編  |

## 海外の主な放射光施設(2/2)

### [軟X線領域の第3世代中型放射光施設]

|                      | ALS<br>Advanced Light Source  | CLS<br>Canadian<br>Light Source   | BESSY II   | SLS<br>Swiss Light Source   |
|----------------------|---|---|--|---|
|                      |  |  |  |  |
| 所在地                  | アメリカ  | カナダ   | ドイツ  | スイス   |
| 設置者/運転機関             | カリフォルニア大学   | CLSI<br>Canadian Light<br>Source Inc.   | BESSY<br>Berliner<br>Elektronenspeicherring-<br>Gesellschaft m.b.H.                | PSI<br>Paul Scherrer Institute  |
| 電子エネルギー              | 1.9 GeV   | 2.9 GeV   | 1.7 GeV  | 2.4 GeV   |
| 管電流                  | 400 mA  | 500 mA  | 600 mA   | 400 mA  |
| ビームエミッタンス*           | 6 nm rad  | 18.2 nm rad   | 6.1 nm rad   | 5 nm rad  |
| 施設規模<br>(管線リング周長)    | 197 m   | 171 m   | 240 m  | 288 m   |
| ビームライン本数<br>(最大可能本数) | 50  | 40  | 70   | 33  |
| 利用開始年                | 1993年11月  | 2005年5月   | 1998年  | 2001年10月  |

|                      | SOLEIL  | Diamond   | PLS<br>Pohang Light Source   | Australian Synchrotron  |
|----------------------|---|---|--|---|
|                      |  |  |  |  |
| 所在地                  | フランス  | イギリス  | 韓国   | オーストラリア   |
| 設置者/運転機関             | SOLEIL company  | Diamond Light Source<br>Ltd.  | Pohang Accelerator<br>Laboratory   | ビクトリア州政府  |
| 電子エネルギー              | 2.75 GeV  | 3 GeV   | 2.5 GeV  | 3.0 GeV   |
| 管電流                  | 500 mA  | 300 mA  | 182 mA   | 200 mA  |
| ビームエミッタンス*           | 3.7 nm rad  | 2.74 nm rad   | 13 nm rad  | 7.4 nm rad  |
| 施設規模<br>(管線リング周長)    | 354 m   | 562 m   | 281 m  | 164 m   |
| ビームライン本数<br>(最大可能本数) | 24  | 30-40   | 32   | 30  |
| 利用開始年                | 2006年春頃(予定)   | 2007年1月(予定)   | 1994年9月  | 2007年1月(予定)   |

- これらの他、MAX-IV(スウェーデン)、ELETTRA(イタリア)が稼働しており、LLS(スペイン)、MAX-III、MAX-IV(スウェーデン)、SSRF(中国)、SESAME(ヨルダン)などの計画がある。
- SPring-8のエミッタンス = 6.6nmrad

## 参考資料11

### 用語解説 (五十音順)

#### アンジュレーター

挿入光源の一種。周期的磁場によって電子ビームを小さく蛇行させ、蛇行の都度発生する放射光を干渉させることにより、極めて明るい特定波長の光が得られる。

#### 遺伝子発現

遺伝子の情報に従ってmRNAが作られ、それによってポリペプチド（アミノ酸が鎖状に連なったもの）の合成が起こること。生体内での遺伝子活動を表す遺伝子発現プロファイルを測定しデータベースとして保存することにより、例えば、特定の臓器のプロファイルの経時的な変化から、病気の超早期診断が可能となる。

#### ウィグラー

挿入光源の一種。電子ビームを複数回大きく蛇行させることにより、より明るく波長の短い白色光が得られる。蛇行させる磁場を強くすると得られる光の波長が短くなることから、超伝導電磁石を使用するウィグラーも多数ある。

#### X線

電磁波の一種で紫外線より波長の短いものをいう。一般的には0.001～0.2ナノメートルの波長域にあるものを指すが、分野によっては10ナノメートル域でもX線と呼ぶ場合もある。

X線のうち特に波長の短いものを硬X線という。また、上記より波長の長いものを軟X線という場合もある。ただし、硬X線や軟X線の範囲については分野によって様々である。

硬X線はガンマ線と波長領域が重なるが、発生機構により区別される。物質中の電子の状態変化に起因するものがX線であり、原子核の状態変化に起因するものがガンマ線である。

X線は、蛍光作用、電離作用、写真作用により検出することができ、材料や構造物の非破壊検査、医療診断用X線写真、結晶構造解析などの手段として利用される。

## X線自由電子レーザー

自由電子レーザーとは、自由電子（原子核に拘束されていない電子）を媒質として発振するレーザー光、またはそれを発生する装置をいい、特にX線領域のレーザー光を発振する自由電子レーザーのことをX線自由電子レーザーという。

光速近くまで加速した電子ビームをアンジュレーターの交替磁場中で蛇行させると、蛇行する度に発生する放射光同士が干渉し合い、ある特定の波長にピークを持つ高輝度でコヒーレントの高い放射光が発生する。この放射光と電子ビームが干渉し合うことで誘導放射が引き起こされ、非常に高輝度のレーザーが発生する。

従来、アンジュレーターの前後に対向する鏡を設置して放射光を繰り返し反射することで電子ビームと干渉させていたが、この方式では、鏡による反射率が確保できる波長100ナノメートル以上の光に限定される。近年、鏡を使用しない自己増幅自発放射（SASE）方式が発案され、この方式に基づいてX線自由電子レーザーの実現に向けた開発が世界的に進められている。

自由電子レーザーは、発振波長が可変であることやレーザー光への変換効率が高いことから、医学、化学産業分野等への応用が期待されている。

## エネルギー回収型リニアック

線形加速器（リニアック）によって光速近くまで加速した電子ビームを、一度のリング周回後に再び線形加速器に導いてエネルギーを回収し、そのエネルギーを新たな電子ビームの加速に用いる方式のこと。

この方式では、加速に要する電力がほぼゼロになり、超伝導線形加速器による大電流加速の場合でも消費電力を低く抑えることが可能となることから、放射光の平均輝度の向上に適した加速方式として期待されている。

また、エネルギー回収型リニアックによる電子ビームが低エミッタンス性、短バンチ性を有することから、高コヒーレントかつ短パルスの光がX線領域を含む広い波長領域にわたって得ることが可能となる。電子ビームを再び線形加速器に導くまでの間に、偏向電磁石や挿入光源を多数設置することにより、高品質の放射光を多数のユーザーに同時に供給することが可能となる。

## エミッタンス

電子ビームの空間的広がりを表す物理量。ビームの品質を表すパラメータの一つで、ビームの断面積と発散する角度の積に対応する量である。エミッタンスが小さいほど細く平行度の高いビームであることを意味し、X線自由電子レーザーの実現に向けて、大電流かつ低エミッタンスの電子ビームを供給する電子銃の開発が一つの鍵となっている。

### 円形加速器

電磁石の磁場によって荷電粒子の軌道を曲げ、粒子運動の軌跡をほぼ円状に限定する加速器のこと。円状軌跡の1ヶ所または数ヶ所に加速空洞を置くことで、荷電粒子は周回するごとに加速される。

### 回折

光の波としての性質の一つ。物質に光をあてたときに、その物質の背後に光が回り込む現象をいう。

結晶などに光をあてて得られる回折像から結晶構造の解析を行うことができることから、Spring-8の放射光X線を用いたタンパク質分子の結晶構造解析が進められている。電子や中性子も波としての性質を持つことから、電子線回折法、中性子回折法などによる構造解析手法が確立されている。

### 加速管、加速空洞

高周波電力を投入し内部に高電圧を形成することによって荷電粒子を加速する装置のこと。

### 輝度

光源の明るさを、単位面積・単位時間・単位立体角当たりの光子密度で表したもの。パルス光の場合、最も明るい時の輝度（ピーク輝度）をもって光源の明るさを表す場合が多い。

### 逆コンプトン散乱

波長の短い光を電子にあてると、光のエネルギーが電子に渡され、電子が反跳を受け光の波長が長くなる。この現象をコンプトン散乱という。

逆に、電子のエネルギーが光に渡され、光の波長が短くなる現象を逆コンプトン散乱といい、強力なガンマ線を発生する手法として研究開発が進められている。

### 高温超伝導

超伝導とは、物質の温度を極低温に下げたときに電気抵抗がゼロになる現象のこと。超伝導になる温度が液体窒素の温度（絶対温度77K、マイナス196℃）程度以上のものを、特に高温超伝導という。

### 高加速勾配加速管

単位長さあたりの加速電圧が従来のものよりも高い加速管のこと。

従来のSバンド (2.85GHz) よりも高い周波数 (Cバンド (5.7GHz)) の高周波を用いることにより、従来の2~3倍の加速勾配をもつ加速管。加速勾配を大きくすることにより、加速器の小型化を可能にした。

### 光電子分光

放射光を物質に照射し、そこから飛び出してくる光電子を計測することで物質内部の電子状態を調べる手法のこと。

### 光電離

気体に光を当てたときに、気体分子から電子が放出されてイオンが生成する。これを光電離といい、これによって生じた電子とイオンで作られた気体を光電離プラズマと言う。極めて高い出力のレーザー光を空气中に照射した場合、光電離プラズマが形成されることが知られている。

### 光励起

光で、原子や分子系の特定なエネルギー準位の熱平衡状態から大きく偏らせる過程。これは、原子を特定のより高いエネルギー準位に上げ、中間の準位間で反転分布を作る結果となる。能動媒質をより高い周波数の光波で励起させて、光波の増幅や発振を得る方法。光ポンピングともいう。

### コヒーレンス

波の進む方向、位相 (波の山と谷の位置) が空間的、時間的にそろった状態が十分長く保たれている性質のこと。干渉性ともいう。多くの波が互いに重なり合って、強めあうことができる。コヒーレンスの高い光をコヒーレント光という。

### シーディング技術

シード光 (種光) を利用したレーザーの安定化技術のこと。自己増幅自発放射 (SASE) 方式で得られる光は、原理的にマルチモードであるが、シード光 (種光) を導入し、それを増幅するシーディング技術によって、シングルモードの出力安定性の高い光が得られる。

SASE光にシーディングが加わることによって、データの精密化が期待されるばかりでなく、X線自由電子レーザーの適用範囲をさらに拡大することが可能になる。

### 自己増幅自発放射方式 (SASE方式)

長いアンジュレーターを通る中で電子の軌道が蛇行するたびに放射された光が、前方の電子を加速あるいは減速することにより、発生波長に等しい間隔で電子密度の濃淡が生じ、強いレーザー光を発生させる方式のこと。

現状の高輝度放射光源では、振幅の小さい多数の光がランダムに発生しているが、SASE方式の自由電子レーザーにおいては、それらの光が重なり会うことによって、振幅の大きい単一の光が発生する。鏡による共振器を必要としないので、X線領域におけるレーザー光の発振が可能となる。

### 真空紫外線

光路を真空中に維持しないと通せない波長域（空気による吸収が顕著な波長域）の光を指す。

厳密な意味では0.2～180ナノメートルの波長領域を指すが、狭義では40～180ナノメートルの領域を指す。0.2～40ナノメートルの領域は軟X線ともいう。

2.3～4ナノメートルの波長領域の光は、水を透過することから、「水の窓」Water windowと呼ばれる。

### 真空封止型アンジュレーター

従来のアンジュレーターでは、交替磁場を作る磁石列を真空槽の外に設置していた。真空封止型アンジュレーターは、コーティング技術等の開発により、磁石列を真空槽内に設置することを可能にし、磁石間隔の制約を取り除くことに成功したアンジュレーターのこと。

磁石間隔を非常に狭くすることが可能になるため、短周期長の小さな磁石でも十分強い交替磁場が発生し、アンジュレーターの長さを非常に短くするとともに、X線レーザーを発振するために必要となる電子ビームのエネルギーを低く抑えることができ、施設全体のコンパクト化に貢献するものである。

本装置は、KEKで開発され、SPring-8において理化学研究所が実用化した純国産の技術である。

### スーパー・ストレージ・リング

スーパー・ストレージ・リングは、第3世代の放射光源の設計をベースとして、従来よりも周長を長くし、最適な電磁石配置をとることによって、低エミッタンスかつ大電流を実現し、更に、特別に設計した電磁石群によって局所的にエミッタンスを極めて小さくし、また超伝導クラブ空洞などによって電子ビームのバンチ長を短くする等により、一部ビームラインにおいて、高コヒーレントかつ短パルスの放射光を発生するもの。

少ない要素技術開発で、高品質の放射光を供給できるものと期待されている。

### スピン

原子や電子、素粒子が持つ量子力学的特性の一つで、磁気的な性質を表す。

### 赤外線

電磁波の一種で可視光線より波長の長いものをいう。700ナノメートル～1ミリメートルの波長域にあるものを指す。

### セルマップ

異なる元素で標識した複数の遺伝子発現量を同時に測定し、細胞単位での遺伝子発現量の分布や分子の動態を調べてデータベース化する「セルマップ」データベースが考案されており、病理に対する遺伝子レベルでの診断への応用が期待されている。

### 線形加速器

加速空洞を直線状に並べて荷電粒子を直線的に順次加速する加速器のこと。ビームの質の劣化をもたらす偏向部を持たないので、高品位電子ビームを供給できる。

### 挿入光源

挿入光源とは、偏向電磁石による放射光よりさらに質の高い光を得るために考案された装置であって、蓄積リングにおいては隣り合った偏向電磁石の間の直線部に「挿入される」ためにこのような名前がつけられている。

挿入光源には大別してアンジュレーターおよびウィグラーと呼ばれる2つの種類がある。これらのうち、特にアンジュレーターは非常に鋭い特定波長の光が得られるという利点があり、SPring-8をはじめとする第3世代と呼ばれる放射光施設は、アンジュレーターの設置に最適化した蓄積リングを有している。

### タンパク質

20種類のアミノ酸を基本ユニットとして、それらが結合して鎖状につながり、折り畳まれて立体的な構造を持った高分子化合物のこと。遺伝子の情報はアミノ酸の種類・順序を決めているに過ぎず、タンパク質の働きは立体構造と深い関係を持つことから、タンパク質の機能を解明するためには、立体構造を知ることが必要である。



タンパク質の立体構造の解析には、NMR（核磁気共鳴）や放射光などのX線が用いられる。NMRでは分子量の大きさに制約があるものの動きのあるタンパク質の構造決定が可能となる。一方、X線ではタンパク質分子の結晶化が必要となるが、巨大分子の解析も可能となる。

### 蓄積リング

電子、陽電子などの荷電粒子を、長時間、一定のエネルギーで周回軌道に蓄積するための円形加速器。放射光発生用に適した加速器の一つ。

### 中性子線

中性子は陽子とともに物質の原子核を構成する粒子で、そのビームを中性子線という。

中性子は電荷が無く、物質中の電子を通過して直接原子核と作用することから、X線では観測困難な物質中の水素の検出や同位体の観察に適している。

### 超伝導加速空洞

金属超伝導体を加工して作製した加速空洞、または空洞の内側に超伝導体をコーティングした加速空洞のこと。

通常の加速空洞は銅で作製されるが、高周波によって加速電圧を形成すると空洞内側に誘導電流が流れ、銅の電気抵抗によるジュール熱によって発熱するため、投入できる高周波のパワーが限られることになる。空洞内側を電気抵抗がゼロの超伝導体にすると発熱が抑えられるため、投入するパワーを大きくでき、より大電流の電子ビームを加速することが可能となる。

### 超伝導クラブ空洞

進行方向に細長く伸びた電子のバンチを横方向にキックしてカニのように横歩きをさせる空洞のこと。一般に空洞は電場を使って電子ビームを加速するものであるが、クラブ空洞は磁場によって横方向の力を加えるものである。

横歩きするバンチを進行方向から見ると、バンチの長さが短くなったように見えることから、短パルス放射光を発生させるための技術として期待されている。

### 電子銃

固体中の電子を熱や高電界によって空間に放出し、高電圧によって加速することで電子ビームを生成する装置のこと。電子銃において電子を放出する物質のことをカソード（陰極）という。

## 電子ボルト (eV)

素粒子、原子核、原子、分子などのエネルギーを表す単位。

1eVは、電気素量 $e$ の電荷を持つ粒子が真空中で電位差1Vによって加速される時に得るエネルギー。1eV=1.602×10<sup>-19</sup>J (ジュール)

加速器の加速能力を表す場合に用いられ、放射光科学の分野では、光のエネルギーも電子ボルトで表すことが多い。

## トップアップ運転

放射光実験にとって理想的なのは、高輝度の放射光が長期間にわたり安定に供給されることである。高輝度光を実現するには、電子を狭い空間に集め、高密度のバンチとして蓄積しなければならないが、このような高密度バンチ内では電子同士の反発が強く、電子ビームが散乱し蓄積電流が減少してしまう。

この現状を打開し長時間にわたり高輝度の放射光を供給するため、電子の損失分だけを継ぎ足して常に蓄積電流を一定に維持する方法が採られており、この運転方法をトップアップ運転という。

## トライアルユース

産業界等が抱える研究開発分野、応用開発分野等の問題のうち、SPring-8の高輝度放射光を利用することにより技術的ブレイクスルーが期待されるものを対象として、2003年度より実施している制度。地域産業活性化のためのイノベーション、新産業の創出を支援することを目的としている。

## ナノメートル (nm)

1ナノメートルは10億分の1メートル。1nm=10<sup>-9</sup>m

ほぼ原子の大きさに匹敵する。現在の電子デバイスでは、ナノメートルの領域を対象とする技術が使われており、これらの技術を総称してナノテクノロジーという。

## パルス

間欠的に発光する（点滅を繰り返す）光の一回の発光をパルスとよぶ。発光の持続時間をパルス長、またはパルス幅という。

## バンチ

加速された荷電粒子の一塊のこと。放射光源の場合、進行方向の長さがパルス幅に相当し、進行方向と垂直の断面積がエミッタンスに相当する。

## ビームライン

偏向電磁石や挿入光源で発生した放射光を、照射実験を行う実験ハッチまで導くための一連の装置群を総称してビームラインという。

ビームラインを構成する装置には、必要な幅で放射光を切り出すスリットや放射光の進行方向を変えると同時に、湾曲面を利用して集光を行うミラー、必要な波長の光だけを切り出す分光器、放射光の位置や強度を計測する各種モニターなどがある。

挿入光源を放射光の発生源とする場合、挿入光源も含めてビームラインと呼ぶことがある。

## 光誘起相転移

物質に僅かな光をあてただけで、物質を構成する原子や電子に新しい秩序が成長し、構造や物性の変化が生じることがある。このような現象を総称して、光誘起相転移という。

## フェムト秒 (fs)

1フェムト秒は1,000兆分の1メートル。1fs=10<sup>-15</sup>s

化学反応中の原子や分子の動きを捉えることができる時間領域。

## 偏向電磁石

荷電粒子の軌道を曲げるための磁場を形成する電磁石のこと。

## 放射光

ほぼ光速で進む電子の軌道を磁場によって偏向した際に、軌道の接線方向に放射される強い電磁波のことを放射光という。

物質の分析、反応、解析等のための画期的な手段として、材料科学、地球科学、生命科学、医療等の幅広い分野の研究への利用が期待されている。放射光源とは放射光を発生させる装置を指す。

## 膜タンパク質

タンパク質を存在環境から分類すると、水溶性タンパク質と膜タンパク質に分けられる。膜タンパク質は、細胞の内外をつなぐ情報のやりとりなど、生体内で重要な役割を果たしているが、生体膜という極めて疎水的な環境に存在するため、タンパク質そのものを安定に抽出することが難しく、X線結晶構造回折やNMRによる構造解析が困難である。

### 誘導放射

エネルギーの高い状態にある電子が同じエネルギーを持った別の光子に誘発されて光子を出す放射のこと。

あるエネルギー準位にある原子もしくは分子が低いエネルギー準位に電磁波を放出して移動するとき、それに等しい振動数の電磁波を外部から加えると、その加えた電磁波と同じ振動数を持ち、加えたエネルギー密度に比例した放射を放出する現象。

### レーザー

誘導放射の原理を利用して位相（光の波の山と谷）の揃った単色光を作り出す発振器。またはその発振器により発生する単色光のこと。語源はLight Amplification by Stimulated Emission of Radiationの頭文字をとったもの。

光通信・ホログラフィー・臨床医学、あるいは金属の切断など、幅広い分野に利用されている。