

**SPring-8シンポジウム2023**

# **SPring-8-II計画の概要**

理化学研究所 放射光科学研究中心  
矢橋 牧名

2023年9月26日 大阪大学豊中キャンパス

# 目次

- SPring-8の現況
- 世界の情勢
- SPring-8-II計画
- 想定性能・スケジュール
- ナノテラスとの相補性
- ユースケース
- 新たな利用の仕組みに向けて

# 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、年間論文数 1000報以上

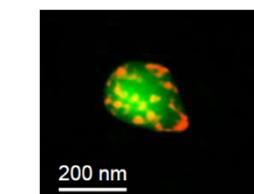
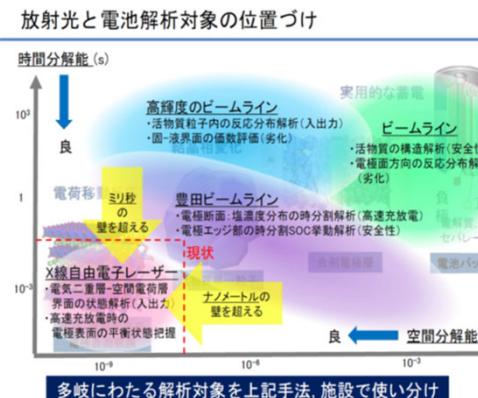
## 先端構造解析とシミュレーション研究から生まれた最高グレード低燃費タイヤ



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

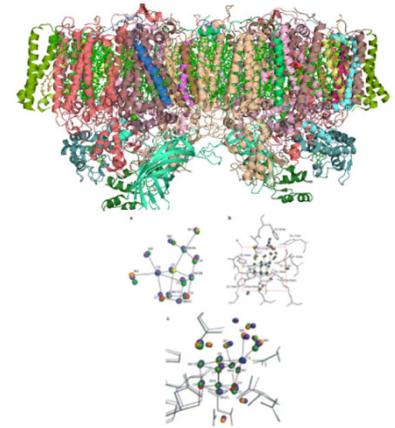
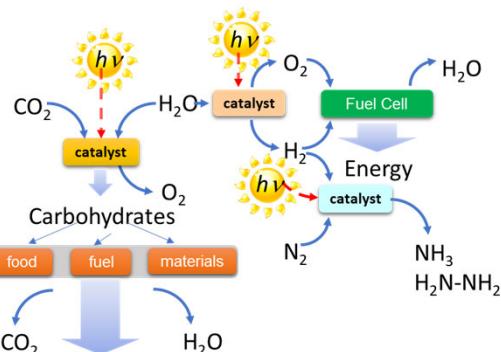
「2017年日経地球環境技術賞」最優秀賞

## 次世代の蓄電池開発



SACLAによって、固体電解質粒子内の結晶を無損傷で評価

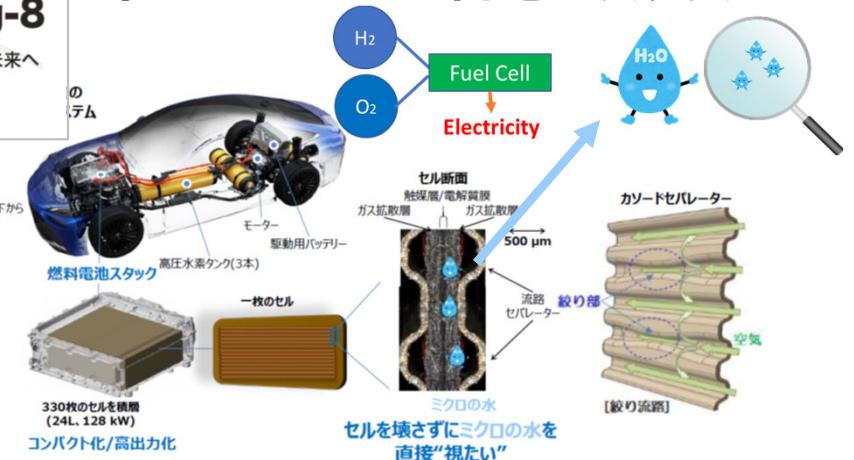
## 世界に先駆けたPSII構造・機能の解明



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

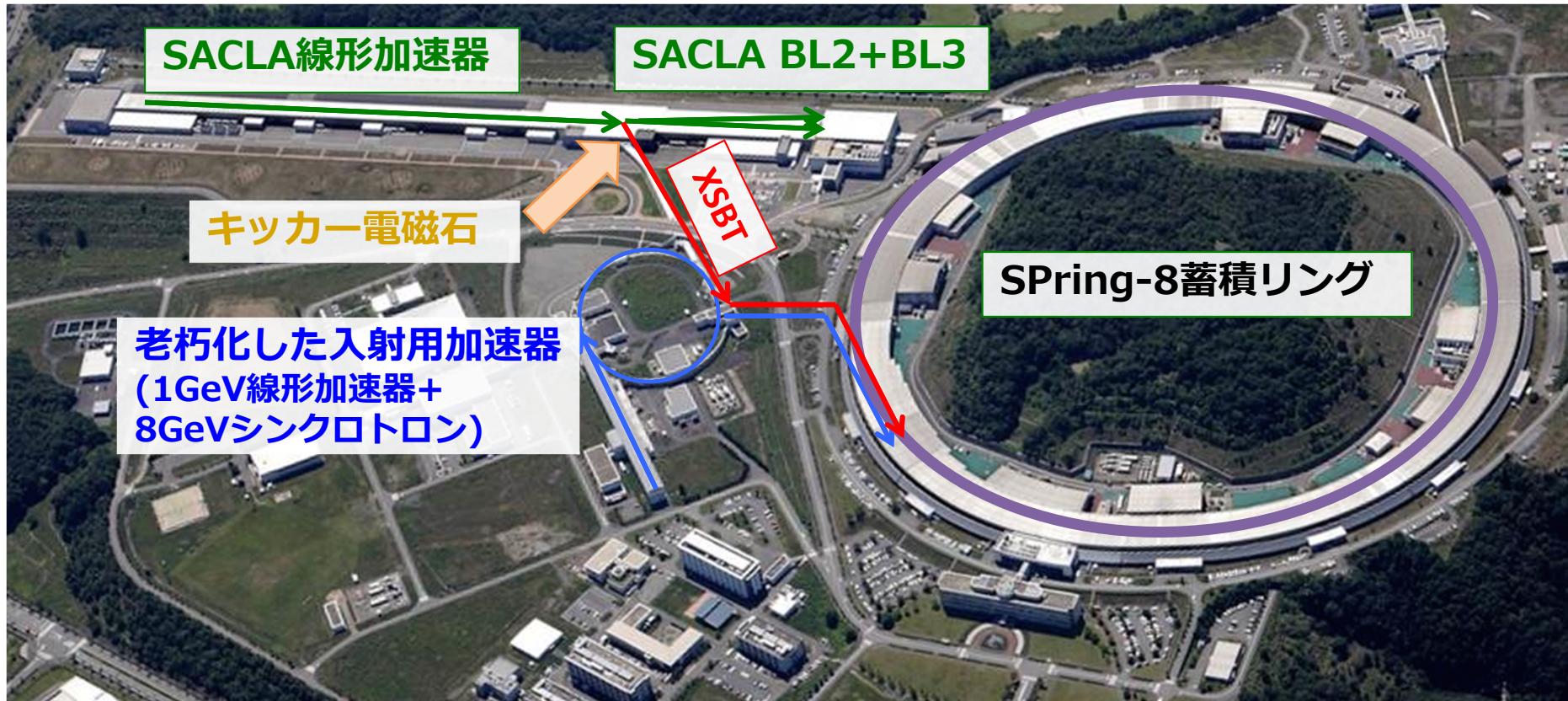


SPring-8の世界最高性能の放射光を使って、ミクロンサイズの水の排出とガス拡散を促進する絞り流路形状による高出力化を検証

# SPring-8のあゆみ

1988年10月	原研理研SPring-8共同チーム発足
1989年6月	播磨科学公園都市が設置場所として選定される
1991年11月	SPring-8建設開始
1997年3月	最初の放射光発生を確認
1997年10月	<b>SPring-8共用開始</b>
2000年1月	New SUBARU利用開始
2001年2月	長尺アンジュレータの稼働開始
2002年11月	低エミッタンス運転のユーザー供用開始 (6 nm.rad -> 3 nm.radに半減)
2004年5月	トップアップ運転開始
2004年7月	XFELプロトタイプ機 (SCSS試験加速器) 建設開始
2006年4月	SACLA建設開始
2011年6月	SACLAでX線レーザーの発振に成功
2012年3月	SACLA共用開始
2019年3月	NanoTerasu建設開始 (理研・JASRIが加速器の設計・建設に全面協力)
2019年	SPring-8ビームラインの再編を開始
2020年	New SUBARU 入射用1GeV線形加速器建設 (NanoTerasu入射器のプロトタイプ)
2020年9月	<b>SACLA加速器からSPring-8蓄積リングへのビーム入射の試験利用を開始</b>
2021年4月	<b>SACLA加速器からのビーム入射を定常化し、老朽化した旧入射器を廃止</b>
2022年	SPring-8データセンター整備

# SACLA加速器からの電子ビーム入射 (2021年4月)



老朽化した旧入射器の運用を停止し、SACLA線形加速器を新たな入射器として利用



- 4.7 MW (全体の17%) の電力削減
- 旧入射器本体・付帯設備の更新費用を削減
  - 高性能な入射性能を確保

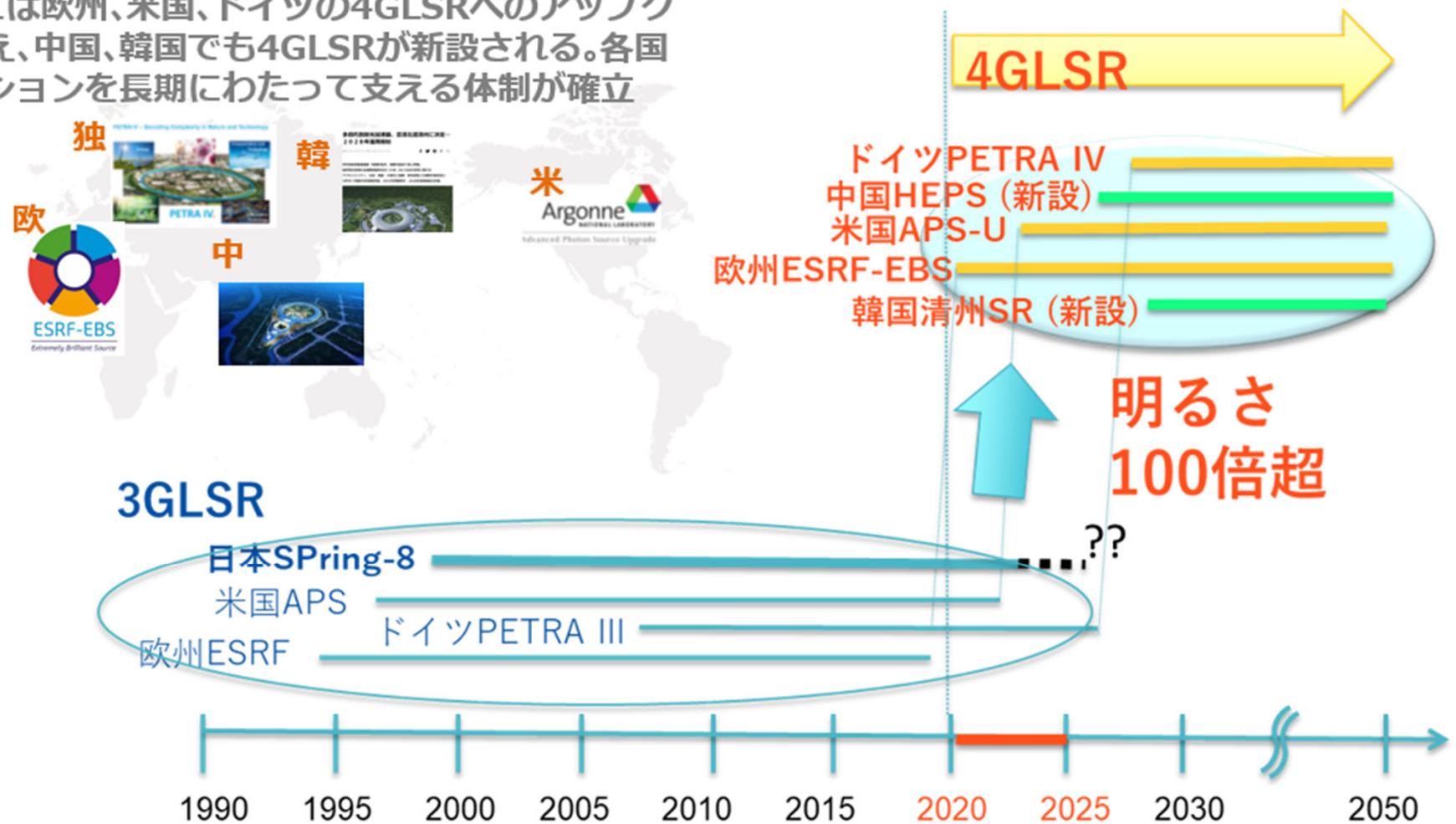
## 課題

- 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？



## 環境の激変

理化学研究所  
五神真理事長

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

# まとめ:SPring-8-IIとTRIPによる成長機会の創出



理化学研究所  
五神真理事長

## SPring-8-IIでは

世界最先端の大型研究基盤とそこに集積する卓越した研究と産業の協働により、知をベースとした新しい成長機会創出のモデルとする

- 基礎科学を起点として社会的インパクトにつなげる
- 半導体戦略、GX・DXの加速等、国の戦略研究を強力に牽引

### 地球規模の課題 ＝成長機会の源泉

カーボンニュートラル、  
次世代半導体戦略、  
経済安全保障など乗り越  
えるべき難題が山積

今こそ  
科学技術  
の出番！

### 理研の卓越した研究

理研の総合力を武器として、  
知の領域・分野を越えて効果的に生み出す  
新たなプラットフォーム(TRIP)構築

- SPring-8-IIによるデータ供給基盤の整備
- SPring-8-IIの輝度向上等の性能向上

日本が世界に貢献  
しながら、日本の  
成長につながる

最先端サイエンスの  
迅速な社会実装が急務の  
今だからこそやるべき

SPring-8-IIは最も重要な  
世界最高の先端基盤施設

新たな産官学融合の場を構築

データ駆動の新しいサイエンス、サイバー・フィジカルの再融合

# 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>

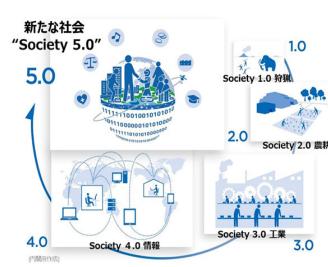
# SPring-8-II計画

- 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)

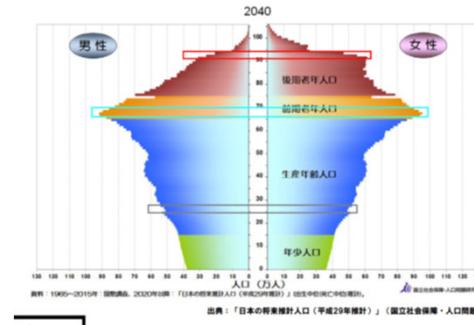
## 国家的重要課題と社会の要請に応え続けるSPring-8-II

Society5.0

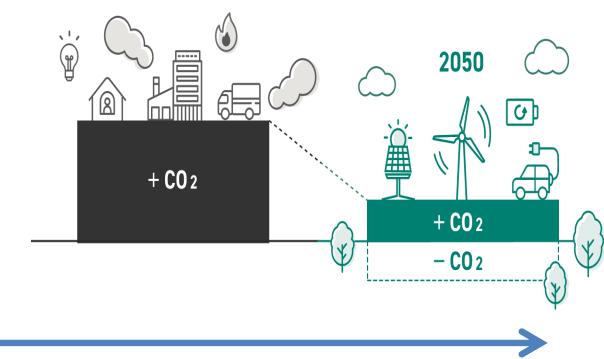
経済安全保障 インフラ老朽化



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<sup>®</sup>性能を、大幅な省エネと両立させ、省コストで実現

## 省エネ

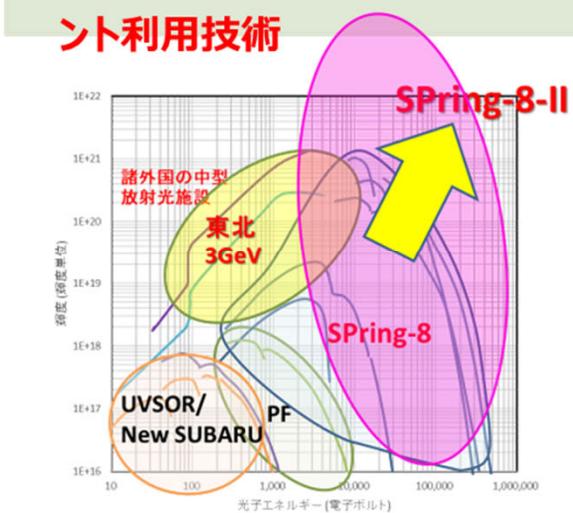
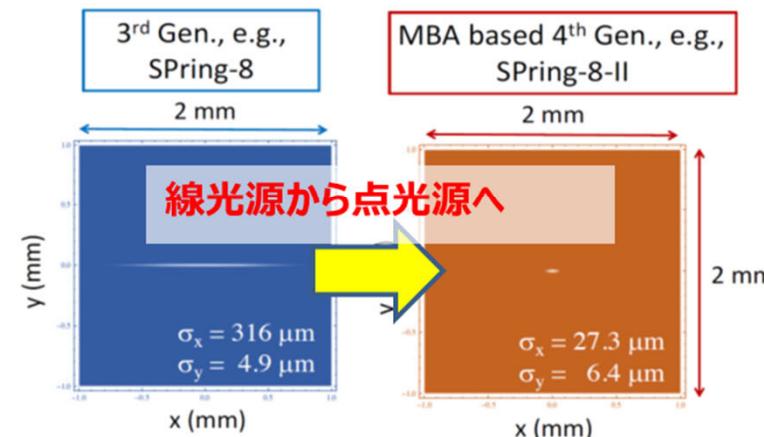
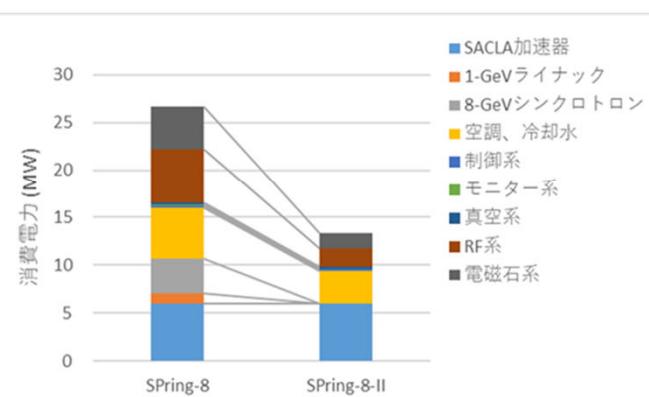
- 加速エネルギーの低減 (8GeV → 6GeV)
- 偏向部の永久磁石化と  
冷却系の負荷低減
- 既存入射器の停止

## 加速器テクノロジー

- マルチベンドアクロマット(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<sup>®</sup>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

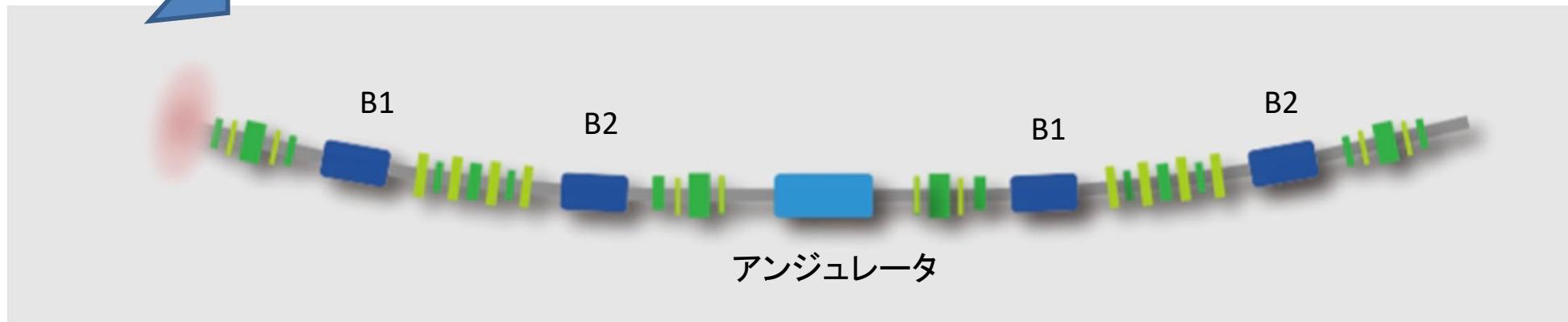


# 加速器テクノロジーの革新



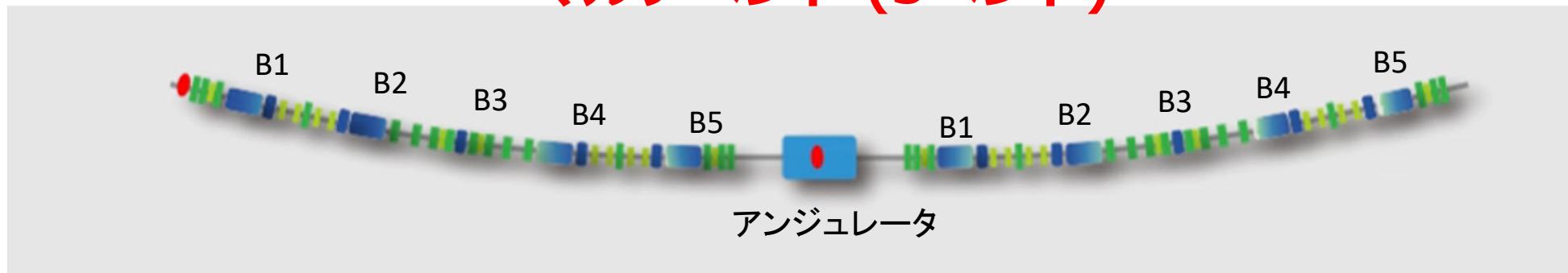
電子ビームを小さく絞る → 輝度が上がる

## ダブルベンド（2ベンド）

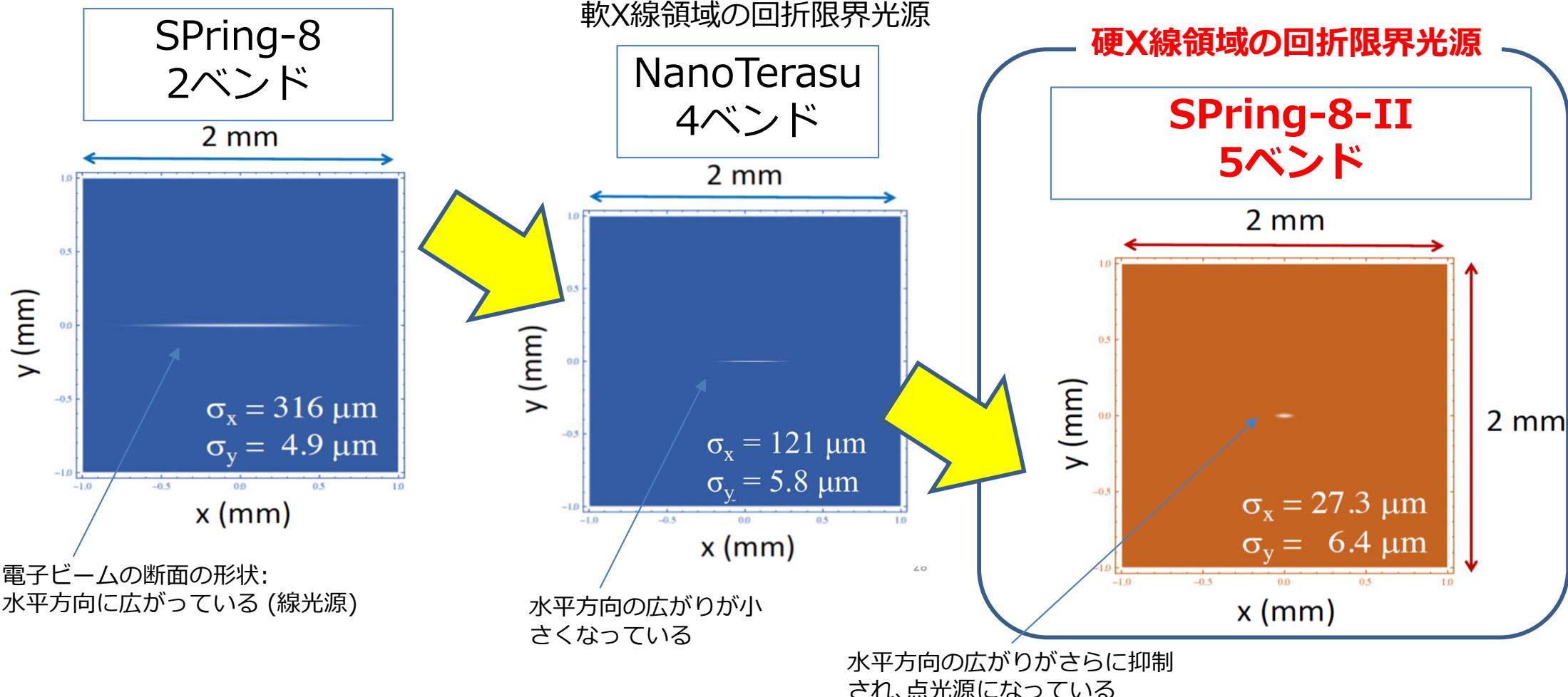


A large, yellow downward-pointing arrow with a dark blue border.

## マルチベンド（5ベンド）



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



# 加速器テクノロジーの革新

## 超低エミッタスを実現する磁石システム

- 永久磁石を利用した分割型の偏向磁石システムを開発し、**超低エミッタスと安定性で世界トップ性能**を狙う
- ナノテラス向けの技術開発の成果もフィードバックし、確実に目標を達成



## 小型真空封止アンジュレータ (IVU-II)

- 我が国発の真空封止アンジュレータ技術をさらに発展させ、小型化・安定化を実現
- 6GeVリングから高エネルギーX線を生成するための、磁石列の短周期化技術



## SACLAを活用した高効率入射システム

- アクセプタンスの小さいMBAリングに対して、高い効率でビーム入射をすることは、最も難しい課題の一つ
- SACLA入射により、**既に本課題を解決済み**



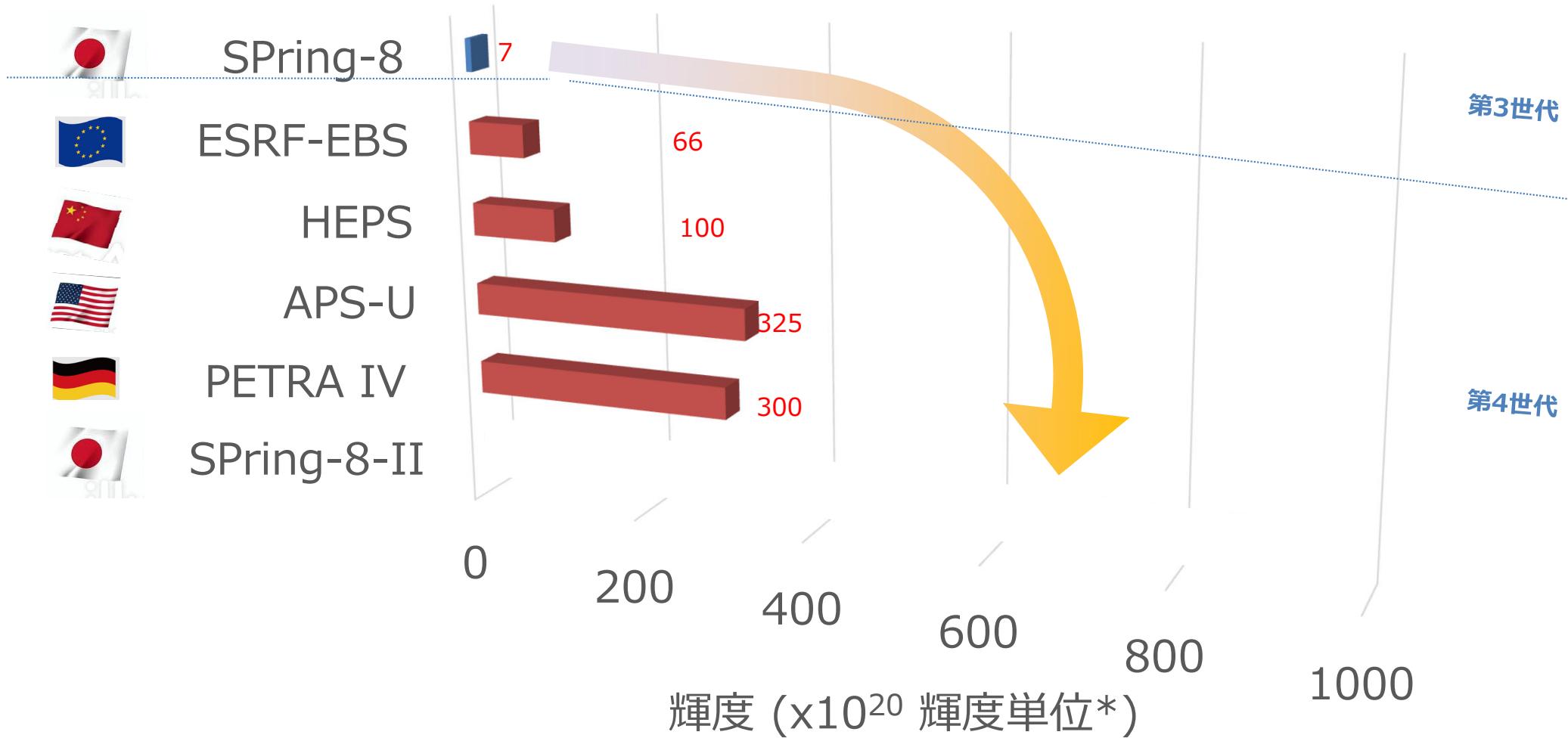
## 世界唯一の長直線部の活用

- SPring-8蓄積リングは、世界で唯一30m長直線部(x4)をもつ
- ダンピングウイグラーを導入することにより、**エミッタスを50pm.radに半減**
- 長尺アンジュレータにより**世界最高輝度**を達成
- 将来のリング型XFELへの活用



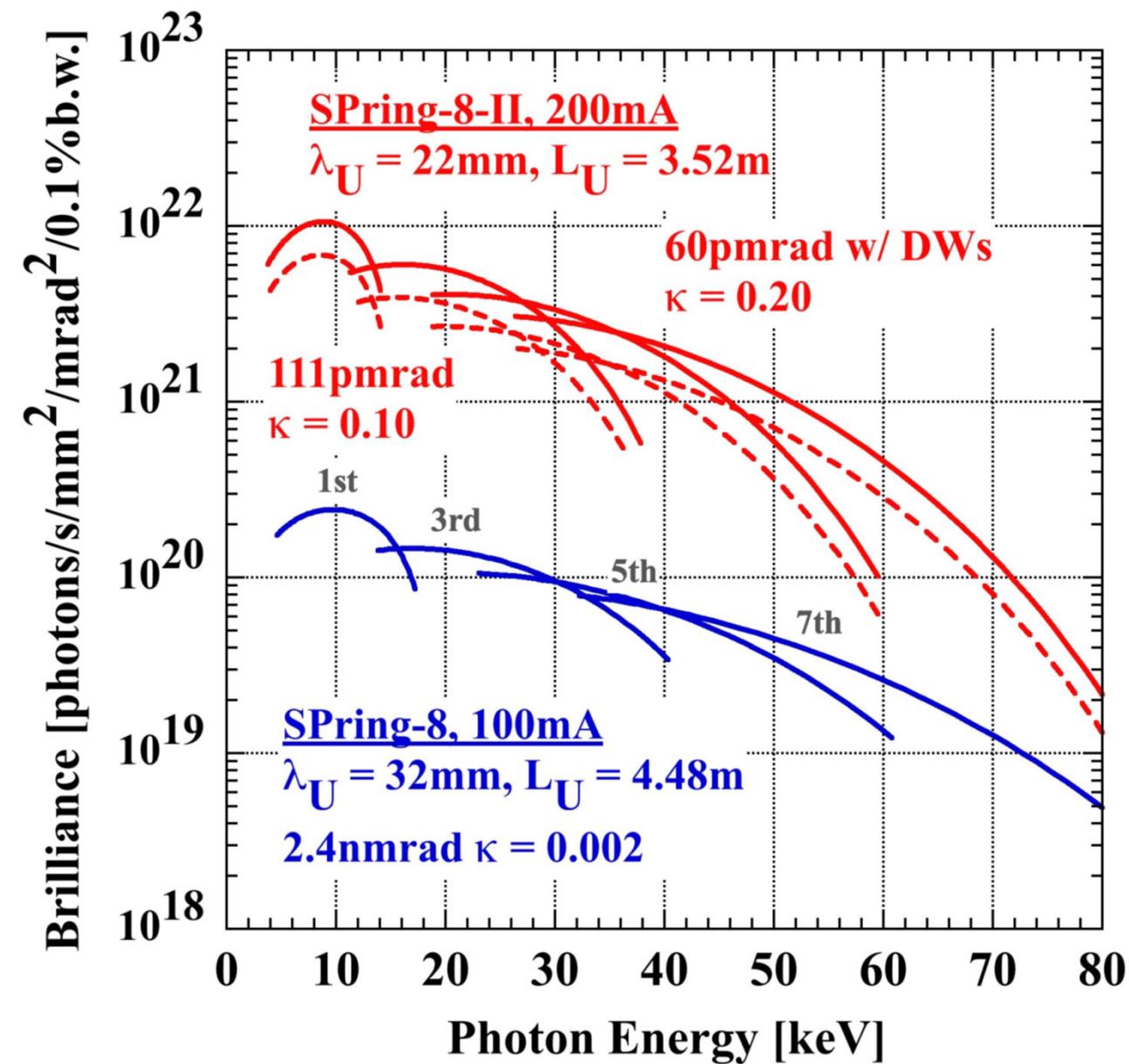
# 国際比較

## 最高輝度の比較

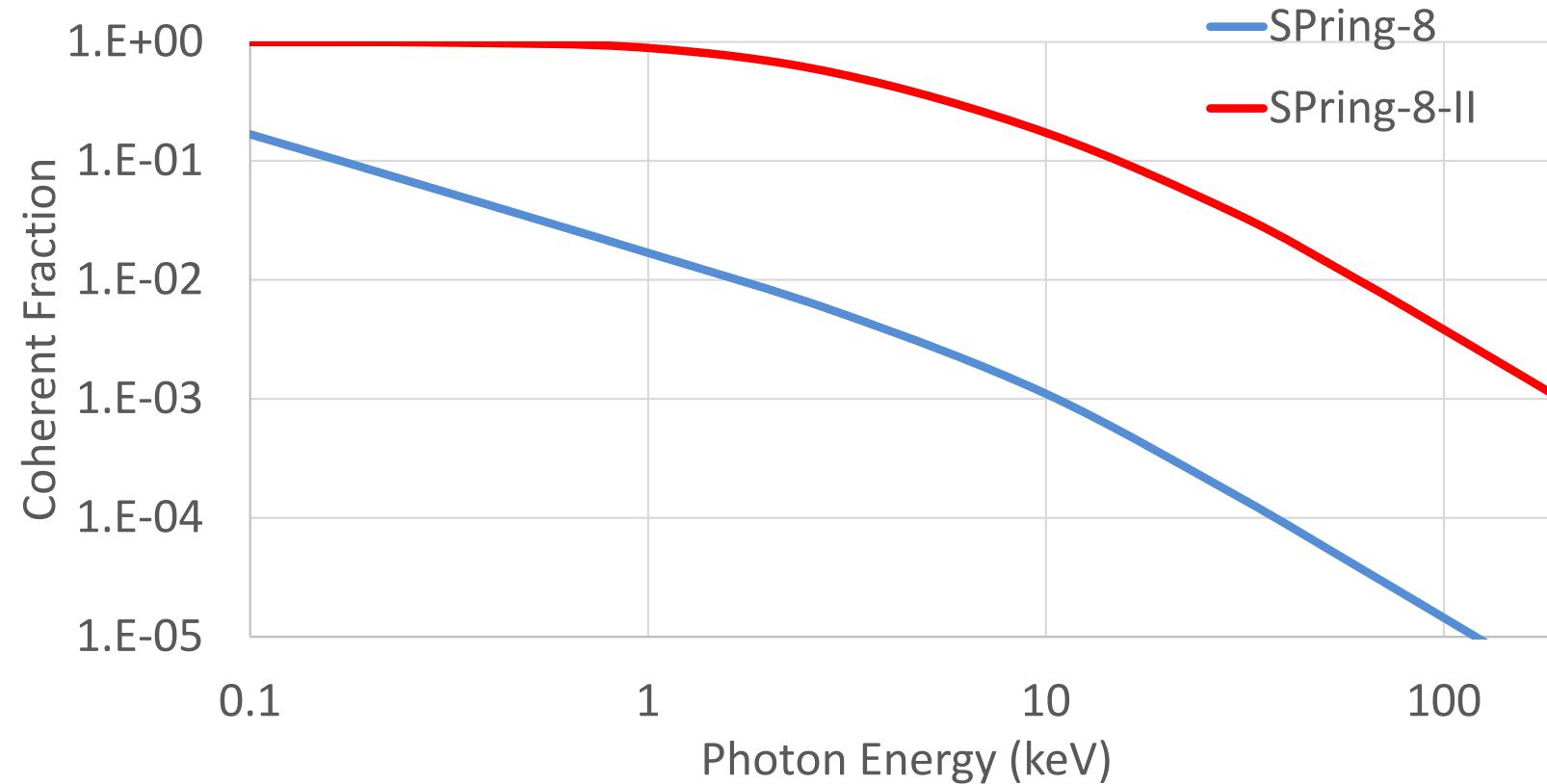


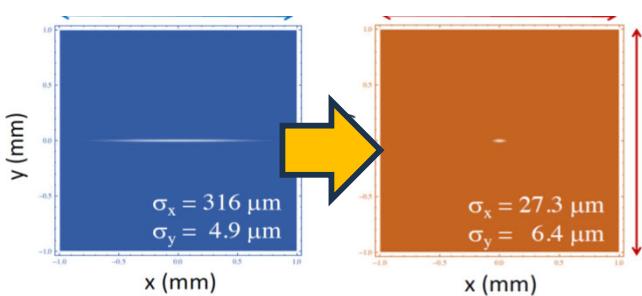
\*輝度単位:  $\text{ph}/\text{s}/\text{mm}^2/\text{mrad}^2$  in 0.1% b.w.

# アンジュレータ

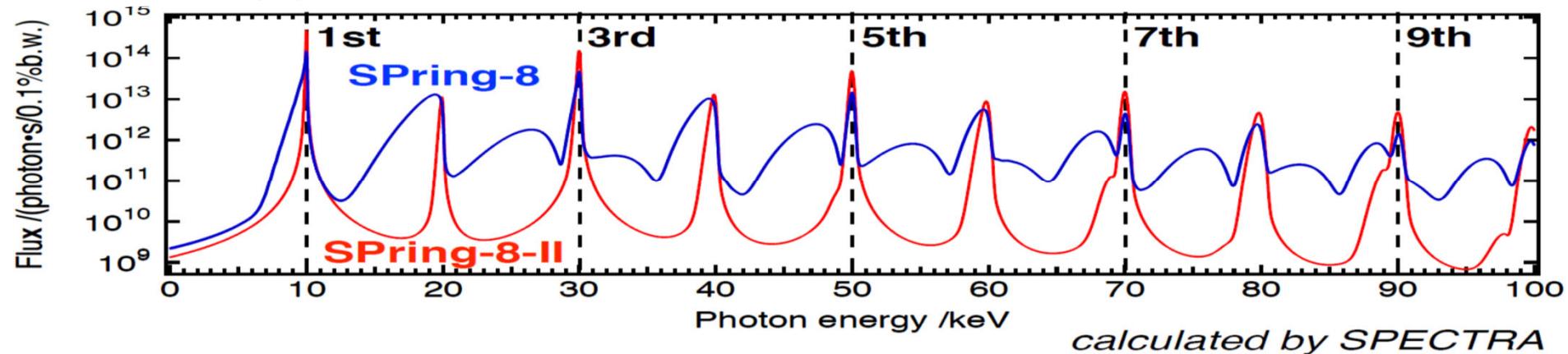


# Coherent fraction (1/空間モード数) の比較



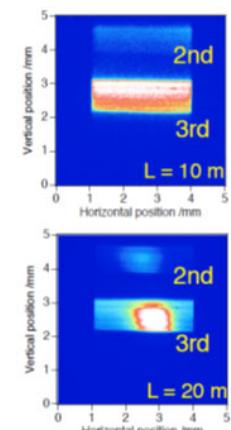
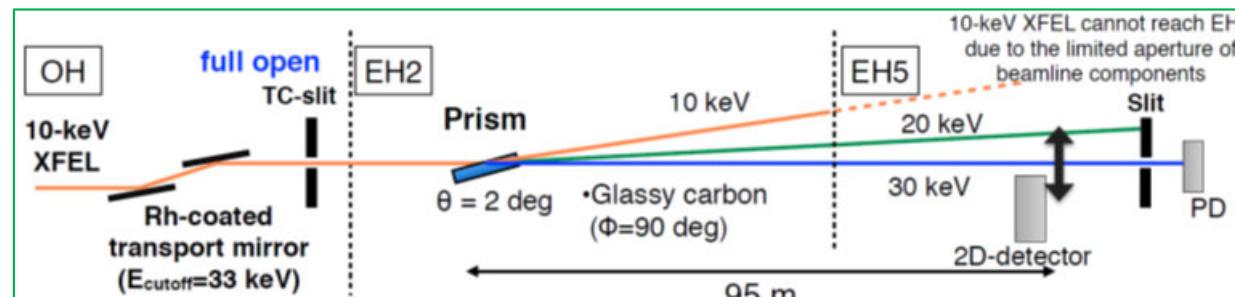


# 大強度ピンクビームの利用



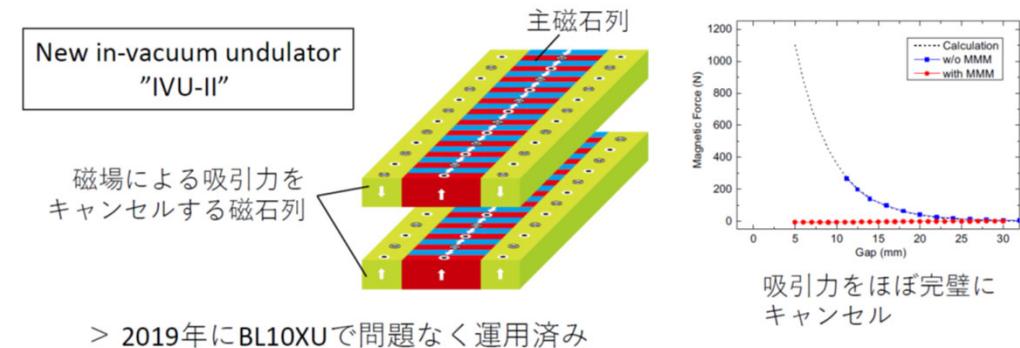
- 線光源から点光源へ: オンアクシスで軸外成分が混入しなくなる → スペクトルの切れが劇的に改善
- 特定の次数を取り出すことで、大強度の高エネルギーピンクビームが利用可能に → フラックス2桁以上増
- 多層膜分光器とともに、簡便なハーモニックセパレーターを開発
- バンチ運転との組み合わせの可能性 (~1 mA/bunch)

Inoue et al. JSR 25, 346 (2018)



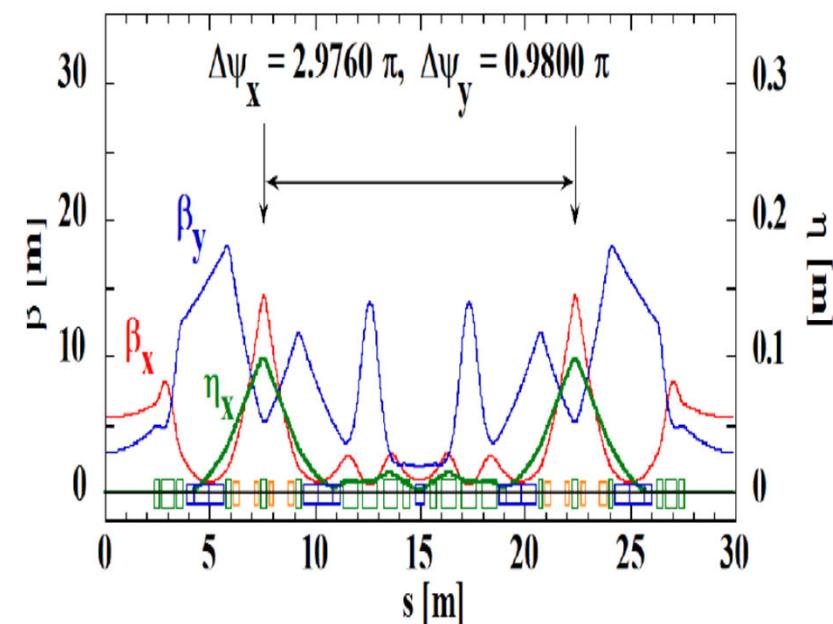
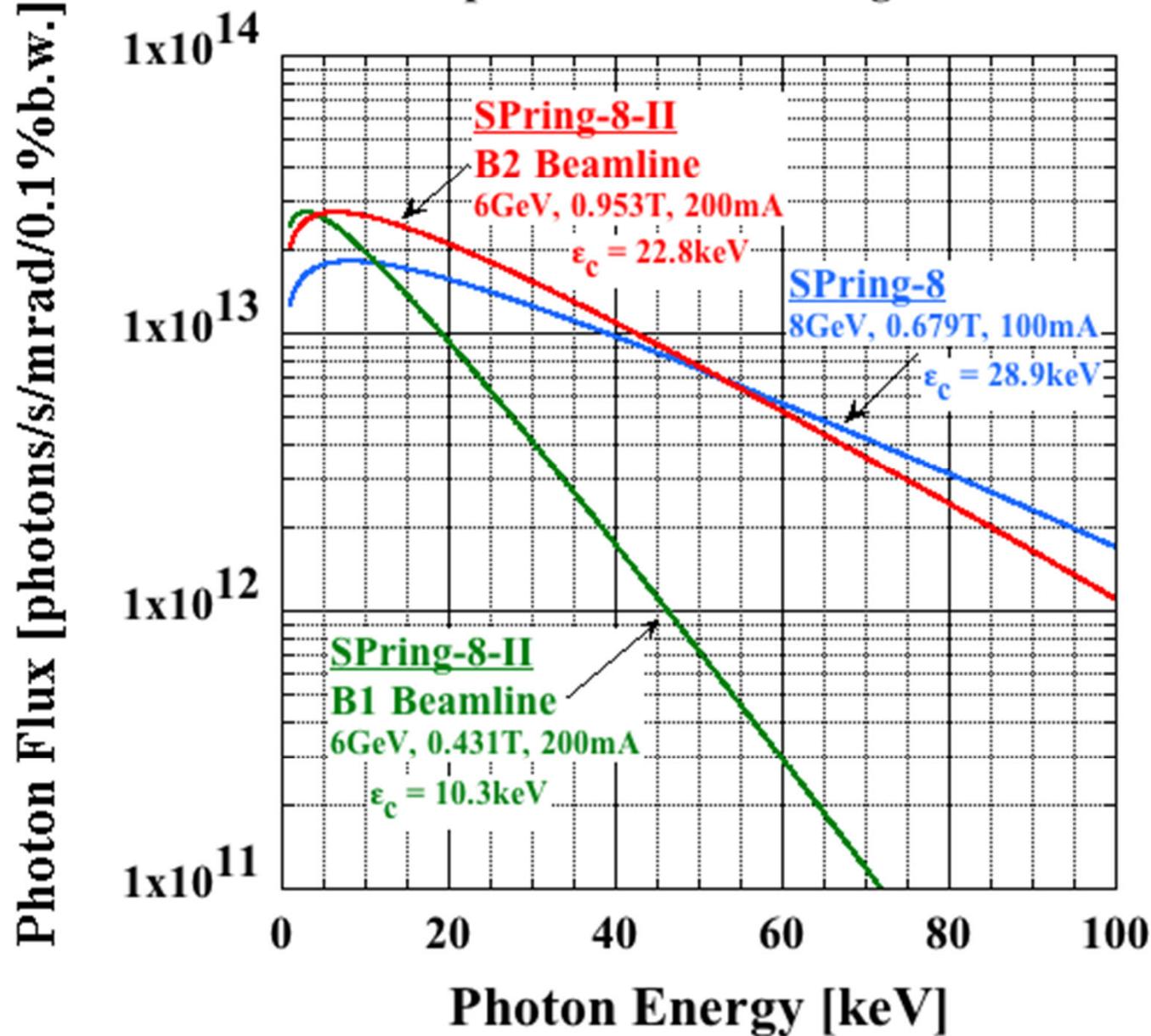
# 挿入光源

- SP8-IIでは、挿入光源は要更新
  - 直線部の短縮（約2割減）
  - $8 \rightarrow 6 \text{ GeV}$ : 短周期化
- 台数が多いので、現SP8から入れ替えをはじめる必要がある
  - 先行分については、周期長28mmのIVUを中心に実施
- 真空封止アンジュレータ IVU-II
  - 磁場による吸引力をキャンセル
  - テーパー型も開発中
- 軟X線用Helical-8アンジュレータ
  - 軸上熱負荷を抑制しながら、円偏光、鉛直/水平直線偏光を選択可能
  - BL17SUにて順調に運用中
- 長直線部ダンピングウィグラー：高エネルギー白色X線光源としての利用可能性



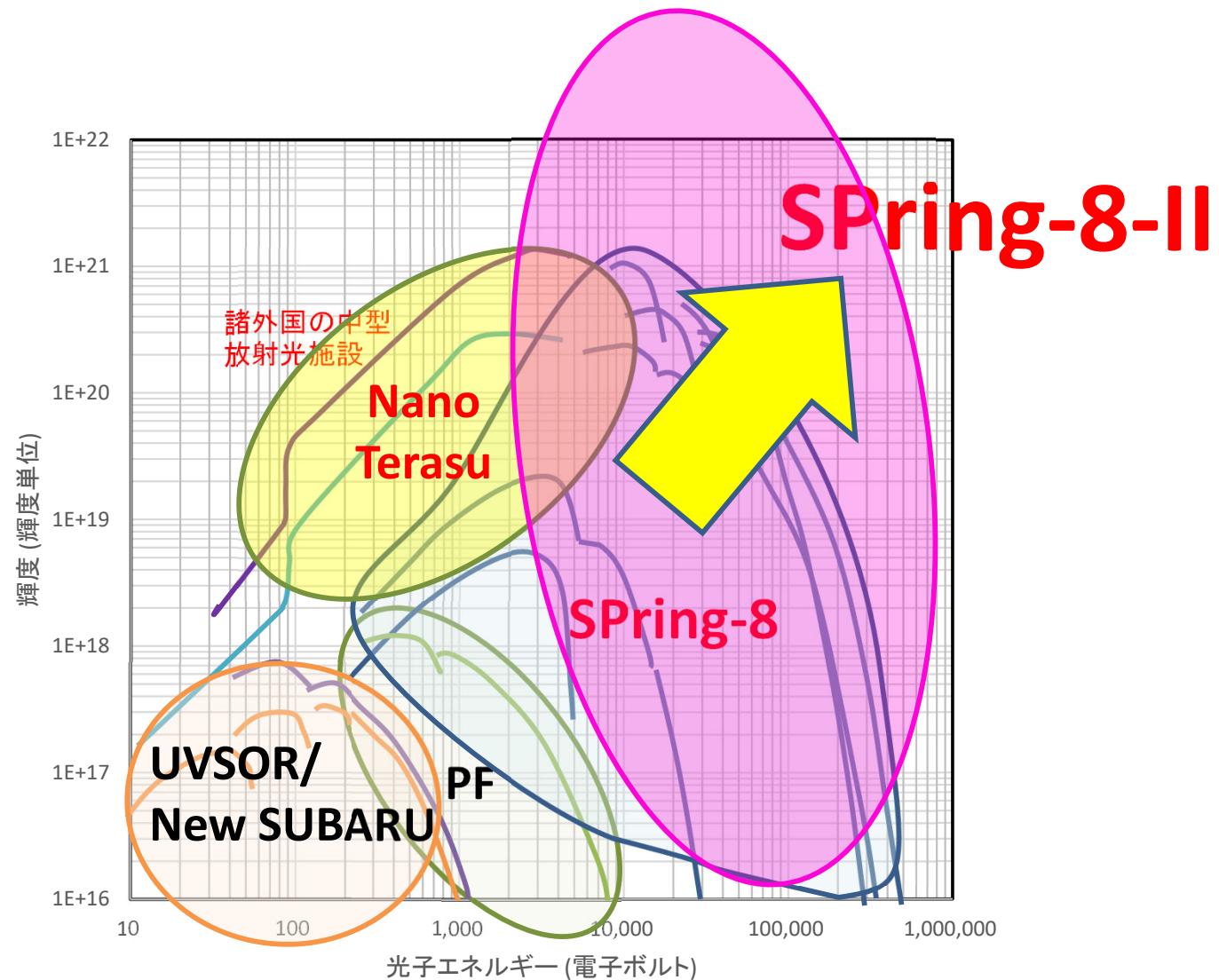
# 偏向~~電~~磁石光源

Photon Flux from Bending Magnets  
per 1mrad Orbit Angle



「B2」ライン: BM3の磁場を強めることにより、6GeVでもCritical photon energyを高く保つことが可能に ( $28.9 \rightarrow 22.8\text{ keV}$ )

# 国内の位置づけ

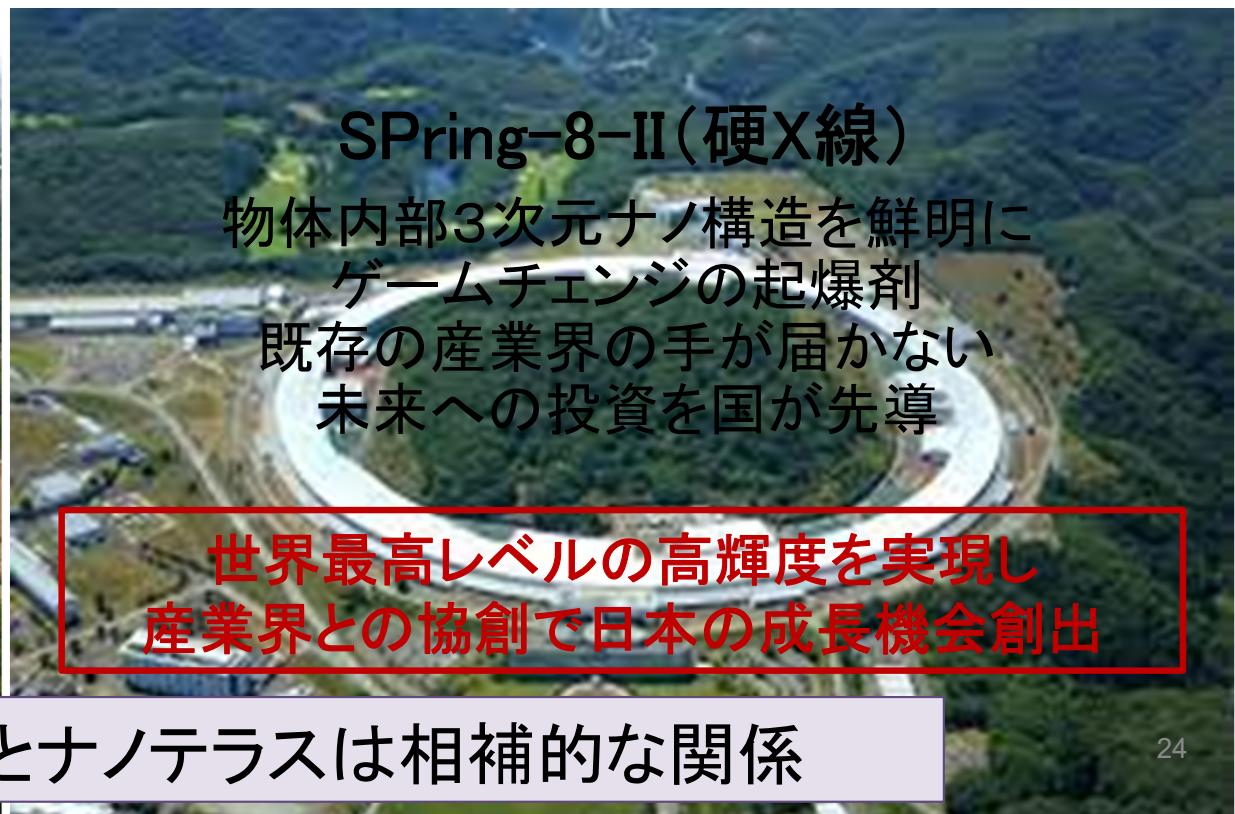


# SPring-8-IIとナノテラスの相補性

	米国	欧州	中国	韓国	日本
<b>卓越性(硬X線)</b> 物体内部ナノ構造の 非破壊分析 / 重元素分析	APS-U (アルゴンヌ)	ESRF-EBS /PETRA-IV	HEPS (北京)	OASIS (清州)	SPring-8-II (播磨)
<b>汎用性(軟X線)</b> 表面化学反応の精緻分析 / 軽元素分析	ALS-U (バークレー)	MAX IV、 SLS2.0 …	HALS (合肥)	PLS-III (浦項)	ナノテラス (仙台)

→ 高輝度であるほど精緻な分析が可能

赤字:稼働中、建設中/青字:計画中



SPring-8-IIとナノテラスは相補的な関係

# 今後のスケジュール（想定）

2024(R6)年度

2025(R7)年度

2026(R8)年度

2027(R9)年度

2028(R10)年度

2029(R11)年度

プロジェクト開始  
プロトタイプ製作ほか  
(SPring-8高度化開発費)

整備・建設期間（4年間）

（運転停止期間：約1年）

SPring-8-II  
共用開始

（整備内訳）

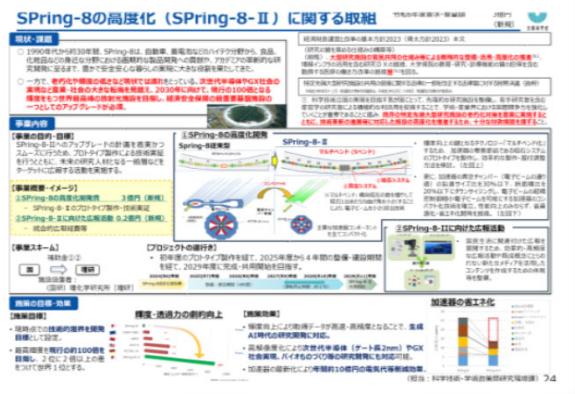
磁石システム整備

電源システム整備

真空機器整備

制御システム整備

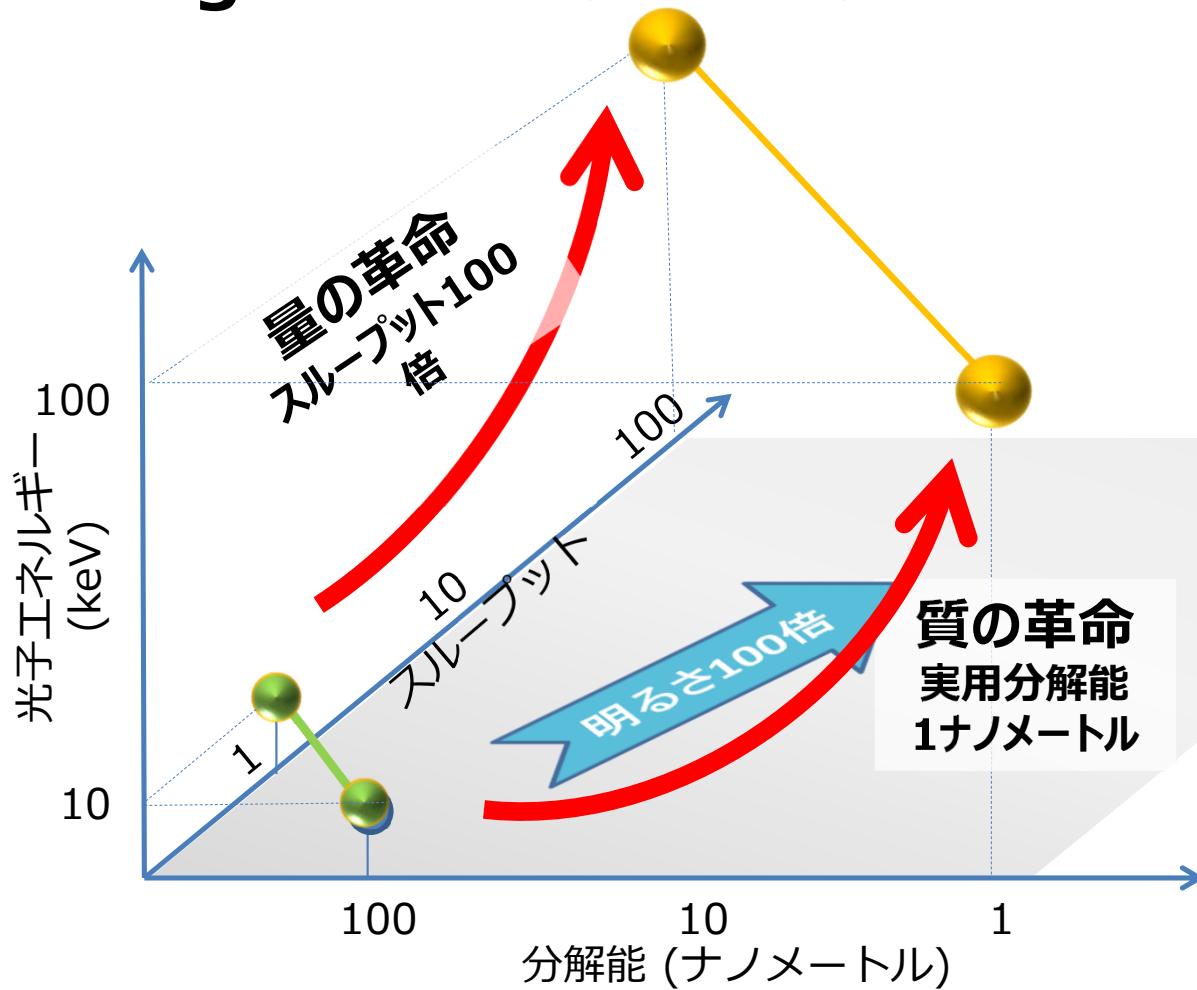
ビームラインアップグレード



# 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



	<b>SPring-8</b>	<b>SPring-8-II</b>
エミッタンス	2.4nm · rad	0.05nm · rad
明るさ(最高輝度)	$7 \times 10^{20}$ ph/s/mm <sup>2</sup> /mrad <sup>2</sup> in 0.1% b.w.	$863 \times 10^{20}$ ph/s/mm <sup>2</sup> /mrad <sup>2</sup> 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

## 質の革命：モノの中身を精緻にみて、イノベーションを創出

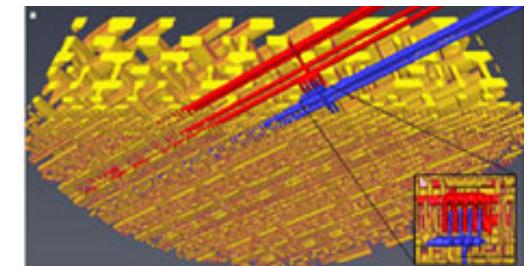
- ・何が起こっているかはわかっていても、なぜ起こるかわからない現象はたくさんある
- ・従来をはるかに超える**分解能と透過力**で、**モノを壊さずにナノ観察**→ 新たな学理を構築し、「なぜ」を解明 → イノベーションの創出へ

### 半導体

**【現在】**分析可能なロジック半導体はミドルレンジ(40ナノメートル)どまり

#### **[SPring-8-II]**

- ・**1ナノメートルの実用分解能**で、非破壊3次元解析を可能に
- ・ハイエンド(線幅5~16 nm)に加え、2nmノード世代以降も分析対象に。3次元構造にも対応
- ・超微細化の choke point を検証しながら、克服するための技術開発に貢献
- ・半導体戦略・経済安全保障に不可欠の分析ツール



Holler et al., Nature 2017

### 製造・発電プロセスの低炭素化

**【現在】**高温下における燃焼分布・反応分布の研究は、シミュレーションに頼るしかない

#### **[SPring-8-II]**

- ・明るい**高エネルギーX線**を使って、炉中の燃焼反応の温度・空間分布・時間変化をリアルタイムで可視化
- ・極端環境下における反応プロセスに、実験的な知見をはじめて与え、シミュレーションの信頼性を飛躍的に向上させる
- ・水素還元製鉄やアンモニア発電をはじめとする脱炭素化・低炭素化技術について、実用化時期の10年前倒しを実現する



# ユースケース

## 量の革命:データ駆動で始まる新しいサイエンス

SPring-8-IIは、マルチスケール・マルチモーダルな計測が短時間で行われ、得られたビックデータをオープンな環境で大勢の研究者が連携協力しながら研究活動を行う【データ駆動で始まる新しいサイエンス】の中核となる



# ユースケース

## 量の革命: 大量計測とビッグデータ解析により、課題を解決

- 明るい放射光とDXを活用した大量計測により、**分析のターンオーバー期間を劇的に短縮**
  - 3年間かかっていた計測を5日間に短縮
  - ビッグデータ解析を援用しながら、課題を迅速に解決

## 部品・製品の品質管理

**【現在】** 部品・製品のリコールコストは、国内全産業で年間数兆円以上(推定)。故障解析のニーズは極めて高いが、オーダーを受けてから分析着手まで約半年、結果が出るまで約1年かかる

### **[SPring-8-II]**

- 大量の部品の迅速計測が可能に
- 故障・トラブルの兆候があったときに、オンデマンドでナノレベルの非破壊分析を実施。オーダーを受けてから3日間以内に迅速に原因を特定
- リコールリスクを年間数千億円規模で圧縮し、国内製造業の体力基盤の強化に資する



## 土木・建築インフラ

**【現在】** 各種インフラ(道路、橋、建物等)の保守・維持管理について、サイエンスに基づく合理化が急務

### **[SPring-8-II]**

- 全国の地方自治体・関連企業・機関と連携しながら、大量のインフラ系試料を収集し、内部構造を非破壊で分析。劣化と経年・環境との相関を調べることにより、網羅的なデータベースを作成
- ミクロの科学とマクロの安心安全をつなぎながら、インフラ維持管理コストを年間数千億円以上削減



# SPring-8 利用制度の進化

SPring-8



個々の会社による放射光利用

- ・JASRI産業利用推進室
- ・兵庫県ビームライン

業界団体を対象に、業界内の大問題に取り組む

- ・産業界コンソーシアム
- ・NEDOビームライン(RISING他)

業界団体と学術グループの連携研究

- ・SPring-8が、産業界(課題の提示:材料開発・製造プロセス)と知・学術(解決法の探求:基礎・応用研究)をつなぐ



NanoTerasu

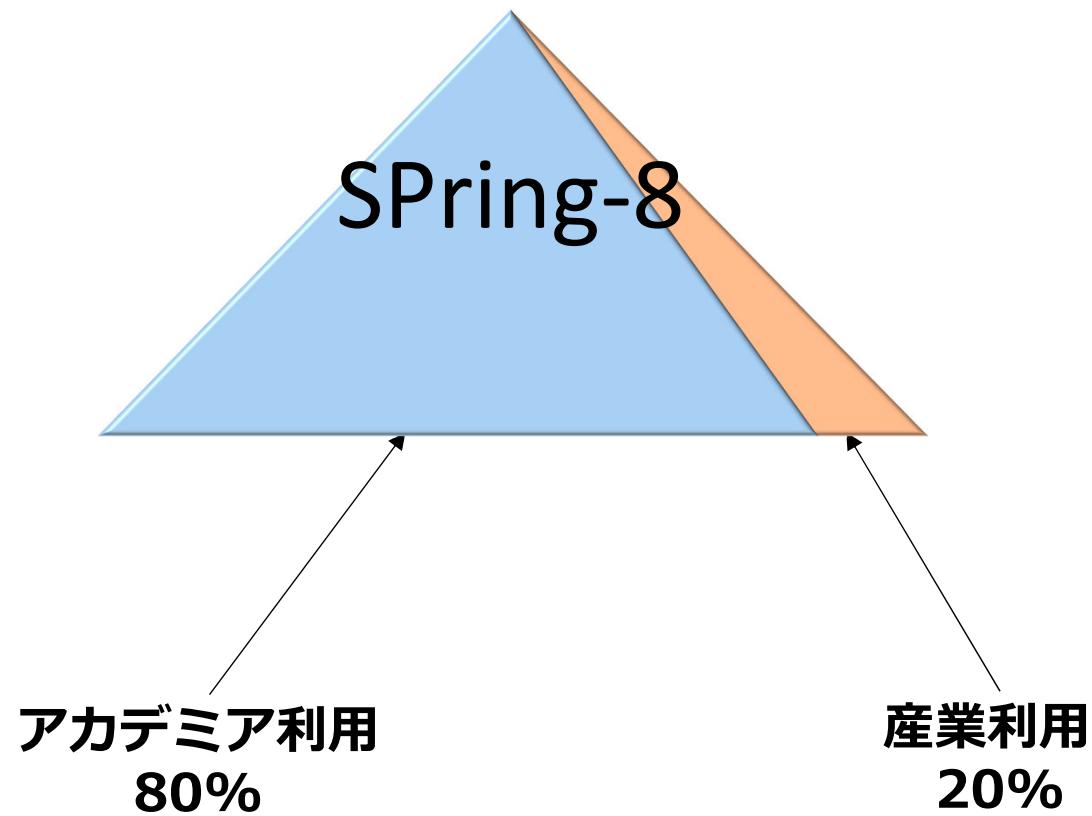


コアリションコンセプト

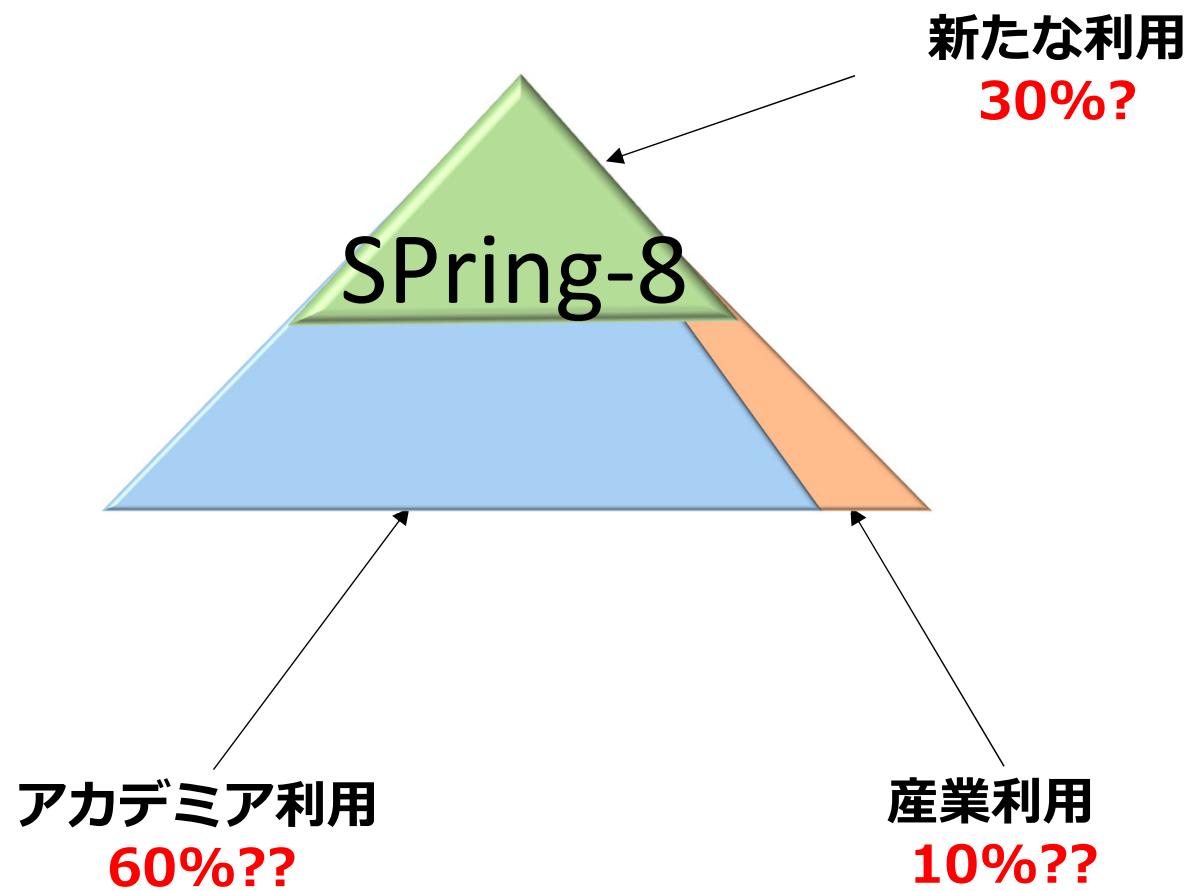


そして  
SPring-8-II へ

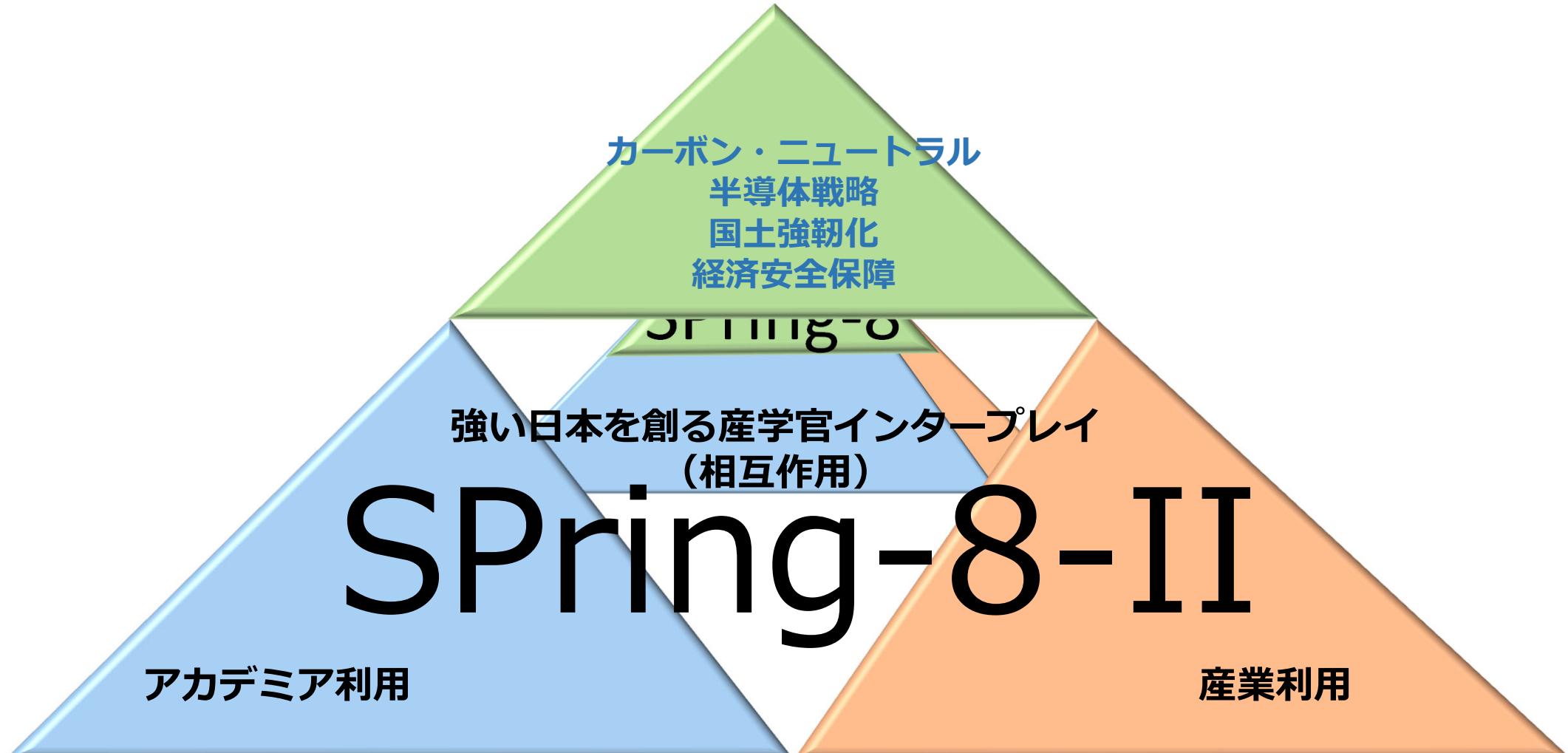
# 現在の利用制度



# 新たな利用スキーム?



# SPring-8-IIによる「総枠」の大幅な拡大と新たな利用



# SPring-8-IIに向けて

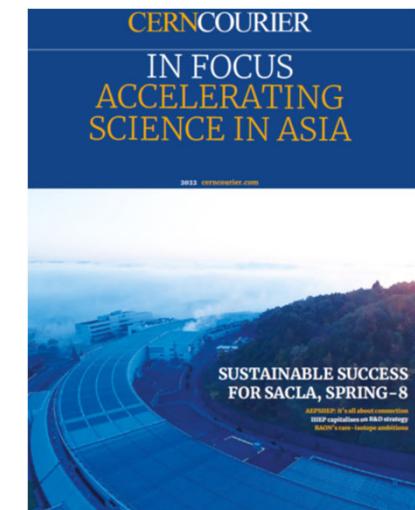
- ニーズ調査（計画中）
- SACLA/SPring-8基盤開発プログラム

2023年度 SPring-8 7件

- 高橋 幸生（東北大）「次世代画像検出器CITIUSを搭載したタイコグラフィ計測システムの開発」
- 志村考功（大阪大）「ハイスループットX線トポグラフィ装置の開発」
- 澤 博（名古屋大）「挿入光源X線に対応する高精度回折強度測定技術の基盤開発」
- 斎藤 真器名（東北大）「CITIUSを用いた $\mu$ eV分解能のガンマ線準弾性散乱測定系の高度化」
- 矢代 航（東北大）「準単色アンジュレータ放射光のための試料回転なしX線CT光学系の開発」
- 伊與田 宗慶（大阪工業大）「抵抗スポット溶接時における接合部形成現象の動的観察システムの開発」
- 関山 明（大阪大）「光電子二色性による対称性の破れ検出における安定的高スループット化のための基盤技術開発」

# まとめ

- SPring-8-II:最先端加速器テクノロジーに基づく、**世界一の放射光施設を整備**(輝度100倍)
- 持続可能な大型基盤施設という新しいモデル
- 高品質かつ大量の**フィジカルデータ**を創出し、サイバー空間とつなげて研究加速に貢献
- 利用の「総枠」を大幅に拡大
- 産学官が一体となった戦略的取り組みを発展させるための新たなスキームの検討
- 将来にわたって**社会の持続的発展**を支え続ける



**SPRUC会員の皆様からのインプットをお待ちしています**

# 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