

量子ビーム利用推進小委員会

軟X線向け高輝度放射光源に関する中間的整理 概要

資料1-2
科学技術・学術審議会
先端研究基盤部会
量子科学技術委員会(第9回)

平成29年2月7日

- 世界的に軟X線向け高輝度光源の整備が相次いでいる状況等を背景として、量子ビーム利用推進小委員会において、次世代の軟X線向け高輝度放射光源やその利用について、平成28年11月より調査検討を開始。
- 本中間的整理は、内外の研究動向、施設動向、求められる性能等の技術的事項、我が国における政策的意義、その他上記に関連する事項について、整理したものである。

中間的整理のポイント

- 最先端のサイエンスは、物質の構造解析から物質の機能の理解へと向かっており、機能を理解するためには軟X線光源が非常に有用であり、様々な分野の研究及びイノベーション創出の飛躍的な進展が期待され、求められている。産業利用も大いに期待。
- このように科学技術イノベーション政策上の意義は高く、必要性は高まっており、また、科学的にも産業的にも利用価値の高い軟X線向け高輝度3GeV級放射光源の実現が技術的に可能となっていることから、我が国における利用環境の整備を推進することが必要。
- 世界的に見て我が国の軟X線利用環境は立ち遅れている状況であり、その早期整備が求められる。
- これまでの我が国における技術的な実績と経験から、世界レベルの先端性（エミッタンス1nm・rad前後）と安定性（実効性能での定常的運転）を両立し、かつ、コンパクトな3GeV級放射光源（周長325～425m程度）の整備が可能。
- 国の財政が厳しい折、軟X線光源は産業利用も期待されることから*、国だけでなく、地域や産業界の活力を取り込み、財源負担を含め、言わば官民地域パートナーシップにより推進することが、プロジェクトの実現や成功にとって重要。

※軟X線自体は既に広範に利用されており、軟X線向け高輝度放射光源は他の先端的光源・研究施設に比し、産業界の実利用が当初段階から想定される。

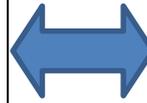
軟X線向け高輝度放射光源の科学技術イノベーション政策上の意義

- これまでの放射光研究は構造解析に重きが置かれていたが、高輝度軟X線では物質の機能に関わる電子状態を元素選択的に観測することが可能。(他物質との結合、反応、磁性等)

軟X線の特徴

- **軽い元素の分析**が得意で、**電子状態**まで良く見える【物質機能を現す電子の動的挙動や物性の解明等】
- **物質表面の分析**が主
例) 電池材料・タンパク質の機能解明、超微細な磁石材料の詳細解析
※我が国の各産業分野で利用されることの多い物質材料をカバーし、産業利用も期待

相補的



硬X線の特徴

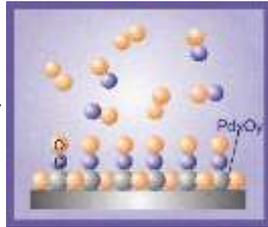
- **重元素の分析**が得意で、**構造解析**が主【物質の原子配列や結晶構造の解明等】
- **物質内部までの分析**が可能
例) タイヤ内部の分子構造の解明、磁石の研究

- 電子ビームの低エミッタンスにより、得られる放射光の輝度が高く(既存施設に比し100~1000倍)、局所領域を対象に様々な測定手法でより鮮明に観察できるため、以下の利点:
 - ✓ **1/100の時間で鮮明なデータ**が得られるようになり、例えば、既存施設で1時間要したタンパク質の分析が30秒で可能に。
 - ✓ 物質の反応等の速い時間変化も**100倍の時間分解能**でも鮮明に観察が可能。
 - ✓ さらに高いコヒーレンスにより、**10~100倍の高い空間分解能**(1~10nm)で局所領域の様々な観察が可能。(既存施設ではmm~0.1μm)
- これらにより、これまで観察が難しかった、**不均一で複雑な系の物質**(世の中でよく利用されている物質)やオペランド観測での反応中の物質の高度な計測分析を可能とし、様々な分野の研究及びイノベーション創出の飛躍的な進展が期待される。

期待されるインパクトの例

触媒化学

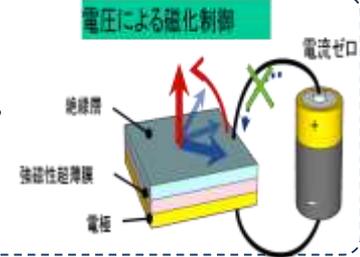
- ◆ 高輝度軟X線により、一部の重元素だけでなく、**ほとんどの触媒・反応・生成種**をトータルに観察し、**触媒反応のダイナミクス**の詳細解析が可能に。
- ◆ 自動車触媒等、様々な産業における、**触媒機能の学理に基づく新規触媒**の開発が期待。



光合成タンパク質の酸素発生中心の反応メカニズムを解明

磁性・スピントロニクス

- ◆ 高輝度軟X線により、**1~10nmスケールで超微細な磁石の磁区構造**の観察が可能に。
- ◆ データストレージやメモリの省エネ化や高感度磁気センサー等、**IoT社会を支える技術**開発の進展が期待。



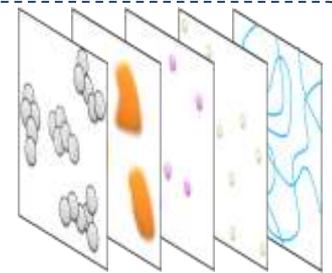
生命科学

- ◆ 高輝度軟X線により、軽元素のp軌道や遷移金属d軌道など、**タンパク質の機能に関わる電子状態の精密解析**が可能に。
- ◆ 電子論に立脚したタンパク質研究による**エネルギーや創薬分野への応用展開**が期待。



タイヤゴム材料

- ◆ タイヤゴム材料はポリマー、シリカ等の**10数種類以上の素材**から成る**非常に複雑な系**。
- ◆ 高輝度軟X線により、**ゴム材料の劣化機構を元素毎に詳細解析**することが可能になり、**飛躍的に材料開発が進展**すると期待。



※エミッタンス:電子ビームをどれだけ細く絞れるかを示す値。低いほど、輝度が高く、細く絞られた放射光を得ることが可能。

※コヒーレンス:波の持つ性質の一つで位相の揃い具合を現す。高いほど質の良い放射光であり、局所領域の観察が容易になり、試料の特別な調整が不要になるなどの利点がある。

※オペランド観測:動作中の触媒やデバイスの観測を行うこと。動的過程を分析することにより、動作中の反応の本質を理解することができる。

次世代放射光施設に係る国際動向

- SPring-8が生み出す放射光は、エネルギーが高い「硬X線」と呼ばれる領域の放射光。(同等性能の施設は、他に米国APS、欧州ESRFのみ。1990年代に建設。)
- 一方、2000年代に入り、エネルギーが低い「軟X線」と呼ばれる領域で、高輝度^{※1}の放射光を生み出す次世代の放射光施設の整備が海外で進んでいる。

※1 放射光の輝度が明るい=様々なものがよりっきりと見える。より微小な領域を、より短時間で、時間的な変化もより詳細に観察可能。

※2 硬X線では、物質内部までの分析が可能で、重い元素を捉える。【物質の原子配列や結晶構造の解明等に利用】

軟X線では、物質表面の分析が主だが、軽い元素が得意で、物質の機能を決める電子状態まで良く見える。【物質の電子の動的挙動や物性の解明等に利用】

【海外の軟X線向け放射光施設】



※3 エネルギー=電子を加速するエネルギー。SPring-8の8 GeVでは「硬X線」を中心とする放射光が発生。それより低いGeVでは「軟X線」を中心とする放射光が発生。

※4 エミッタンス=電子ビームをどれくらい細く絞れるかを示す値。エミッタンスが小さいほど、電子ビームが細く絞られ、生み出す放射光の輝度が向上。

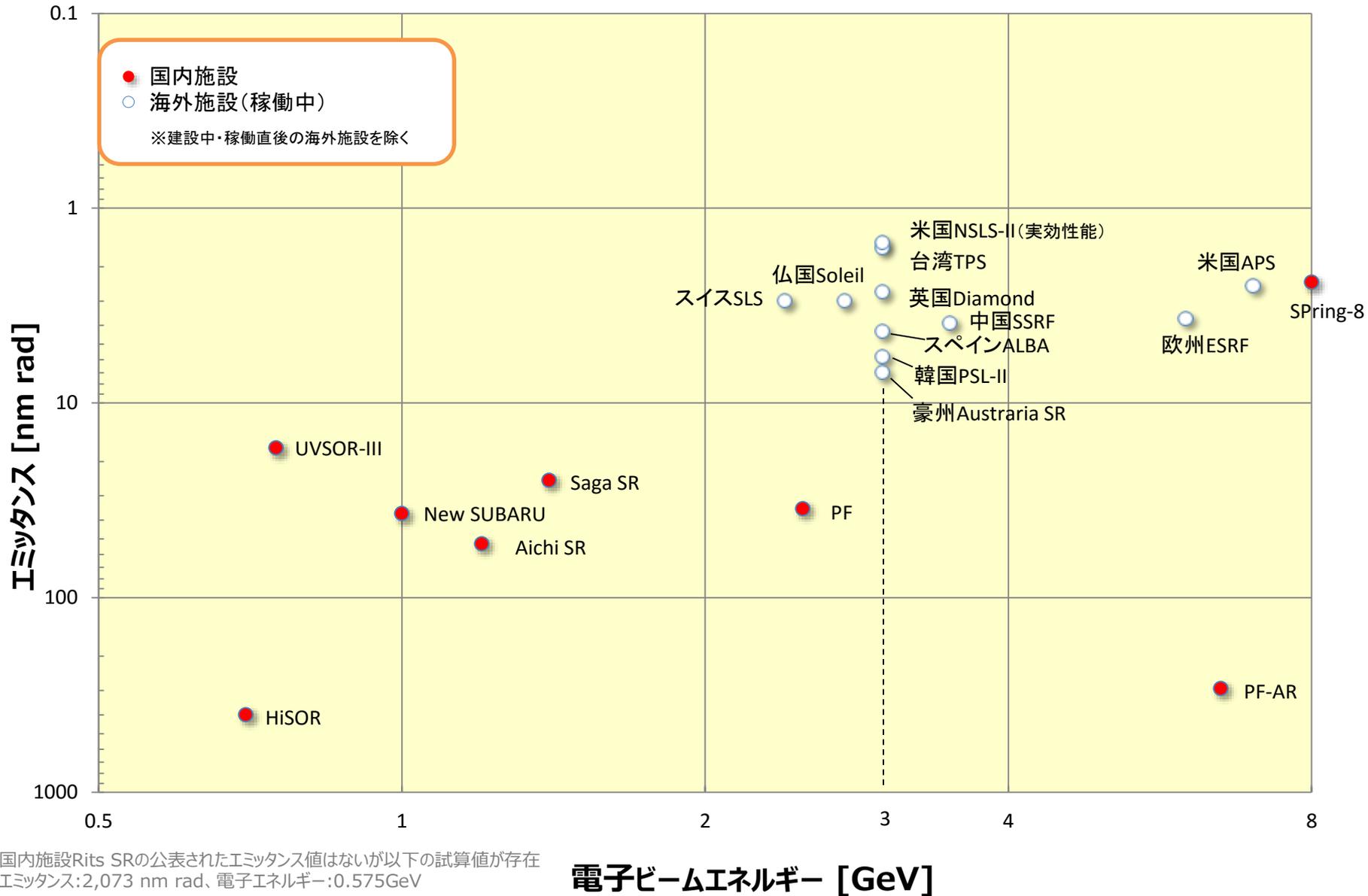
【更に新設が進む、海外の軟X線向け次世代放射光施設】



⇒ 硬X線向け施設と単純比較はできないが、SPring-8のエミッタンスは2.4 nm·rad。

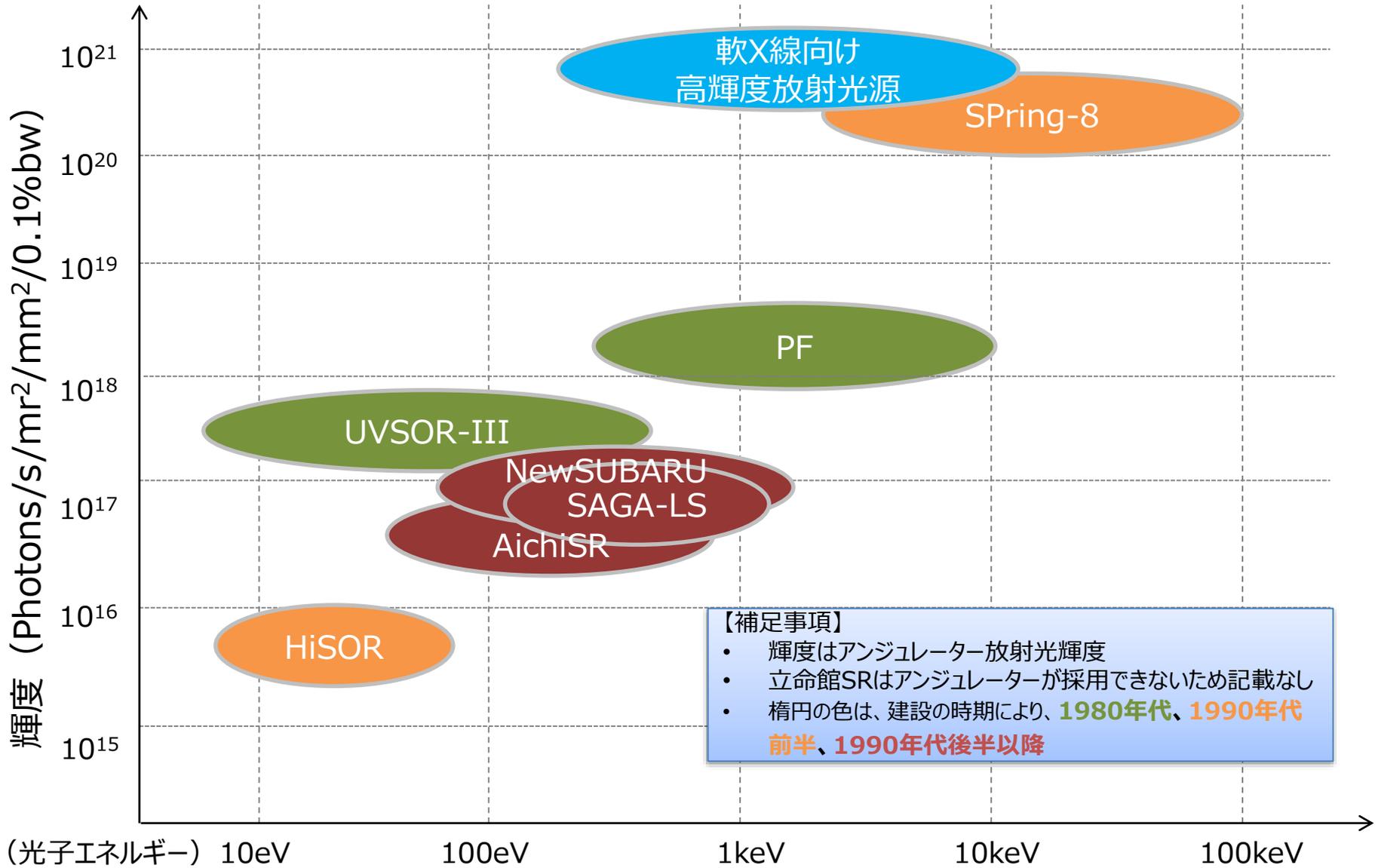
なお、硬X線向け放射光施設でも、欧州ESRF、米国APSでは低エミッタンスの高輝度化改造計画が進んでいる。

世界の放射光施設 — エミッタンス vs 電子ビームエネルギー —



我が国の放射光施設の得意とするエネルギー領域

(参考資料3)



真空紫外線

軟X線

硬X線