

第13回FC-Cubic オープンシンポジウム

SPring-8がつくる未来

理化学研究所 放射光科学研究センター
矢橋 牧名

2024年3月21日@SPring-8 SACLA大会議室

目次

1. SPring-8-IIの概要
2. DX・自動自律実験に向けて

SPring-8

Super Photon ring-8 GeVから
Solving-Problems ring-8 GeVへ



建設期間：1991年～1997年 供用開始：1997年10月

蓄積リング：電子エネルギー：8 GeV、周長：約1,500 m

2019年度 実施実験課題数：2,231件（産業界約20%） 利用者数：15,970人

2020年度 実施実験課題数：1,321件（産業界約20%） 利用者数：9,171人

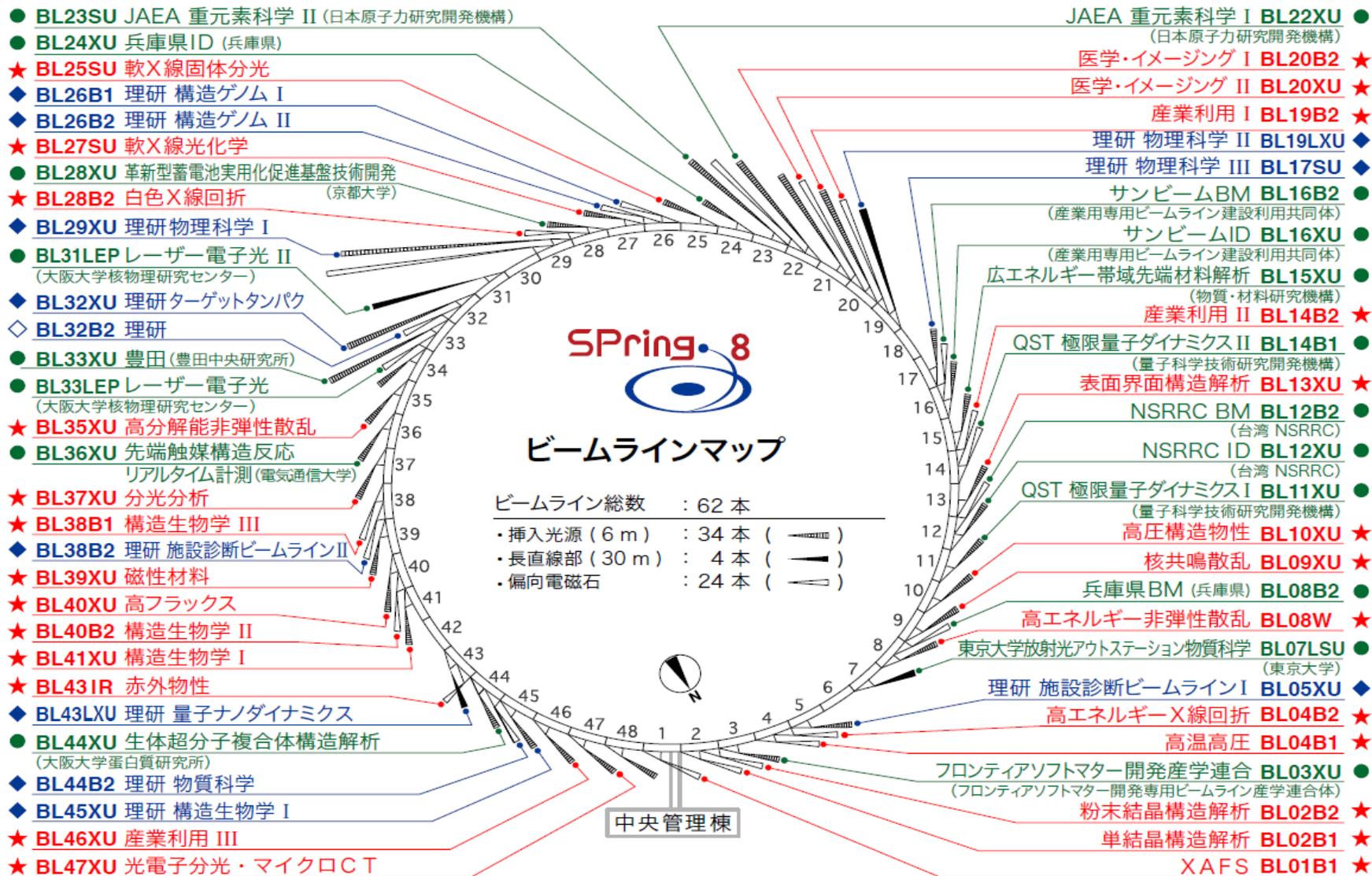
2021年度 実施実験課題数：1,950件（産業界約20%） 利用者数：13,480人

2022年度 実施実験課題数：2,143件（産業界約20%） 利用者数：14,794人

総累計利用者数：約30万人

★：共用ビームライン
●：専用ビームライン
◆：理研ビームライン

(注) ☆、○、◇：計画・調整、建設中



先端構造解析とシミュレーション研究から生まれた最高グレード低燃費タイヤ

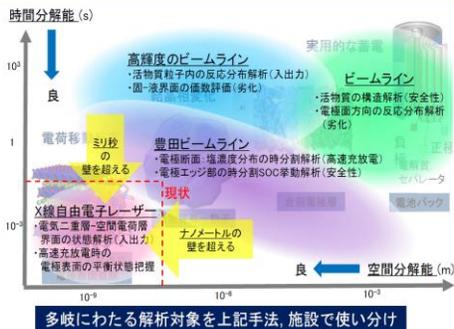


低燃費性能とグリップ性能を高次元で維持しながら耐摩耗性能を従来品から51%向上

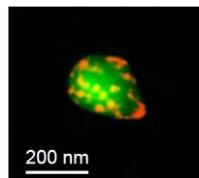
「2017年日経地球環境技術賞」最優秀賞

次世代の蓄電池開発

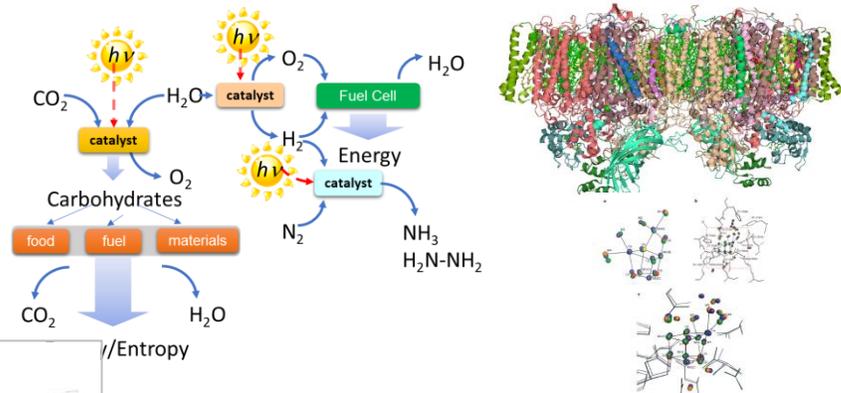
放射光と電池解析対象の位置づけ



SACLAによって、**固体電解質粒子内の結晶を無損傷で評価**



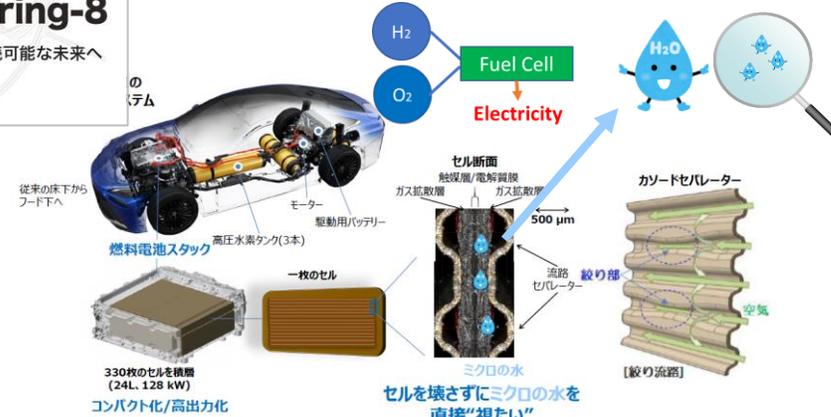
世界に先駆けたPSII構造・機能の解明



PSII分子の構造が、SPring-8とSACLAによって解明。反応機構もSACLAにより明らかに
人工光合成触媒の開発を加速



新型MIRAI燃料電池スタック



SPring-8の**世界最高性能の放射光**を使って、**ミクロンサイズの水の排出とガス拡散を促進する絞り流路形状による高出力化を検証**

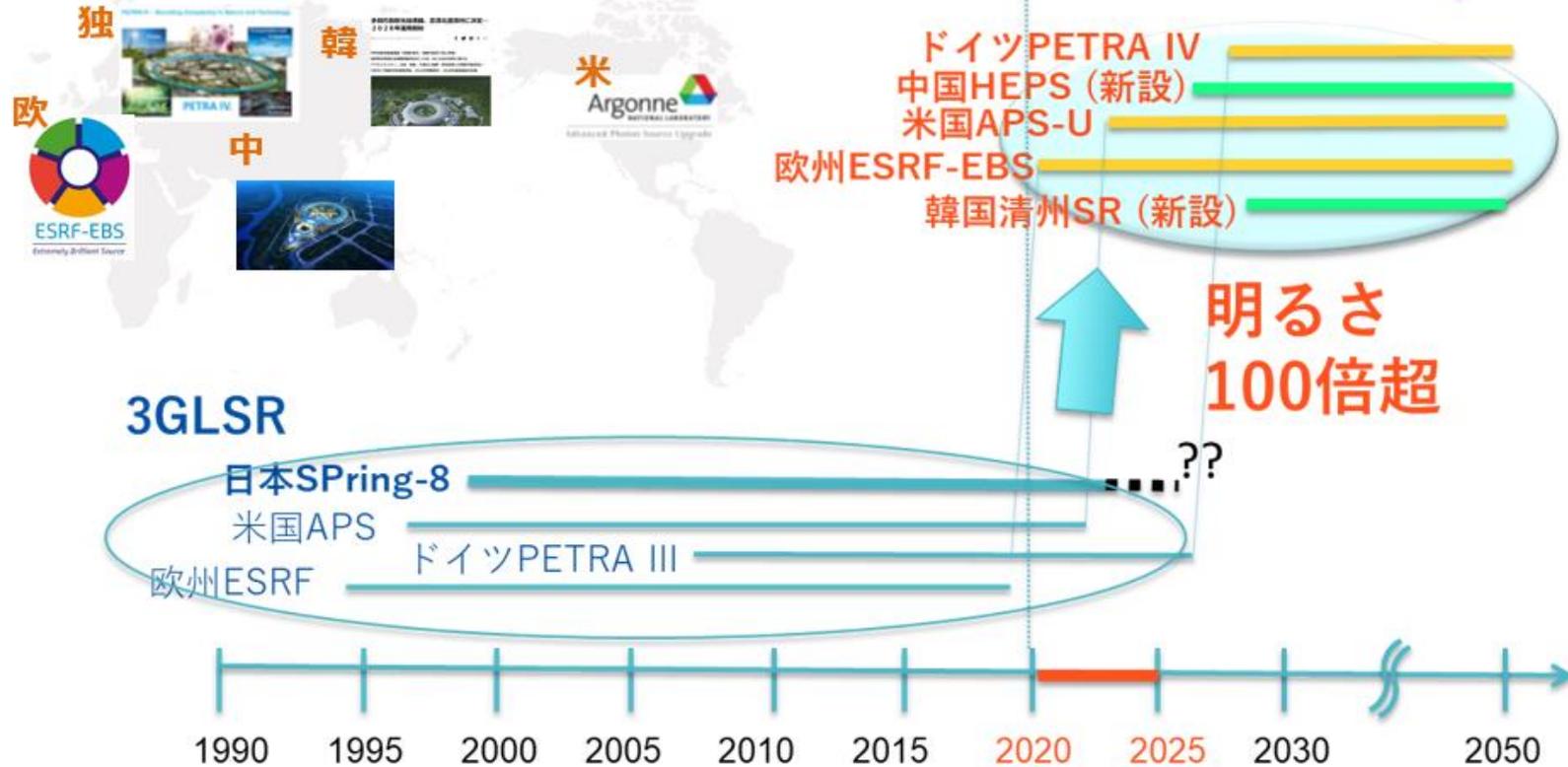
課題

- 利用者の声(特に産業界):「混み合っていて使えない」、「使えたとしても、待ち時間が長すぎる」・・・
- 蓄積リング本体の老朽化・光熱費の高騰による、安定運転への懸念
- 海外の分析能力の進展

国際情勢：第3世代(3G)から第4世代(4G)へ進化する大型放射光施設(LSR)

最先端の分析能力を保有し続ける → 国際競争力保持の「必要条件」に

2020年代には欧州、米国、ドイツの4GLSRへのアップグレードに加え、中国、韓国でも4GLSRが新設される。各国でイノベーションを長期にわたって支える体制が確立



なぜ今、研究加速か？



理化学研究所
五神真理事長

環境の激変

グリーン: 2050脱炭素化、循環経済への転換が国際的に浸透し、技術の大転換時代に突入

経済安全保障: エネルギー、半導体などのサプライチェーンリスクの顕在化

新型コロナ: データ駆動創薬、感染モニター管理、リモートワークなど、DX実装が加速

AIの革新: 生成AIによる、知の経済価値の再定義が急務

未来技術の早期到来: EUVリソによる先端半導体、計算科学の躍進と大規模基盤モデル、量子古典ハイブリッド、ミリ波からテラヘルツに到る大容量無線技術

最先端科学知見の社会導入が不可欠

社会は先端科学による研究加速を求めている

脱炭素、完全循環型社会、包摂社会の実現に資する行動
限界突破の基礎科学を推進する世界拠点の形成へ

➡ **先端科学の社会的インパクトを示す必要**

最近の動き

SPring-8の高度化に関する タスクフォース 報告書

2023年8月
SPring-8の高度化に関するタスクフォース



SPring-8-II シンポジウム
(2023/8/2)

SPring-8-II 特設サイト

<https://new.spring8.or.jp/index.php/component/content/article/829>

SPring-8-II計画

- SPring-8加速器・ビームラインのアップグレードを行い、消費電力を半減しながら、**100倍以上明るい高エネルギー放射光**を供給
- **2050年**までのイノベーション創出を支え続ける科学技術基盤
- 日本の**国力**の持続的発展に不可欠な共用資源(コモンズ)

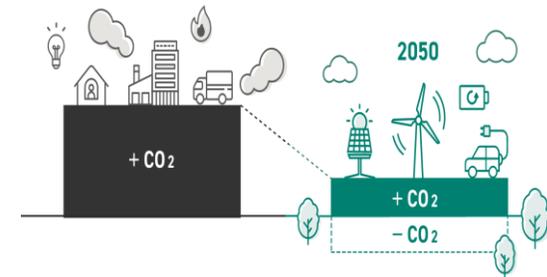
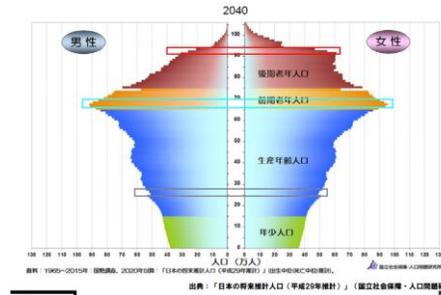
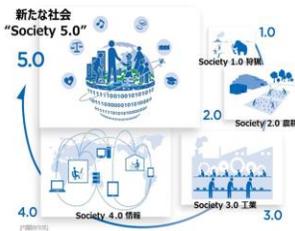
国家的重要課題と社会の要請に応え続けるSPring-8-II

Society5.0

経済安全保障 インフラ老朽化

2040年問題

カーボンニュートラル



2025

2030

2035

2040

2045

2050年

コアコンセプト

現状より100倍以上明るい世界トップ性能を、大幅な省エネと両立させ、省コストで実現

省エネ

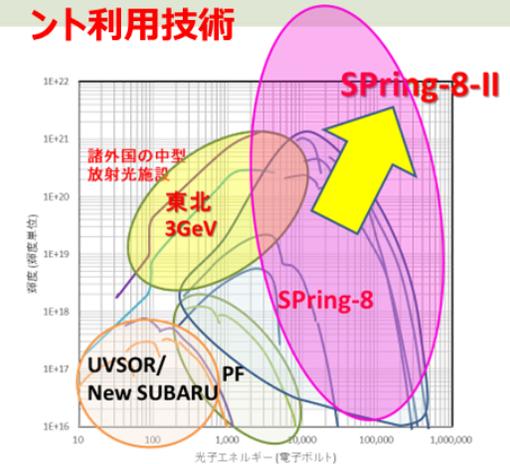
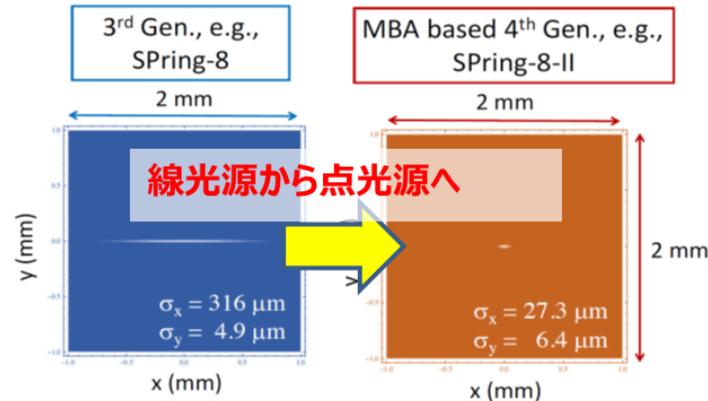
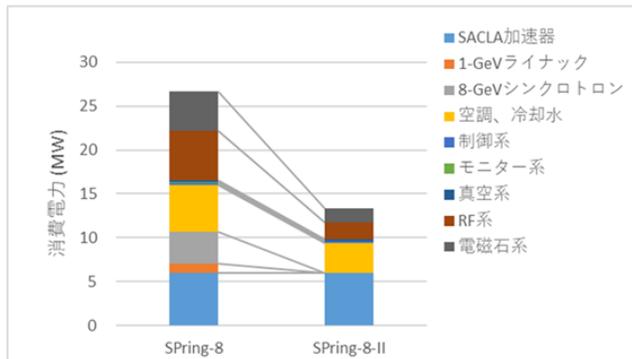
- 加速エネルギーの低減 (8GeV → 6GeV)
- 偏向部の永久磁石化と冷却系の負荷低減
- 既存入射器の停止

加速器テクノロジー

- マルチバンドアクロマット(MBA) 技術による極低エミッタンス
- 極短周期アンジュレータ
- SACLA線形加速器からのビーム入射

世界トップ性能

- 輝度の劇的な向上 (長尺アンジュレータにより輝度世界一)
- 極めて明るい高エネルギーX線の生成 (100倍以上)
- 世界トップのナノビーム・コヒーレント利用技術



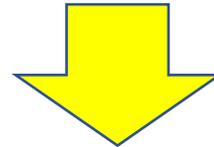
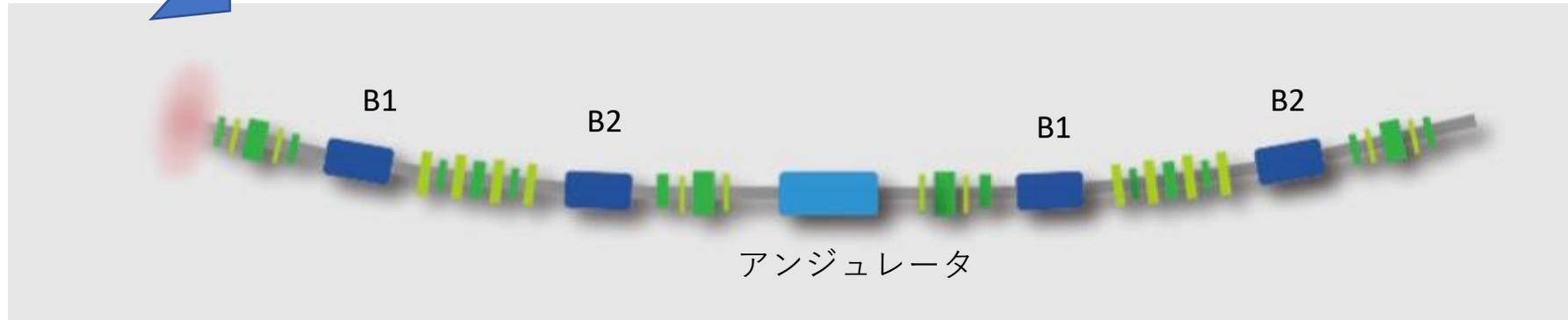
加速器テクノロジーの革新

電子ビームを小さく絞る → 輝度が上がる

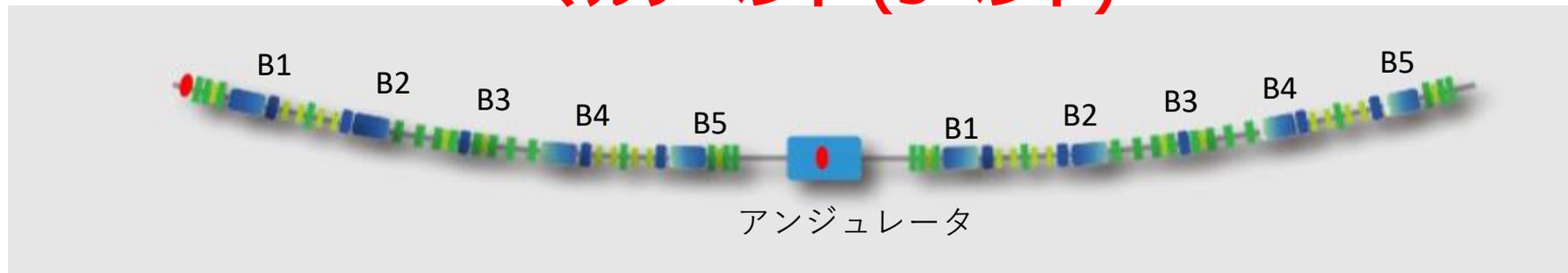


拡大図

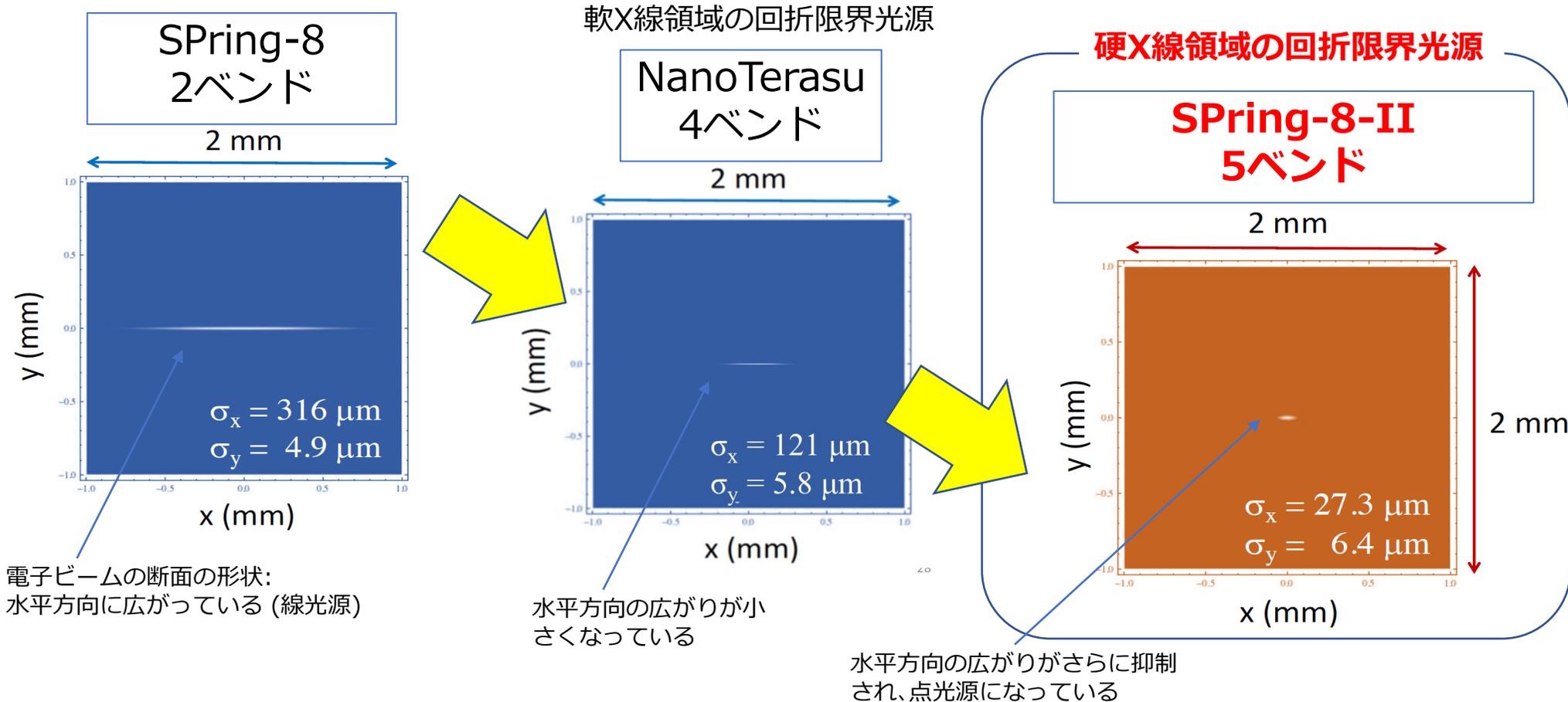
ダブルバンド (2バンド)



マルチバンド (5バンド)

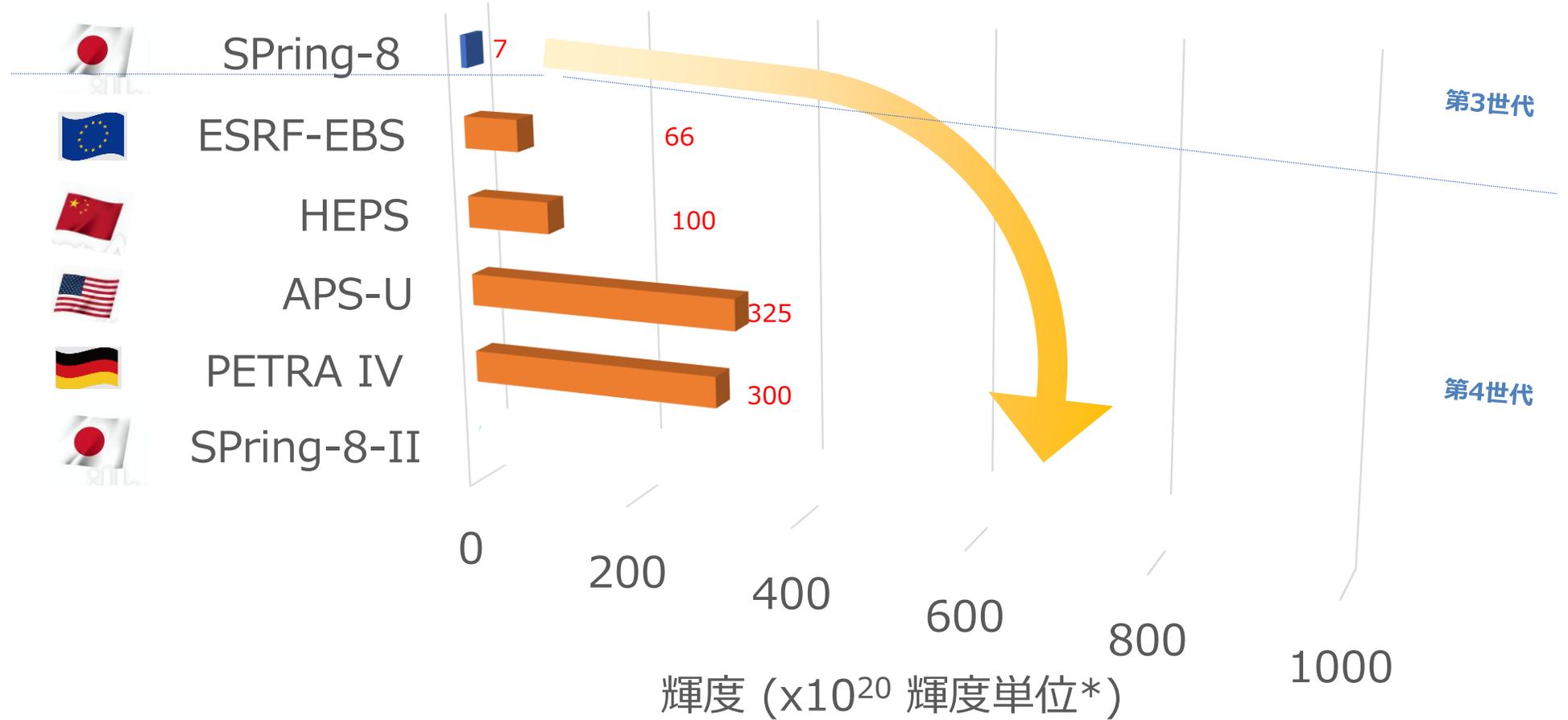


電子ビームの極小化: SPring-8からNanoTerasu、そしてSPring-8-IIへ



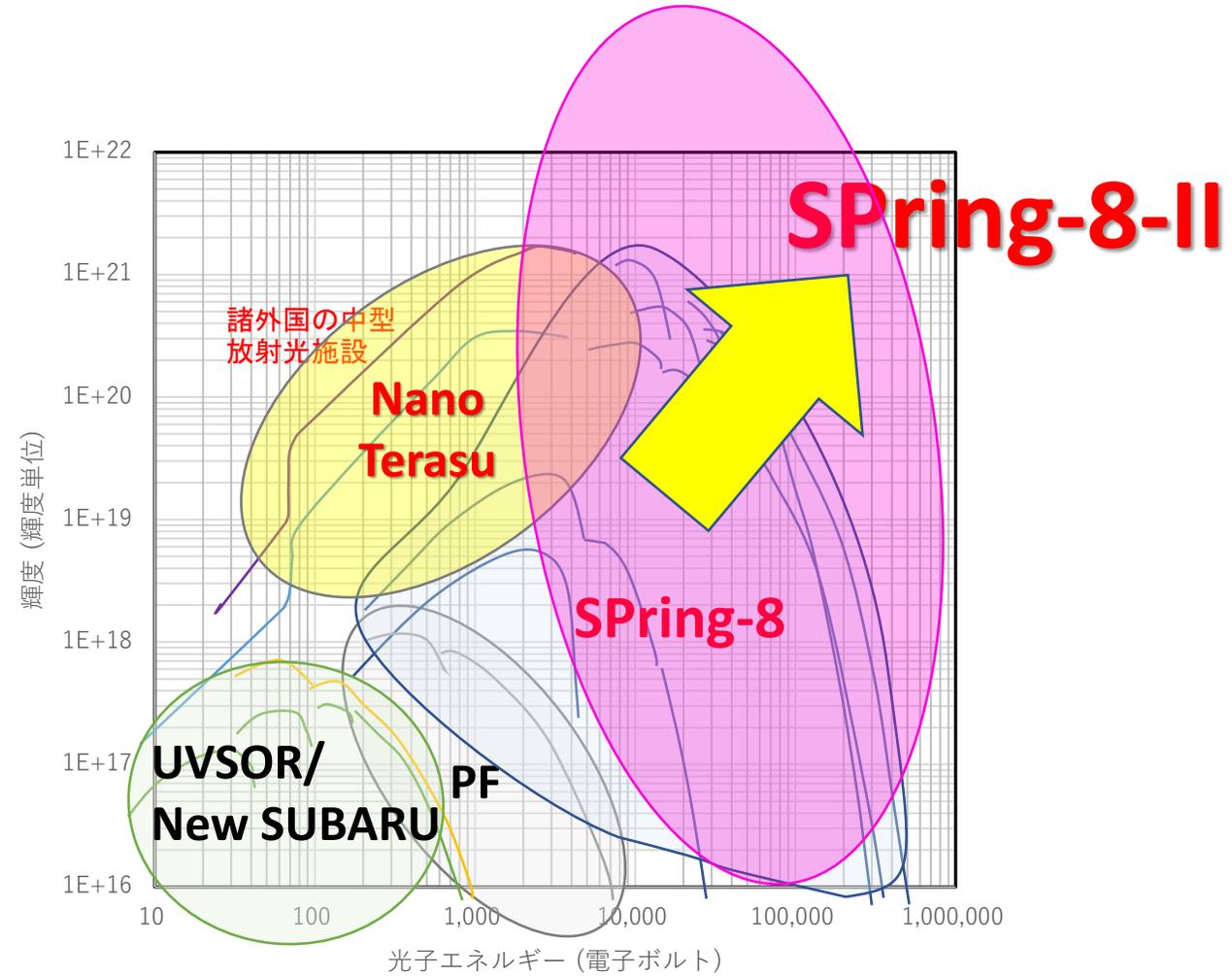
国際比較

最高輝度の比較

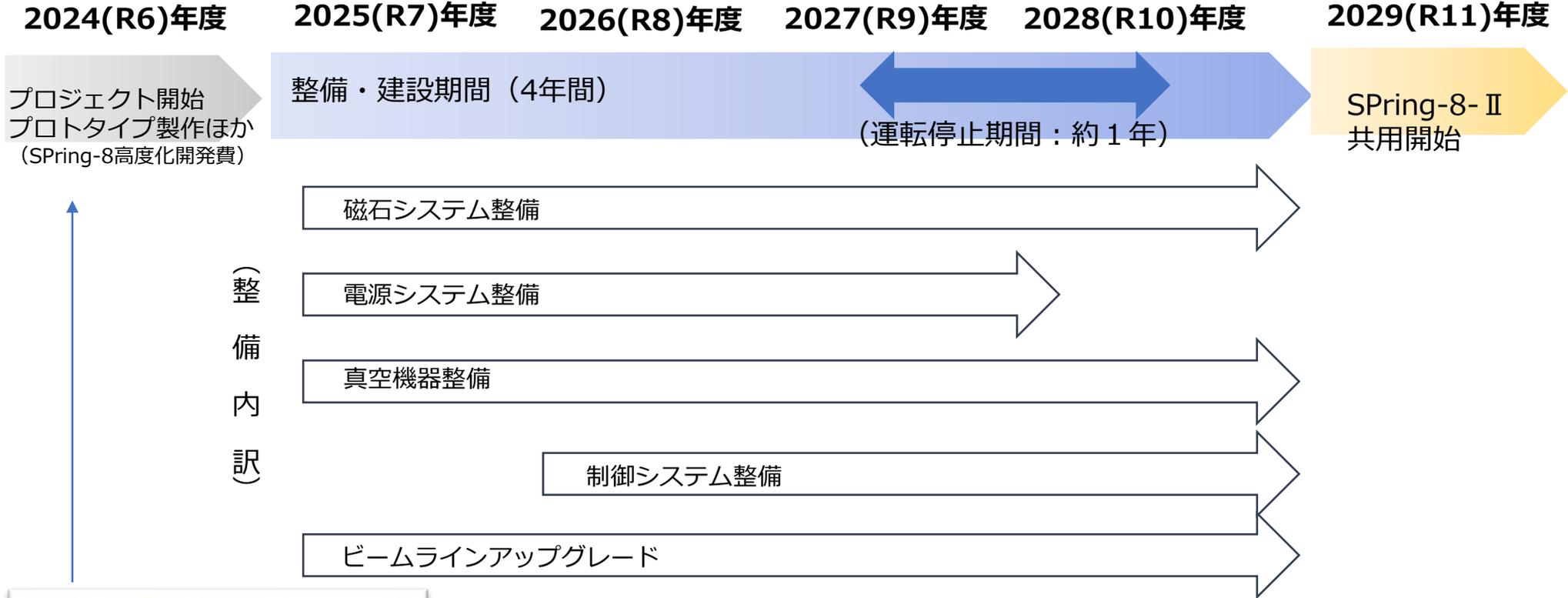


*輝度単位: ph/s/mm²/mrad² in 0.1% b.w.

国内の位置づけ



今後のスケジュール（想定）



Spring-8の高度化 (Spring-8-II) に関する取組

【はじめに】
2006年に開始したSpring-8は、超伝導超伝導放射光施設として、放射光施設の中でも最も最先端の施設として、国内外から多くの研究者が利用されています。Spring-8の高度化は、放射光施設のさらなる発展と、国内の放射光施設としての地位の向上に貢献する重要な取り組みです。

【整備内容】
Spring-8-IIへのアップグレードの計画を進め、2025年度から整備・建設期間を開始し、2029年度に完成し、2029年度からSpring-8-IIの共用を開始します。

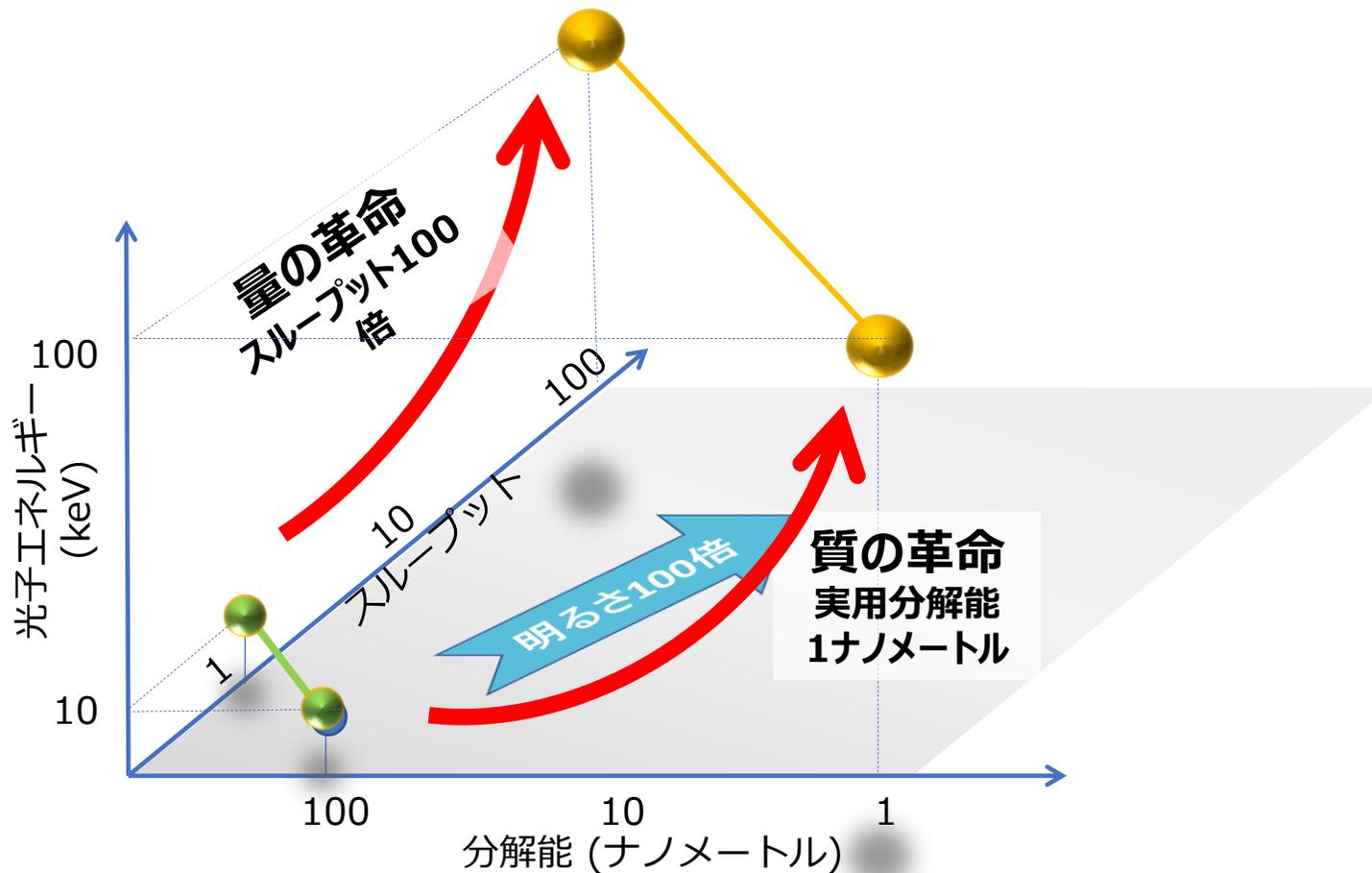
【整備内容】
Spring-8-IIの高度化は、以下のとおりです。
① Spring-8-IIの高度化のための整備・建設期間
② Spring-8-IIの高度化のための整備・建設期間
③ Spring-8-IIの高度化のための整備・建設期間

【整備内容】
Spring-8-IIの高度化は、以下のとおりです。
① Spring-8-IIの高度化のための整備・建設期間
② Spring-8-IIの高度化のための整備・建設期間
③ Spring-8-IIの高度化のための整備・建設期間

SPring-8-IIで何ができるか？

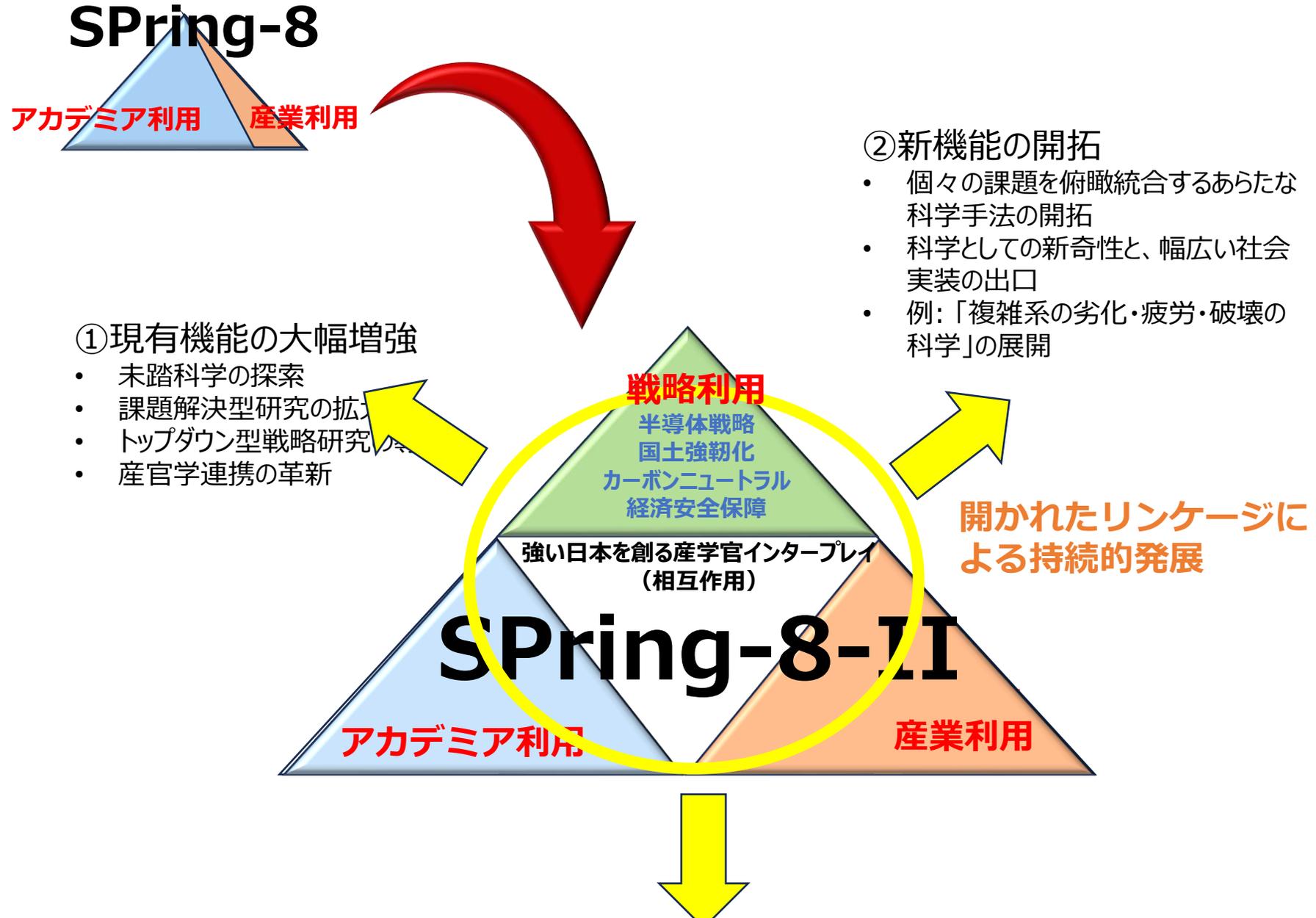
圧倒的な透過力の向上

透過可能な鋼材厚:
0.02mm@10keV
→10mm@100keV



	SPring-8	SPring-8-II
エミッタンス	2.4nm · rad	0.05nm · rad
明るさ(最高輝度)	7×10^{20} ph/s/mm ² /mrad ² in 0.1% b.w.	863×10^{20} ph/s/mm ² /mrad ² in 0.1% b.w.
計測時間	1(相対単位)	0.01(相対単位)
実用空間分解能	50ナノメートル	1ナノメートル以下
光子エネルギー	5~30 keV	10~200 keV
透過力(鉄)	0.02mm @10 keV	10 mm @100 keV

SPring-8-II利用の三本柱



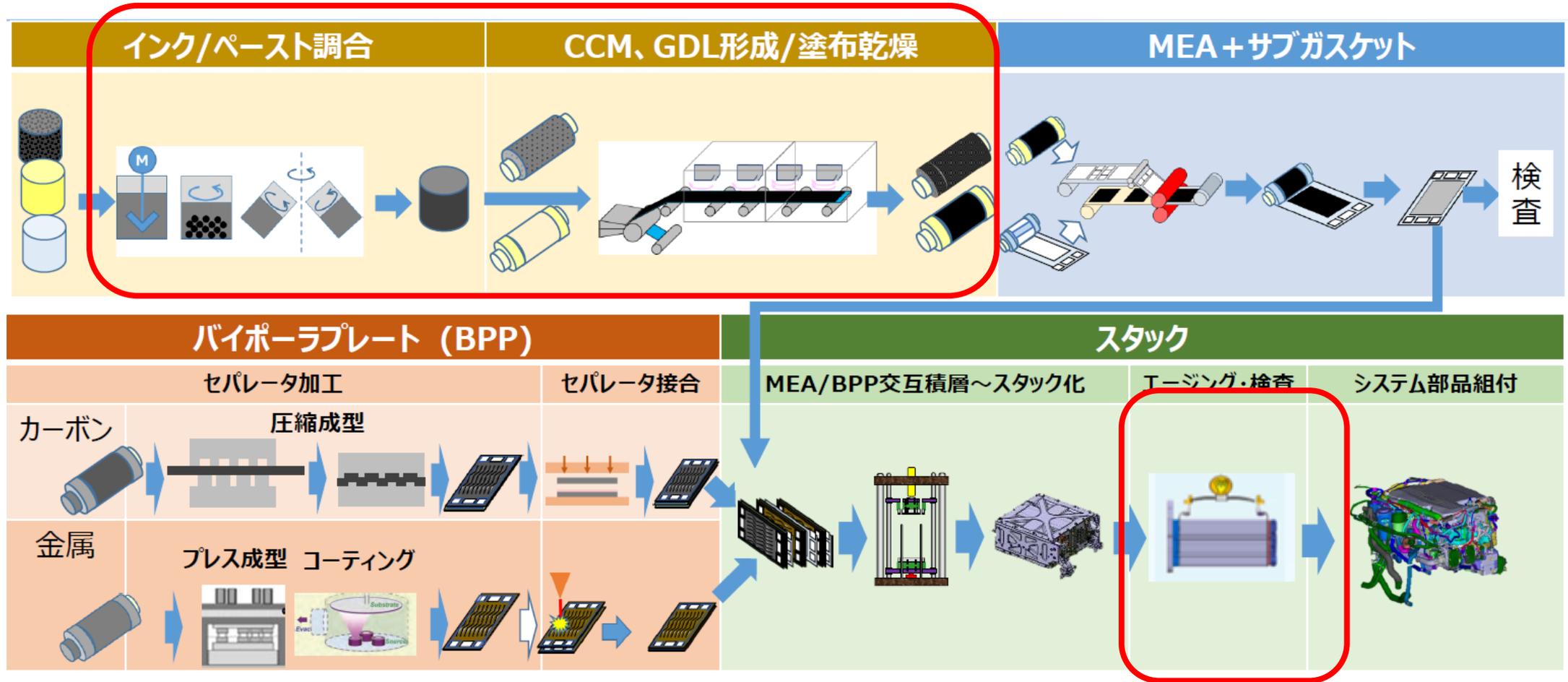
目次

1. SPring-8-II計画の概要
2. DX・自動自律実験に向けて

FCスタック生産工程と課題

インク調合・塗布過程

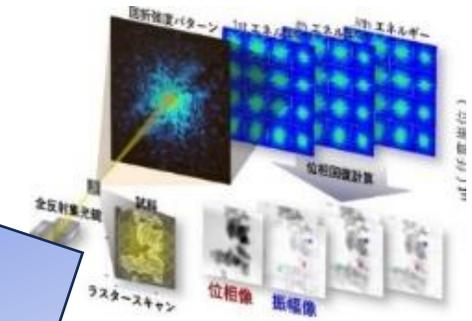
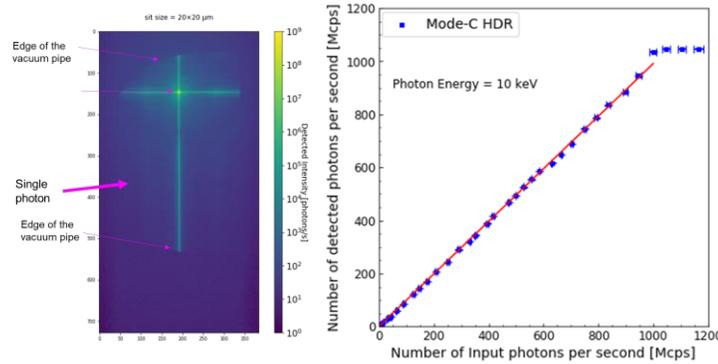
インクの調合時の均一性、塗布時の均一性、高い効率・材料消費の低減、プロセスの高速化、速乾性 → SAXS, GI-SAXS/WAXS



エージング過程

電解質膜・触媒層のエージング過程のメカニズム → マルチモーダルイメージング
白金触媒表面の清浄化 → 高分解能XAFS (HERFD-XAFS)

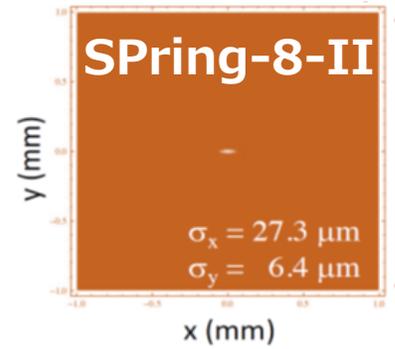
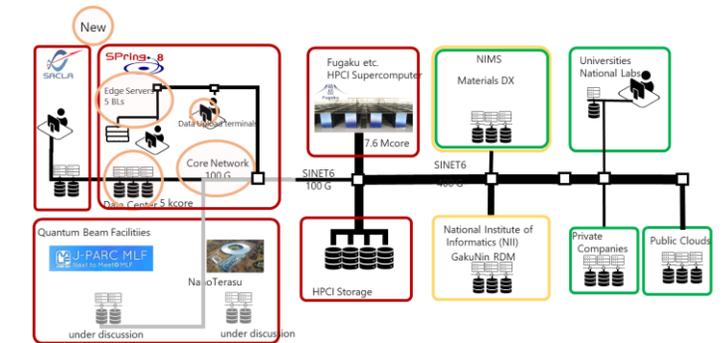
DX・自動自律実験の流れ



- 試料まわり
 - 環境
 - 大量
 - その場
 - PI
 - 生産・製造工程

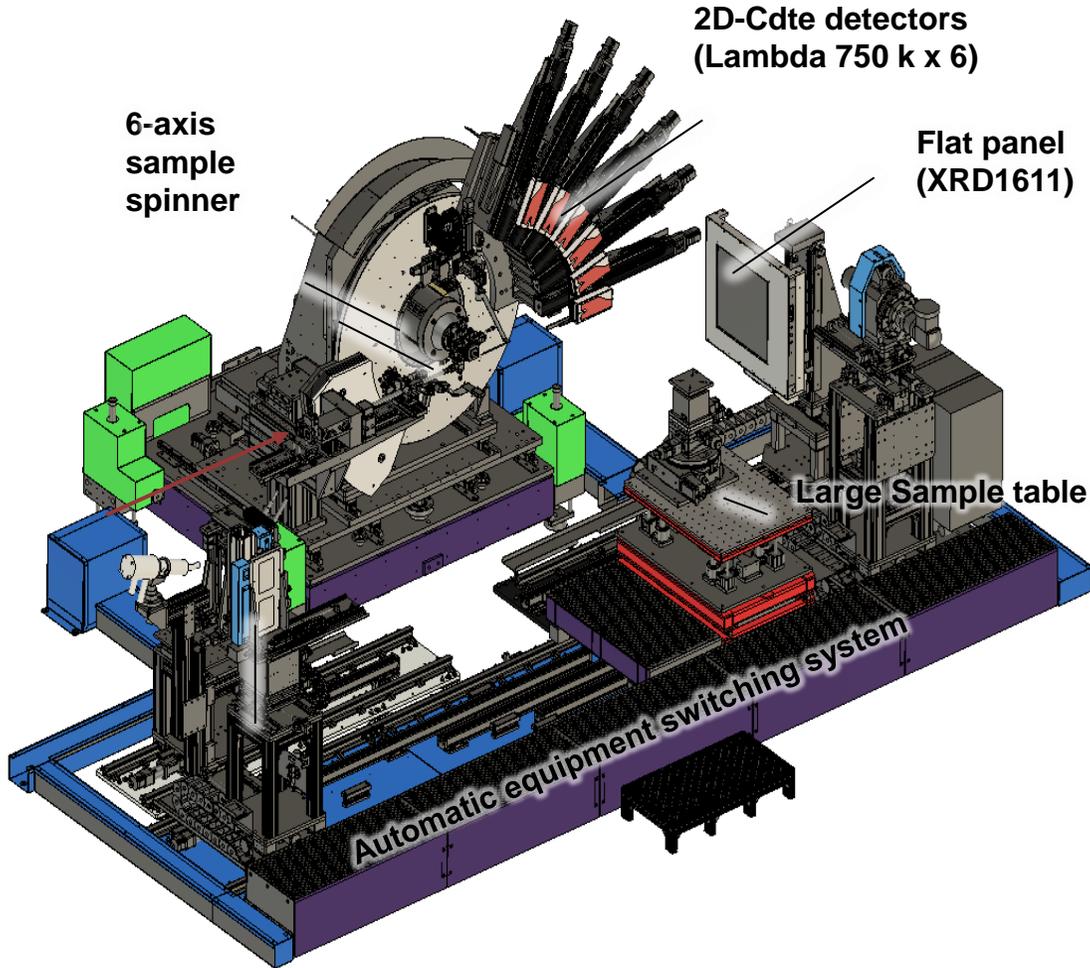
- SPring-8データセンター
 - CPU nodes (64 nodes) 4k CPU cores
 - GPU nodes (16 nodes) 1k CPU cores
 - 111k CUDA cores
 - Storage 20 PB disk (logical)
 - データフローサービス

- CITIUS検出器
 - 回折・散乱計測
 - 従来より100倍以上高いD/R
- DIFRAS検出器
 - イメージング計測
 - サブミクロン分解能

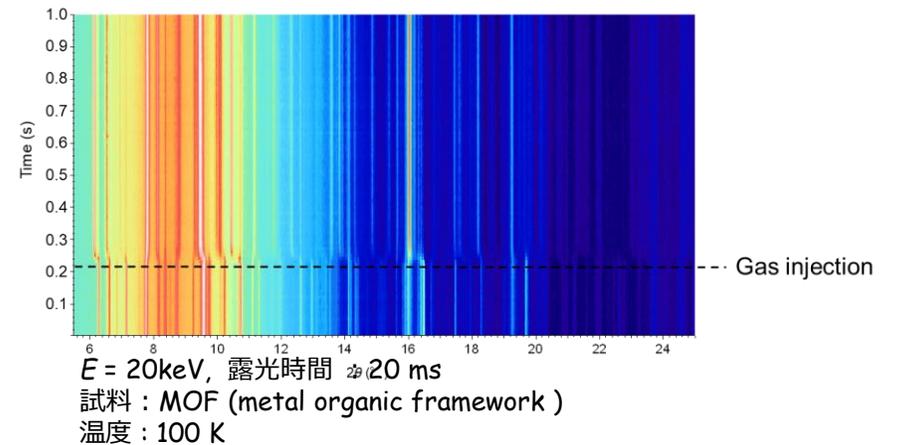


① 粉末X線構造解析@BL13XU

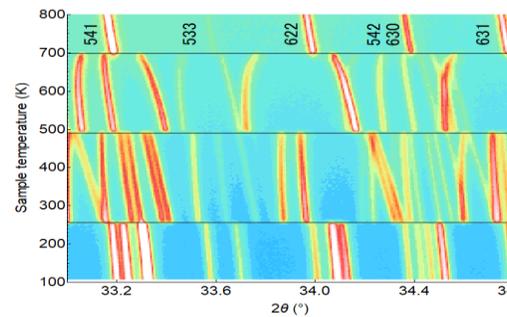
従来のBL02B2より100倍速く計測
温度範囲: 5-1900 K



高速計測

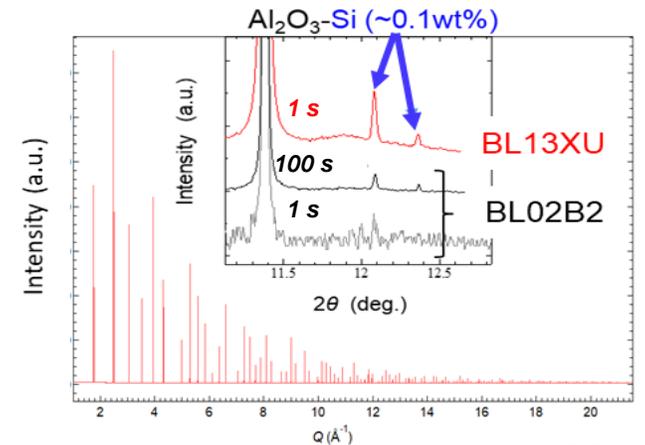


温度変化による相転移



Sample: Perovskite-type transition oxide
($R3m \rightarrow Amm2 \rightarrow P4mm \rightarrow Pm-3m$)
 $E = 35 \text{ keV}$
 $100 \text{ K} \rightarrow 1100 \text{ K}$ (Ramp rate: 80 K/min)

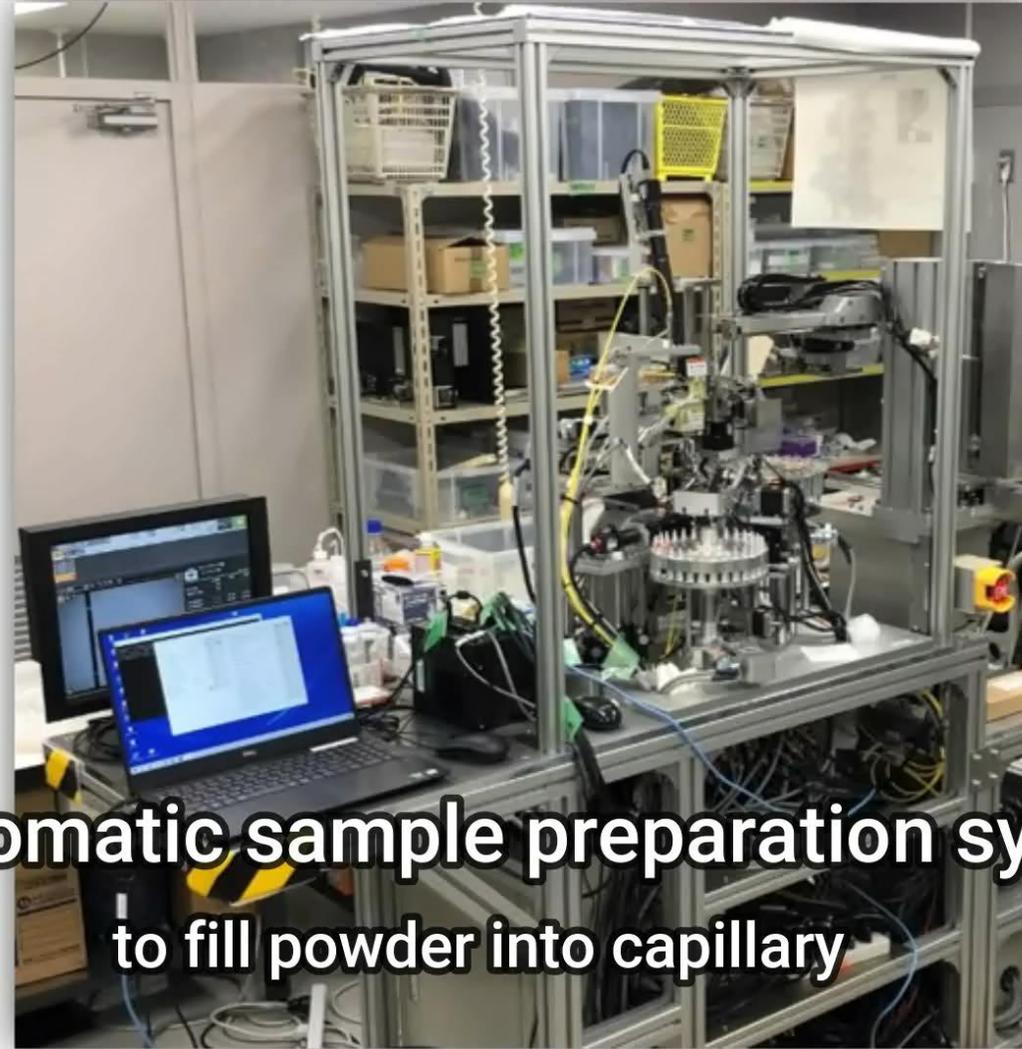
不純物相の検出感度



①粉末試料キャピラリー自動装填装置

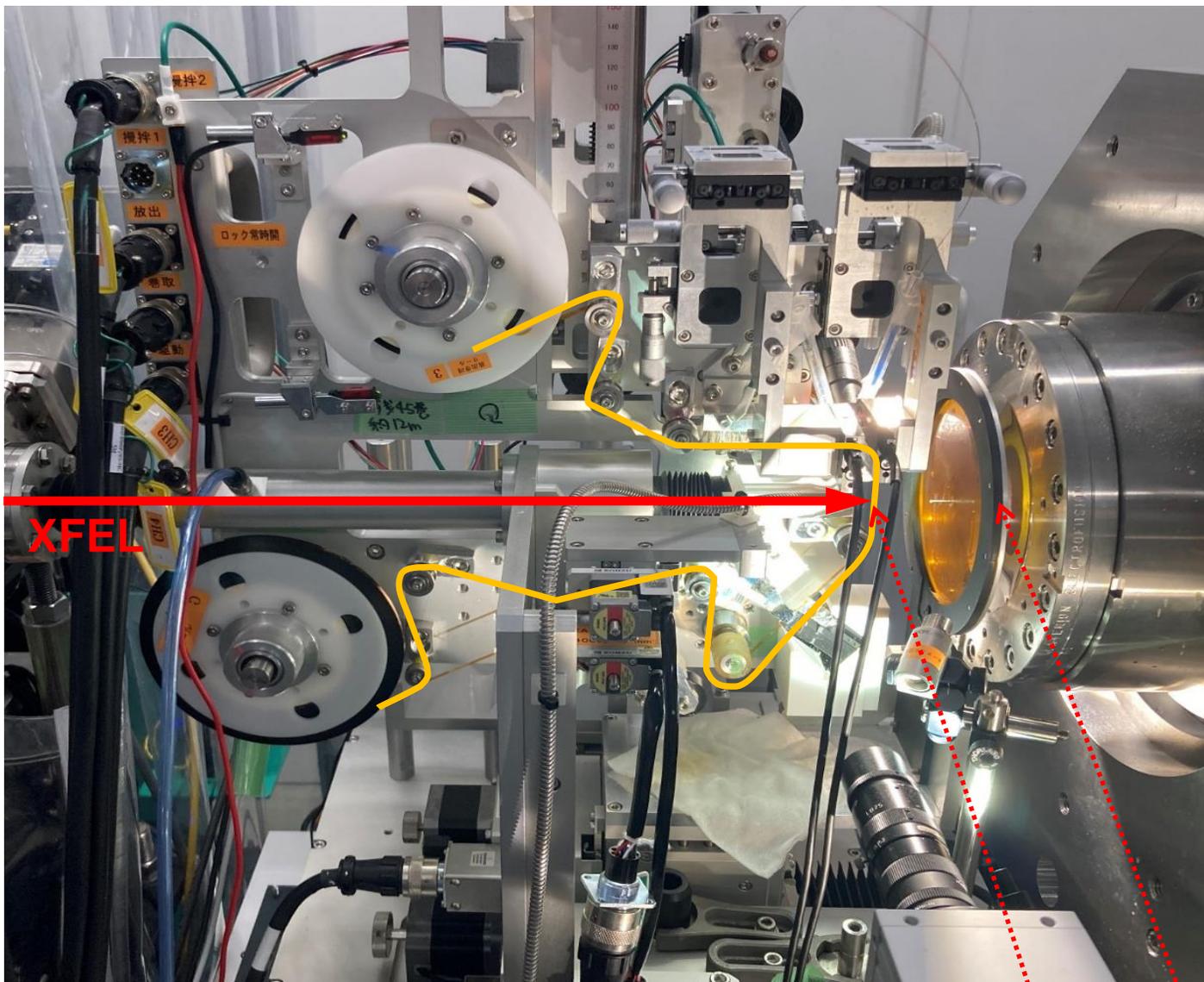


参考画像



**Automatic sample preparation system
to fill powder into capillary**

② ドロップレットインジェクター+テープ搬送装置@SACLA

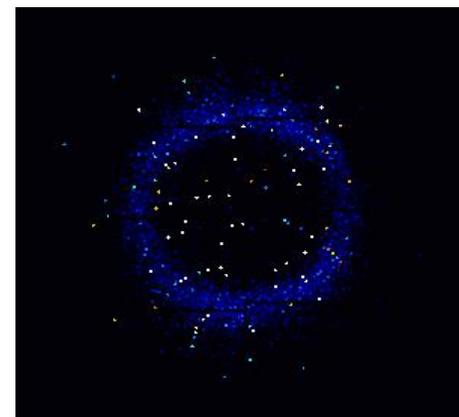
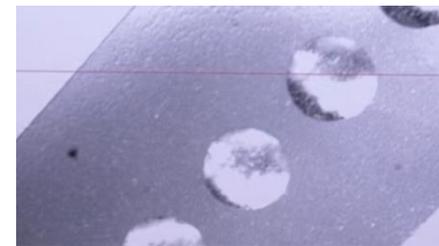


XFEL

Sample \leftarrow 70 mm \rightarrow Detector



~26 nl/droplet
 ϕ 500-600 μ m



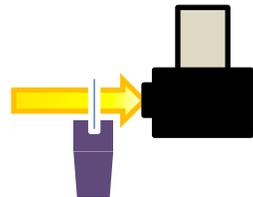
最大60 Hz

③マルチモーダル・多次元計測: 高空間分解能XAFS-CT

山田純平助教
(阪大/理研)

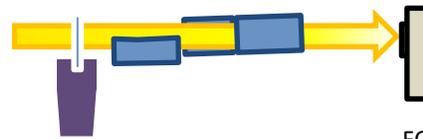
CuO / Cu₂O particles Photon energy: 8.924~9.105 keV

Projection
Hamamatsu-20x



250 nm/pix, 20~60 ms/frm
3 min/XANES (400 energies)

AKB(W.F. & high speed)
w/ FOP-CMOS

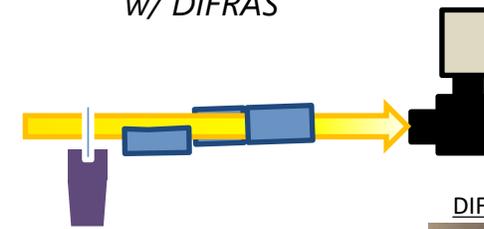


88.8nm/pix, 50~200 ms/frm
11 min/XANES (325 energies)

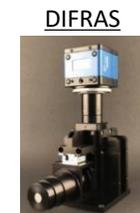


www.hamamatsu.com

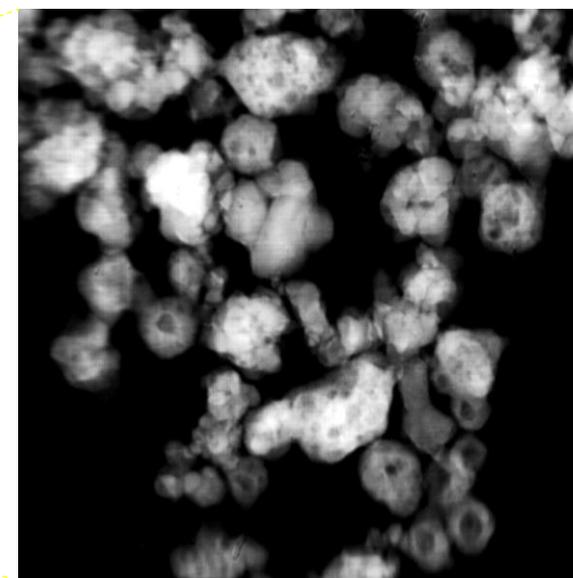
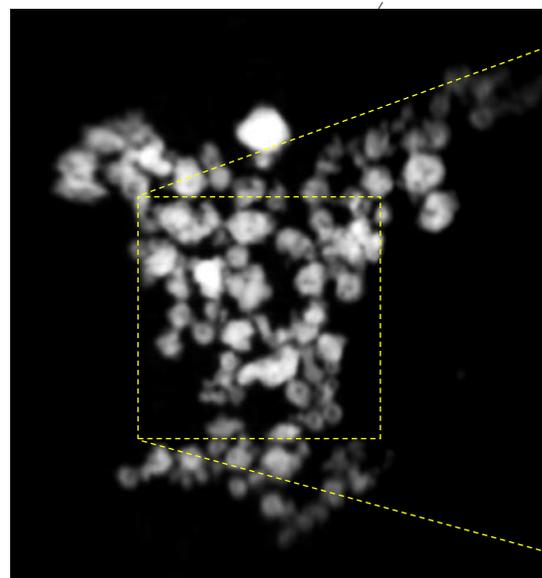
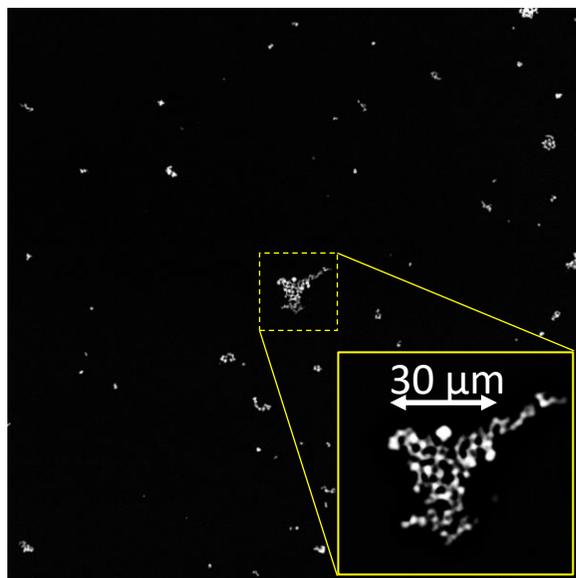
AKB(high res.)
w/ DIFRAS



19.2nm/pix, 1~5 s/frm
25 min/XANES (95 energies)



T. Kameshima *et al.*, Opt. Lett. **6** (2019).

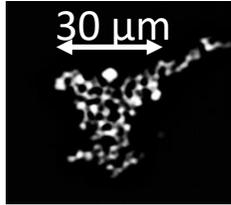


0.05 Absorption (μ) 0.3

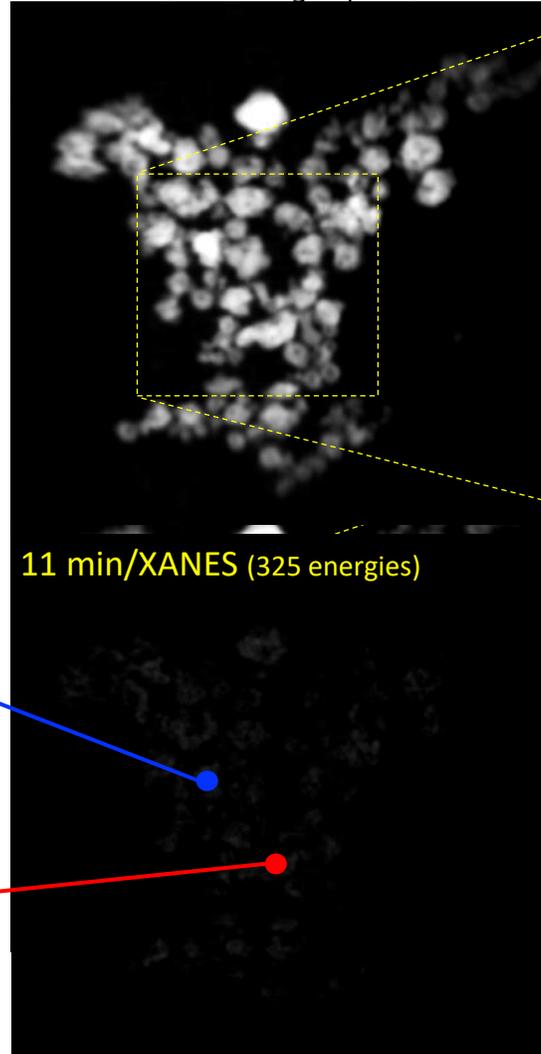
③ AKBミラーを用いた高空間分解能XAFS-CT

CuO / Cu₂O particles Photon energy: 8.924~9.105 keV

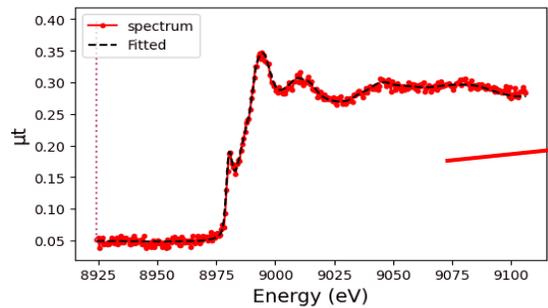
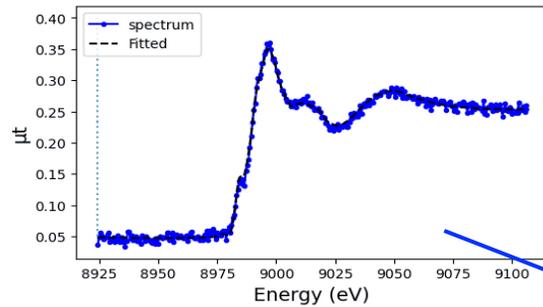
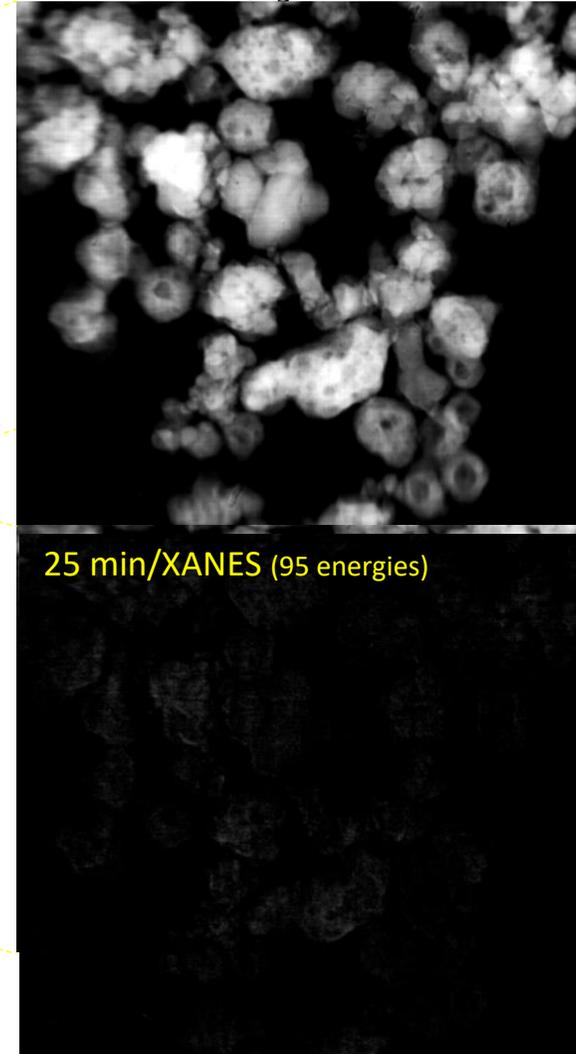
Projection



AKB(W.F. & high speed)



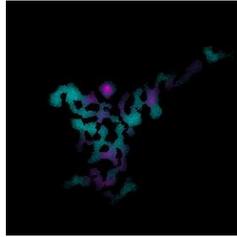
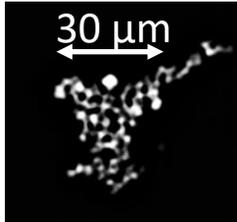
AKB(high res.)



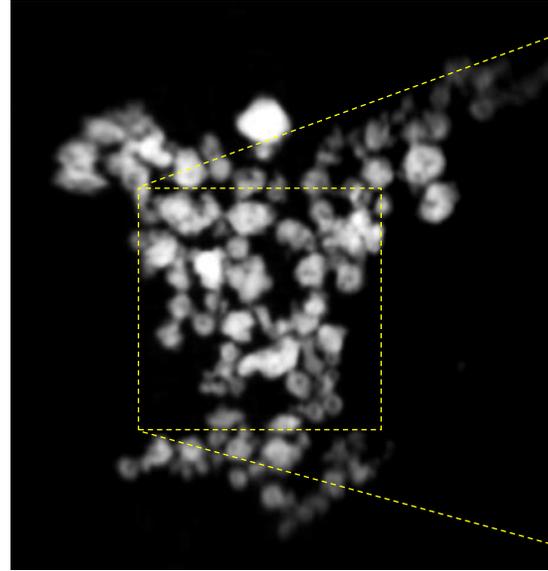
③ AKBミラーを用いた高空間分解能XAFS-CT

CuO / Cu₂O particles Photon energy: 8.924~9.105 keV

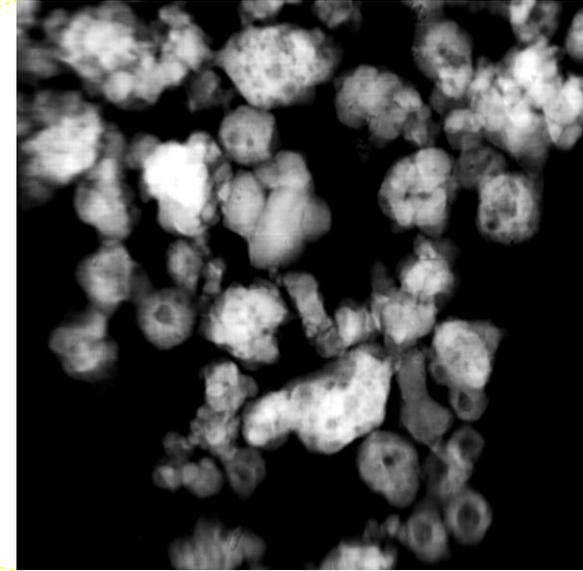
Projection



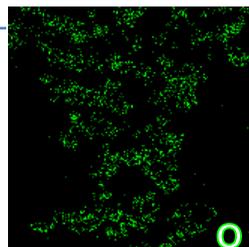
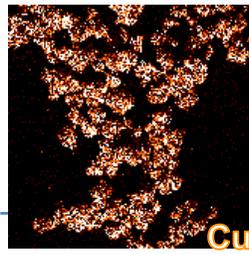
AKB(w.F. & high speed)



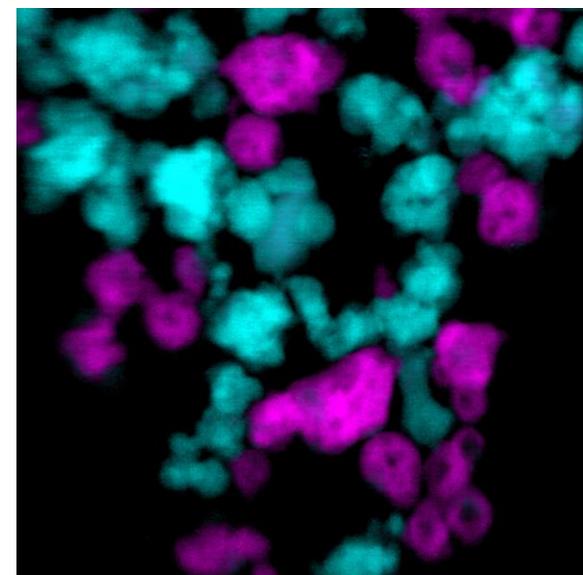
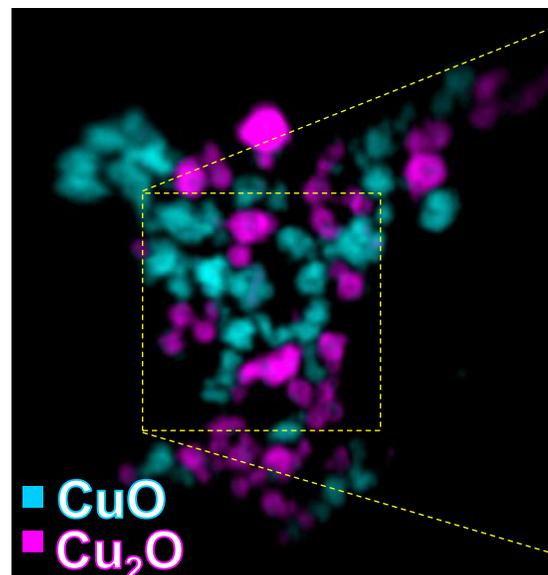
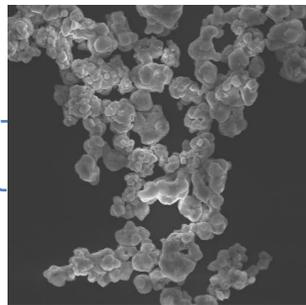
AKB(high res.)



SEM-EDX

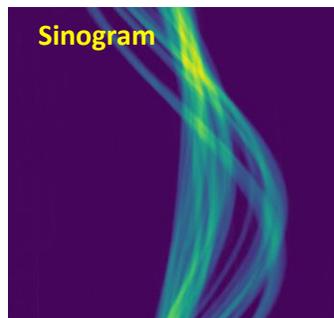
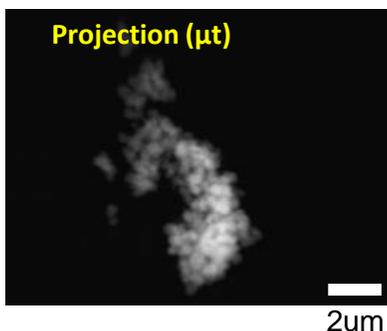
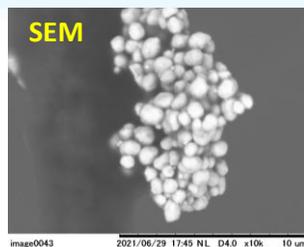


SEM



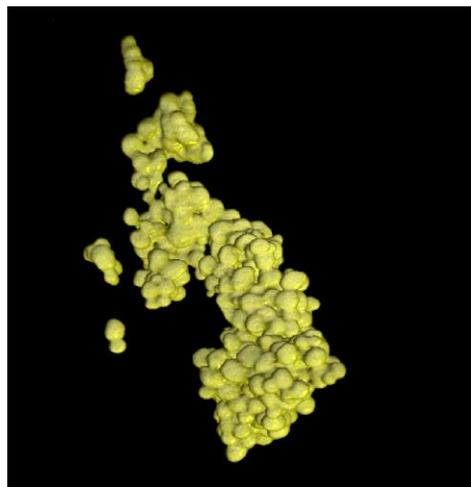
Sintered Au micro-particle

Photon energy: 14.5 keV
 Exposure: 100ms
 0.2 deg/step, 900image
3.75 min/CT scan
21.2 nm/voxel



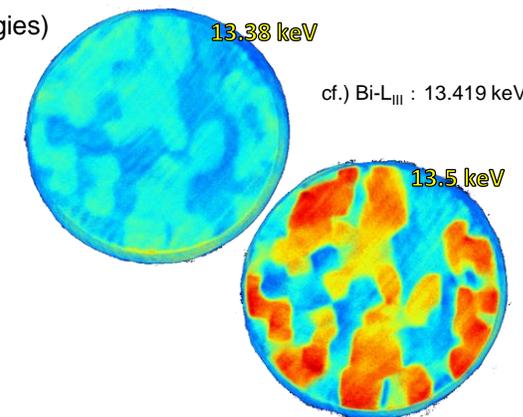
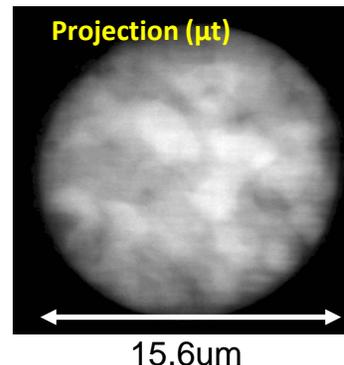
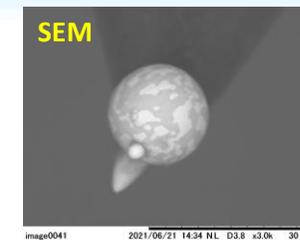
Position refinement:
 Mass fluctuation & Iterative
 reprojection
 D. Gürsoy *et al.*, JSR 2014

SIRT reconstruction (250loop)

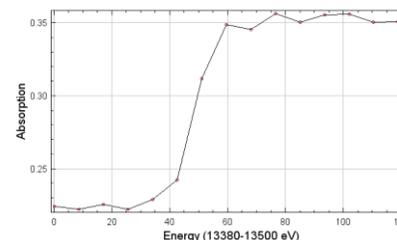
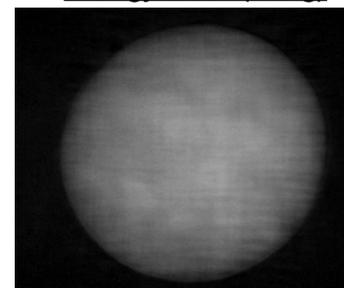


Solder (Sn-Bi) micro-sphere

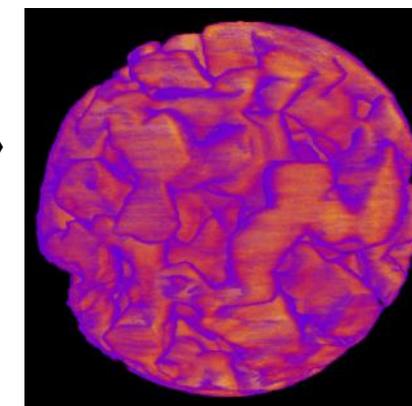
Photon energy: 13.38~13.50 keV
 Exposure: 200ms
 0.2 deg/step, 900image
4分 min/CT scan
42.5 nm/voxel
 Meas. time: 1 h (15 energies)



EnergyStack (0deg)



Element(Bi)-selected
micro-CT

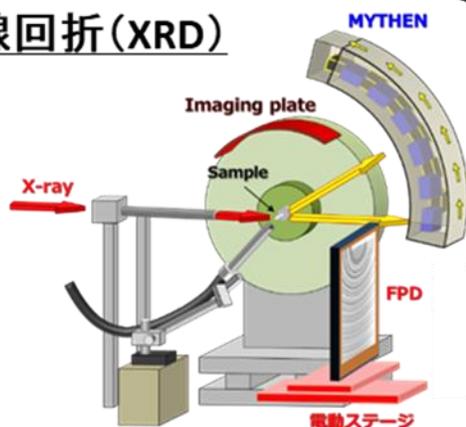


- 2023年度～: BL36XUにて、名大唯先生のCRESTの枠組みのもと、実応用に向けたテストを開始
- シングルナノメートル分解能は、SPring-8-II+タイコグラフィで達成を見込む

多様な分析プラットフォームの高度化

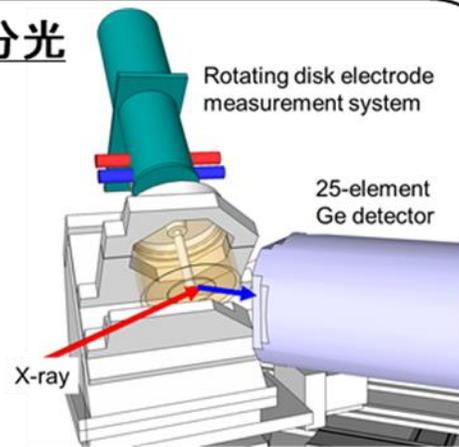
粉末X線回折(XRD)

使用BL:
BL19B2



X線吸収分光 (XAFS)

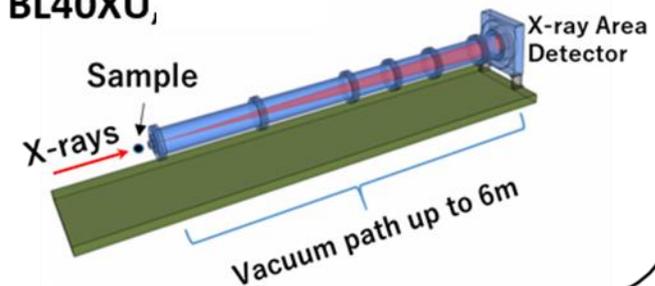
使用BL:
BL36XU
BL14B2



小角X線散乱(SAXS)

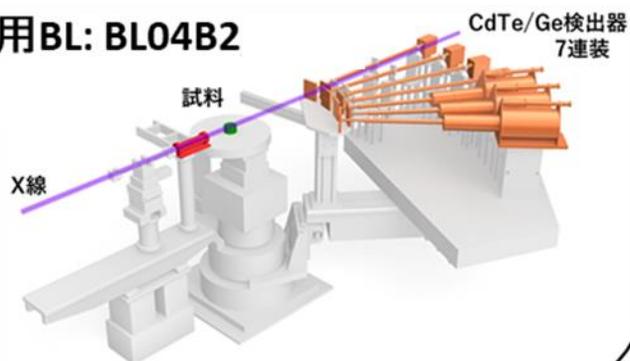
使用BL: BL40B2,
BL40XU,

Pilatus3 S 2M



X線全散乱(PDF)

使用BL: BL04B2



硬X線光電子分光(HAXPES)

使用BL: BL46XU, BL09XU



まとめ

- SPring-8-II計画
 - 2027年度後半から1年間シャットダウン予定
 - 輝度100倍超
 - 国の重要戦略の基盤を支える
- DX・自動自律実験：理研・共用BL群の活用
 - 粉末XRD、全散乱(PDF)
 - アンビエントHAXPES
 - 自動自律実験：粉末自動装填、自動試料導入…
- 高度専門解析 → 新しい Project-dedicated BLの可能性
 - 生産技術・製造プロセスへの適用
 - GI-SAXS, SAXS, マルチモーダルイメージング, HERFD-XAS…
 - 残り4ポート
 - セキュアな環境の整備
- SPring-8-II運用開始後の、分析能力の飛躍的なブーストを見据えた検討
 - ターゲットの深掘りと拡大 (例:水素貯蔵技術)

本日の見学



Acknowledgement

[SPring-8/SACLA](#): Taito Osaka, Michihiro Sugahara, Ichiro Inoue, Jumpei Yamada, Gota Yamaguchi, Hidekazu Takano, Kenji Tamasaku, Yujiro Hayashi, Jaemyung Kim, Hiroshi Yamazaki, Hirokatsu Yumoto, Takahisa Koyama, Yasunori Senba, Haruhiko Ohashi

Shunji Goto, Yoshiyuki Amemiya, Tetsuya Ishikawa

Takaki Hatsui, Kyo Nakajima, Yasumasa Joti, Koji Motomura, Takashi Kameshima, Toshiyuki Hiraki, Takashi Sugimoto, Yoshiaki Shimadzu, Tomio Avis

Takahiro Watanabe, Hirokazu Maesaka, Takahiro Inagaki, Toru Hara, Kazuaki Togawa, Takashi Tanaka, Hitoshi Tanaka

Osami Sakata, Yoshiharu Sakurai, Kensuke Tono, Kentaro Uesugi, Masato Hoshino, Tetsuo Homma, Akihisa Takeuchi, Yuji Higo, Yasuhiko Imai, Shogo Kawaguchi, Taiga Nakamura, Hiroki Yamada, Kunihisa Sugimoto, Koji Ohara, Kazushi Sumitani, Tomoyuki Koganezawa, Shigeru Kimura, Hiroyuki Ohsumi, Tomoya Uruga, Yoshinori Tange, Yusuke Tamenori, Akira Yasui, Yasumasa Takagi, Satoshi Yasuno, Masugu Sato, Okkyun Seo, Yoshiki Kohmura, Hiroyasu Masunaga, Taizo Kabe, Yoshitaka Yoda, Hiroshi Uchiyama, Alfred Q.R. Baron

ご清聴ありがとうございました

End