

次世代半導体開発に対する 放射光施設の貢献

令和6年6月3日

次世代半導体のアカデミアにおける
研究開発等に関する検討会（第6回）

理化学研究所 放射光科学研究センター長 石川哲也

1-1. 大型放射光施設の特徴と優位性

高輝度・高分解能

- … 高輝度・高分解能の放射光により、ラボレベルのX線分析装置に比べて迅速かつ大量の高分解能データが得られる。

非破壊性

- … X線の物質への透過性により非破壊による試料計測が可能であり、三次元構造や物質の電子状態を精密に解明できる。

その場測定、オペランド測定

- … 温度、湿度やガス雰囲気など様々な環境下での物質の状態や動作中デバイスの特性を容易に得ることができる。



1-2. 半導体開発における放射光施設の相乗効果について

- SPring-8-II が実現すれば、**硬X線、軟X線の両面において、世界最高水準の放射光が我が国において利用可能となる**。これにより、半導体開発においてそれぞれの施設の強みを活かした貢献が可能となり、我が国の競争力強化に貢献する。



元素の周期表 The Periodic Table

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

- NanoTerasu 軽元素に強い
- SPring-8-II 重元素に強い

SPring-8-II

- 硬X線領域で世界一の分析能力
- 物体内部のナノ構造を非破壊で捉える
- 重元素(金属、半導体等)を超高感度で分析

SPring-8-II

- 次世代半導体を非破壊で3次元ナノ分析
- 3Dパッケージ技術の評価
- 次世代パワー半導体の評価

半導体開発での強み

NanoTerasu

- 軟X線領域で世界一の分析能力
- 表面で起こる化学反応を精緻に捉える
- 軽元素(リチウム、炭素等)を超高感度で分析

NanoTerasu

- 次世代半導体製造のための要素技術・検査技術の開発
- デバイス・マスク等の表面や界面の超高感度の不純物分析

チョークポイントを検証しながら、次世代半導体製造技術の国産化を大きく加速させる

2-1. 半導体分野におけるSPring-8の活用例

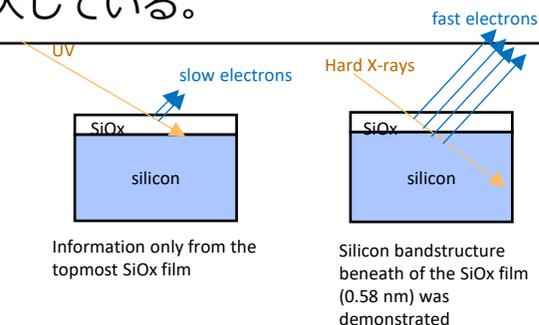
- 硬X線光電子分光(HAXPES)の発明とその発展を通じて半導体分野の新規成膜材料・成膜技術開発に貢献している。利用分野は、先端ロジック半導体、メモリ半導体、光半導体、パワー半導体など、半導体分野全てにまたがる。
- 利用主体は学術から企業にシフト。企業が設立したサンビーム共同体および共用ビームラインの成果専有利用制度により利用されており、成果は非公開となっている。
- 他に、高感度・高空間分解能トポグラフィも近年利用ニーズが増大している。

HAXPES（硬X線光電子分光法）

- SPring-8で発明された分析手法(2004年)。SPring-8の高輝度硬X線と超狭帯域単色化技術によって可能となり世界に広まった。
 - 企業利用は、サンビーム共同体が運営する専用ビームラインに東芝が中心となって専用装置を設置してから加速。デバイス企業の次世代プロセス技術開発において必須の分析技術として活用されている。
 - 近年は、理研ビームライン、共用ビームラインにて技術的に発展
集光技術による顕微HAXPES
 - 大阪大学が開発した結像集光ミラー技術によりマイクロメートルスケールの顕微分解能の付与が可能になった。
 - デバイスに電圧を印加して界面の不純物準位を制御しつつHAXPESで成膜内ポテンシャル分布を評価。界面の欠陥など**光デバイス、メモリデバイス**の性能・信頼性に関する知見が得られるようになった。
- 厚膜試料への対応
- **パワーデバイス、光半導体**では厚膜試料が多く、対応が求められていた。これに対し、理研・JASRIの光学技術により高エネルギーX線の実効フラックスの向上を実現した。膜厚30 nm超の界面評価が視野に入りつつある。
 - 専用ビームラインでは、上記最先端の技術を取り入れることが難しくなってきた。また、先端ロジック半導体への適用についての検討を主要ロジック半導体企業と行ったところ、更なる高度化の必要性が顕在化した。そこで、理研・大阪大学が参画した技術研究組合SQATの設立により産官学で高度化を行うことになった。

高感度・高空間分解能トポグラフィ

- パワー半導体においては化合物半導体の欠陥評価、およびデバイス加工後の欠陥評価とそのイメージングが重要
- 理研が開発した高精細X線画像検出器DIFFRASの有効性を企業と確認し、高感度・高空間分解能が実現できることが示された。企業ニーズ対応に向けて共用ビームラインに技術展開を行う段階にある。



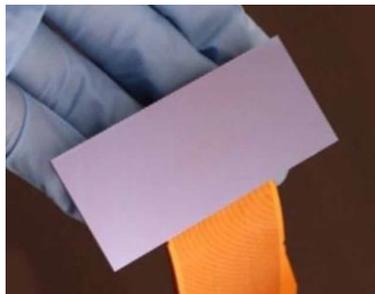
シリコン酸化膜における最初のデモンストレーション[1]
[1] Y. Takata, et al., Applied Physics Lett. 84, 4310 (2004)

2-2. 今後の半導体分野のSPring-8活用例：イメージング

- SPring-8は、1ミクロンから100 nm程度の分解能を有する顕微鏡ビームラインを複数共用中。半導体の実装分野等で成果専有利用がなされている。近年では50 nm程度の結像型X線顕微鏡も実現され、NANDメモリデバイスでの広視野構造評価で有効性を確認（名古屋大学、リガク、キオクシア）。
- 実験室のX線顕微鏡では空間分解能が不足し、電子顕微鏡による破壊計測では分析面積が不足する領域をカバー。分解能のさらなる向上が求められている。

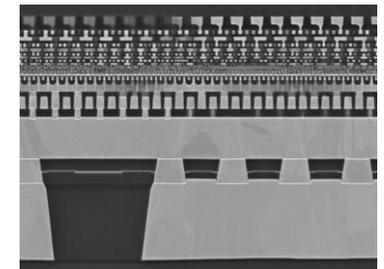
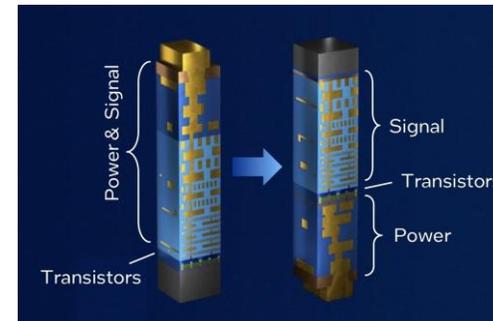
硬X線回折顕微鏡

- SPring-8では、世界ではじめてコヒーレントX線を用いた回折顕微鏡を実証[1]するなど、回折顕微鏡研究で世界をリード
[1] J. Miao et al, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 088303 (2002).
- 半導体分野では1 nmレベルの空間分解能をもつ3次元回折顕微鏡が期待されている。
- 実現にはSPring-8-IIレベルの超高輝度硬X線が必要であるが、それ以外にも要素技術の格段のレベルアップが必要
 - ナノ領域に波面を乱さずX線を集光し、かつ集光位置がナノメートルレベルで安定な集光ミラー技術を開発(大阪大)
 - 極めて強いX線と微弱X線を同時に計測する超広ダイナミックレンジX線画像検出器
- デモンストレーションにとどまらず、実用分析サービスにまで仕上げることが要求されている。そこで理研・大阪大学が参画した技術研究組合SQATの設立により産官学で実現を図ることになった。
(想定利用事例) 先端ロジック半導体では配線が微細化、また今後新材料の導入も検討され配線技術の重要性が高まってきている。トランジスタへの電源供給能力を強化するために裏面からも配線を形成することが標準となりつつあるが、この場合、従来の発光に基づく配線不良検出が困難になっている。X線の高精細3次元可視化技術が期待されている。



超高ダイナミックレンジ検出器CITIUSの開発

- 理研放射光科学研究センターとソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社の共同開発
- 従来技術に比べ3桁のダイナミックレンジ向上を実現



Intel社の裏面電源供給配線のコンセプト(左)と断面TEM像(右)
Samuel K. Moore, *IEEE Spectrum*, 08 JUN 2023.

4-1. SPring-8-IIの必要性について

- SPring-8は、1997年の共用開始から25年以上が経過し、施設の老朽化が課題となっているほか、**世界においては、欧米ではアップグレードが、中国では新規建設が進んでおり、性能の面でも遅れを取りつつある。**
- 国内に施設を有していれば、海外研究者の来日を通じて国際頭脳循環が促進される一方、SPring-8が**このまま陳腐化すると我が国の研究者は海外施設に頼らざるを得ず、施設利用に際し他国に研究内容を開示する結果になるなど、経済安全保障の観点からも大きな課題が生じる。**
- 産業・社会の大きな転機を見据え、2030年に向けて経済安全保障の最重要基盤施設の一つとしてのアップグレードが必須。

1-2. 硬X線放射光施設を取り巻く国際情勢

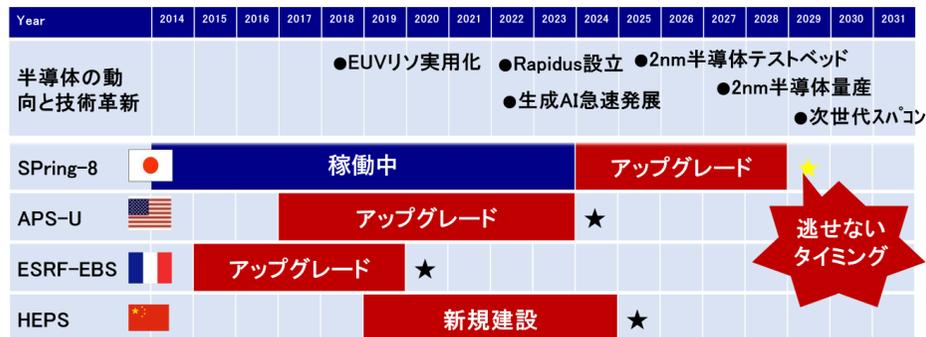
なぜ必要か



2023/7/4第4回SPring-8の高度化に関するタスクフォース(五神 真)

今こそSPring-8を高度化するべきタイミング

諸外国ではアップグレード(高度化)や新規建設が急速に進み、高精細なデータが短時間で取得可能となってきている。いずれの海外施設とも、広範な科学技術分野の基盤として、放射光施設の次世代化を意義付けている。



施設名	状況 (計画中/稼働中/建設中)	所在国 (地域)	建設開始(予定)年	運用開始(予定)年	エネルギー [GeV]	電流値 [mA]	エミッタンス (水平) [nm·rad]	最高輝度 (アンジュレータ) [$\times 10^{20}$ ph/s/mm ² /mrad ² m 0.1%	ビームライン[本]		リング周長 [m]	運営主体 (機関名)	
									現在	最大			
硬X線第3世代	SPring-8	稼働中	日本(播磨)	1991	1997	8	100	2.4	7	57	62	1435.43	理研・JASRI
硬X線第4世代	SPring-8-II	計画中 アップグレード	日本(播磨)	2024	(2029)	6	200	0.05	863	57	62	1435.43	理研・JASRI
	APS-U	建設中 アップグレード	米国(アルゴンヌ)	2017	2024	6	200	0.042	325			1104	ANL/DOE
	ESRF-EBS	稼働中 アップグレード	フランス(ウルノーブル)	2015	2020	6	200	0.147	66			843.98	ESRF
	PETRA IV	計画中 アップグレード	ドイツ(ハンブルク)	2025	2028	6	200	0.02	300			2304	DESY
	HEPS	建設中 新規	中国(北京)	2019	2025	6	200	0.06	100	90+		1360.4	IHEP



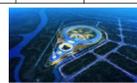
ESRF-EBS(仏、グルノーブル)



APS-U(米国、アルゴンヌ)



PETRA-IV(独、ハンブルク)



HEPS(中国、北京)※完成イメージ

硬X線施設はこれまで日米欧で競ってきたが現在、欧州は既に第4世代にアップグレード済で米国も来年度から運用予定であるため、第3世代であるSPring-8との性能差は二桁差となる。さらに、アジアにおいても中国・韓国でも同性能の硬X線施設を建設中という情勢であり、SPring-8で3年かかる実験も、第4世代では計算上は5日間で済んでしまうほどの世代間格差がある。

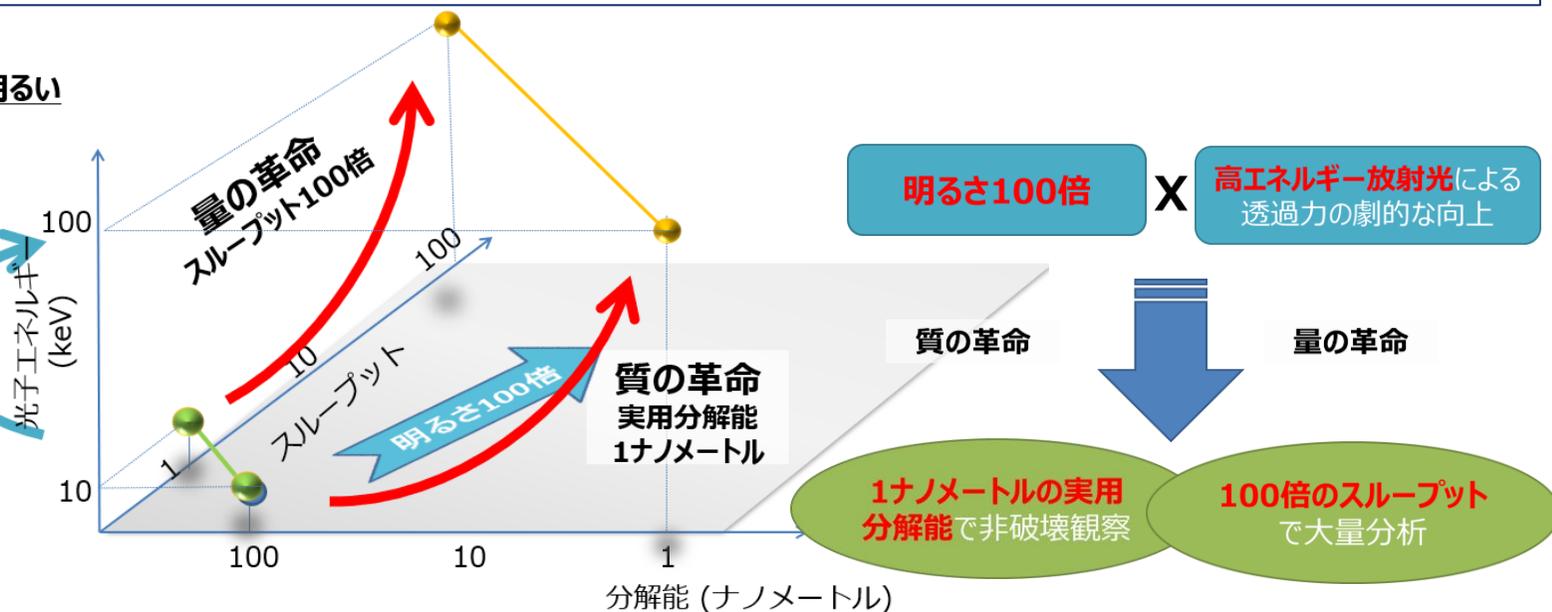
AI技術の劇的な発展などで半導体需要がさらに増加する中、技術的に世界の先端をキャッチアップ・テークオーバーし、SPring-8-IIが日本の次世代半導体開発のキラー技術の一つとなる最適時期

4-2. SPring-8-IIで実現される性能

- 現行SPring-8は実用空間分解能が50nmにとどまり、次世代半導体開発における要求を満たしていないが、**SPring-8-IIへのアップグレードにより、実用空間分解能1nmを実現**。サブナノ世代のデバイス・プロセス・集積化技術の確立への貢献が可能。
- サブナノオーダーの実用空間分解能に向けても、放射光技術の研究開発を進めていく。

**SPring-8-II: 100倍以上明るい
高エネルギー放射光を供給**

圧倒的な透過力の向上
透過可能な鋼材厚:
0.02mm@10keV
→10mm@100keV

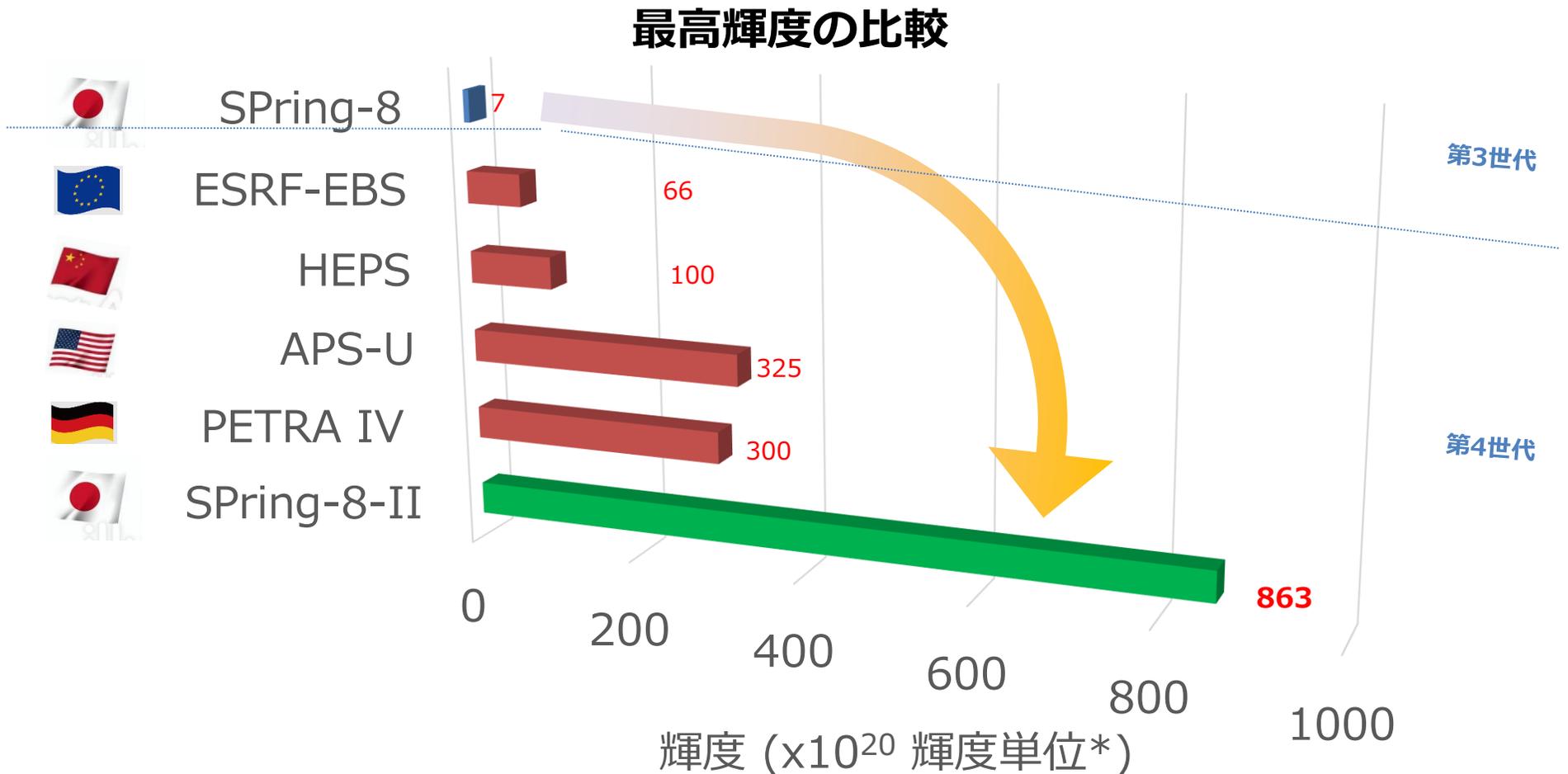


	SPring-8	SPring-8-II
エミッタンス	2.4nm · rad	0.05nm · rad
明るさ(最高輝度)	7 ph/s/mm ² /mrad ² in 0.1% b.w.	863 ph/s/mm ² /mrad ² in 0.1% b.w.
計測時間	1(相対単位)	0.01(相対単位)
実用空間分解能	50ナノメートル	1ナノメートル*
光子エネルギー	5~30 keV	10~200 keV
透過力(鉄)	0.02mm @10 keV	10 mm @100 keV

*技術的な限界値

4-3. 想定される最高輝度

- SPring-8- II へのアップグレードにより、**2位の米国に2倍以上の差を付けて、現行の100倍となる最高輝度をもつ世界最高峰の放射光施設**が実現される。



大型放射光施設SPring-8-Ⅱの整備及び 我が国放射光施設の今後の在り方に関する報告書 概要

参考添付

ポイント

第4世代の大型放射光施設SPring-8-Ⅱの整備を進めるため、量子ビーム利用推進小委員会において議論・検討を行った結果、現行の約100倍となる最高輝度を持つ世界最高峰の放射光施設を目指し、**早急にSPring-8-Ⅱの整備に着手する必要がある**、と判断。

議論・検討の結果

1. SPring-8-Ⅱの整備・利用環境の高度化を今行うことの必要性

- 世界で進む硬X線領域の放射光施設の第4世代化により、**第3世代のSPring-8が陳腐化すると、経済安全保障上の観点から大きな課題が生じる**。また、**老朽化による保守コストは年々増加し、更新費用も必要**となる。このため、**SPring-8を早急に第4世代の放射光施設へアップグレード**する。
- SPring-8-Ⅱの価値を最大化し、変化するユーザーニーズに応え続けられるよう、**利用料金の設定を含む利用制度等について不断のアップデート**を行う。
- **SPring-8-Ⅱは、2030年に本格化する次世代半導体の量産やGX社会の実現などの未来の産業を先導し、我が国の国力の持続的発展や人々の暮らしを支える重要な基盤施設**となる。
- **SPring-8は、我が国放射光施設におけるフラッグシップの位置付け**であるため、**SPring-8-Ⅱはナショナルプロジェクトとして早期に実現すべき**。



2. SPring-8-Ⅱの技術目標や開発期間

- **現行のSPring-8の約100倍の最高輝度を誇る世界トップ性能を目指し、第4世代の加速器テクノロジーや省エネルギー技術を導入**する。
- 諸外国の先行事例やNanoTerasuの整備で得られた知見を活かし、**約1年間の停止期間を含む4年間でSPring-8-Ⅱの整備**を行う。
- SPring-8-Ⅱの整備と並行しながら、**第5世代放射光施設も見据えた技術限界の突破のための取組を進めていく**。

3. SPring-8-Ⅱに向けたユーザー利用環境等の高度化

- 従来のボトムアップ型の産業利用とアカデミア利用に、**トップダウン型の戦略利用を加えた3本柱で利用を促進し、ユーザーニーズに応じて利用制度をアップデート**する。
- データ取得効率の向上やデータ量の増加に対応すべく、**データセンター利用制度のアップデート等を進める**。
- 中小企業を含む産業界の利用拡大に向けて、**公設試や近隣自治体との連携を強化し**、公設試ネットワークの形成や企業版ふるさと納税拡大に向けた取組を進める。
- **利用料金制度をアップデートし、運営費回収分に加え、施設が提供する価値相当分の受益者負担も可能となるよう**、その考え方を時代に即したものとする。

4. その他事項

- 潜在ユーザーや国民に向けて広報を行うべく、**その対象を明確化し、それぞれに対して効果的な広報を進める**。
- **放射光人材の育成・交流のため**、大学・企業・他機関等に応じて最適な取組を検討するとともに、**各機関が相互に連携していく**必要がある。
- **量子ビーム施設間のシームレスな連携を可能とする仕組みや、放射光施設の今後の在り方を政策レベルで議論する場**の必要性等について、国内放射光施設から問題意識が寄せられたことを受け、**今後、小委員会において扱っていく**。

報告書のポイント

- ◆ NanoTerasuのビームラインは**運用開始時点で18本分が未整備**の状態であり、提案のあった**ビームライン増設計画は妥当**。
- ◆ 世界最高水準の軟X線向け放射光施設の恩恵を最大限に享受するためには、**早期にNanoTerasuのビームラインの空きポートを埋めることが重要である**。

増設計画の概要

- ◆ 国側の共用ビームラインの増設計画は、**NanoTerasuの強み、ユーザーニーズ、分野多様性、新規性開拓**の要素を考慮。
 - ✓ NanoTerasuの整備期をフェーズⅠとし、**ビームラインの増設計画はフェーズⅡ、フェーズⅢ、フェーズⅣの3段階に分けることが望ましい**。
 - ✓ **フェーズⅡでは、高ユーザーニーズという観点から放射光施設の基本的な用途を持ったビームラインを5本整備**することが望ましい。これらのビームラインは既存のSPring-8で利用ニーズが高い測定手法にも対応しており、ユーザーに世界最高水準の研究機会・測定環境を提供することが期待できる。また、フェーズⅢ以降の整備が想定されているビームラインのフィジビリティスタディや技術開発にも着手すべきである。
 - ✓ **フェーズⅢ以降は状況に応じて計画を最適化**することとし、**フェーズⅢでは特殊環境下での実験ニーズに応える**ことを目的としたビームラインを増設することが望ましい。
 - ✓ 技術課題はあるが広範な分野への貢献が期待される計測技術について、**エンドステーションの研究開発を主として行うものはフェーズⅣにて整備**を行い、**ビームライン光学系等の研究開発を要するものはR&DビームラインとしてフェーズⅡから研究開発**を行いながら整備を進めることが望ましい。
- ◆ パートナー側は、NanoTerasu東側の拡張エリアにて、セキュアな環境で利用可能なビームラインの整備を検討。

小委員会からの留意事項

- ◆ 世界最高水準の軟X線向け放射光施設の恩恵を最大限に享受するためには、**早期にビームラインの空きポートを計画的に埋めることが重要**。提案された計画は、世界最高水準の軟X線向け放射光施設の恩恵を最大限に享受するための計画として妥当。
- ◆ NanoTerasuは先端を常に目指すべきであり、**技術開発を要するビームラインについてはQSTとして早期に着手することが望ましい**。
- ◆ ビームラインの増設にあたっては、**各ビームラインの特徴や強みを分かりやすくユーザーに対して示すべき**。特にSPring-8との比較・整備意図は丁寧に説明すべき。
- ◆ NanoTerasuのパフォーマンスを最大化するためには**既存ビームラインの高度化**も必要。自動化・遠隔化等の**研究環境整備**や**整備状況のユーザーへの情報発信**、運営・高度化を担う**人材の確保・育成**にも取り組む必要がある。

	フェーズⅠ (整備期)	フェーズⅡ	フェーズⅢ	フェーズⅣ
整備期共用BL(グループ1)	建設・整備	高度化		
高ユーザーニーズ共用BL(グループ2)	早期に実現が求められる計画	検討 建設・整備	状況に応じて計画を最適化	
応用拡大共用BL(グループ3)		フィジビリティスタディ	建設・整備	
先端利用共用BL(グループ4)		既存BLにおける技術開発		建設・整備
R&D BL		研究開発	建設・整備	共用化

コアリジョンBL (フェーズⅠ) 7本

共用BL (フェーズⅠ) 3本

共用BL (フェーズⅡ) 5本

05W: X線分光

11W: イメージング

12U: イメージング

12W: XAFS

13W: X線回折

※ポート位置は一例。

