

# 次世代放射光源SPring-8-IIのための 加速器設計・開発

渡部 貴宏、

田村和宏、深見健司、杉本崇、山鹿光裕、近藤力、大石真也、小路正純、清家隆光、大島隆、馬込保、  
細田直康、石井美保、櫻井辰幸、岩井瑛人、高野史郎、田中隆次、稲垣隆宏、前坂比呂和、早乙女光一、  
正木満博、谷内友希子、上田庸資、太田紘志、増田剛正、青木毅、谷内努、川瀬守弘、安積則義、松原伸一、  
山口博史、田島美典、出羽英紀、藤田貴弘、小林和生、斗米貴人、貴田祐一郎、鏡畑暁裕、今村慧、  
阿部利徳、岡田謙介、清道明男、濱野崇、山川皓生、長谷川夏、牛澤 昂大、井上忍、吉岡正倫、山本龍、  
熊澤寛介、田中みお、住友博史、田中信一郎、福井達、平岩聡彦、原徹、渡川和晃、紀井俊輝、安留健嗣、  
田中均

その他、関係者を代表して

高輝度光科学研究センター（JASRI）／理研放射光科学研究センター（RSC）／SPring-8 Service (SES)

# 本日の発表

## 1. イントロ

SPring-8、光源加速器の概略

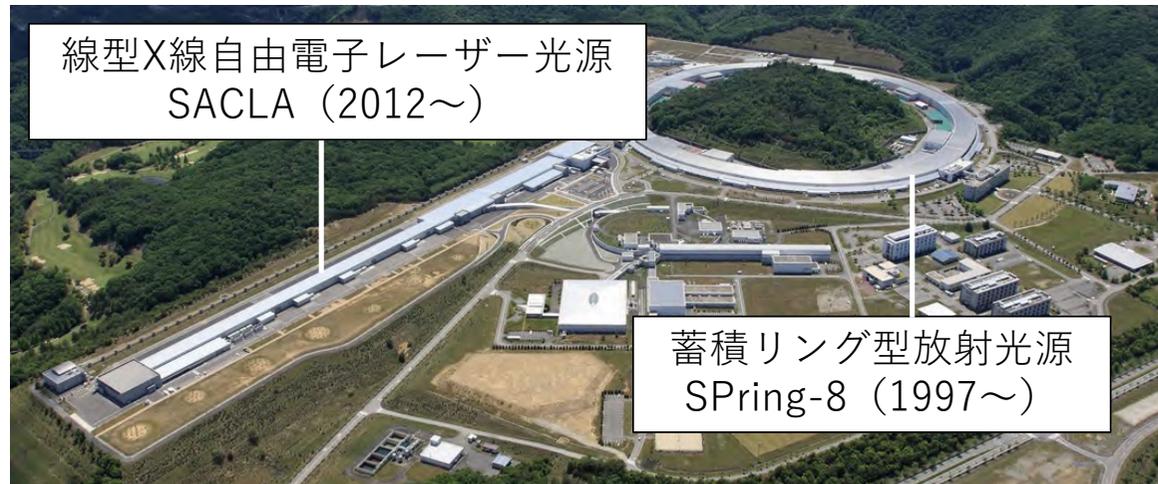
## 2. SPring-8-II計画

全体像、設計概略（ラティス、ハードウェア）、課題

## 3. おわりに

将来について

# 大型放射光施設 SPring-8



相対論的電子（8GeV）から発せられる指向性の高い光（特に**硬**X線）を  
光科学 & 産業の利用者に提供

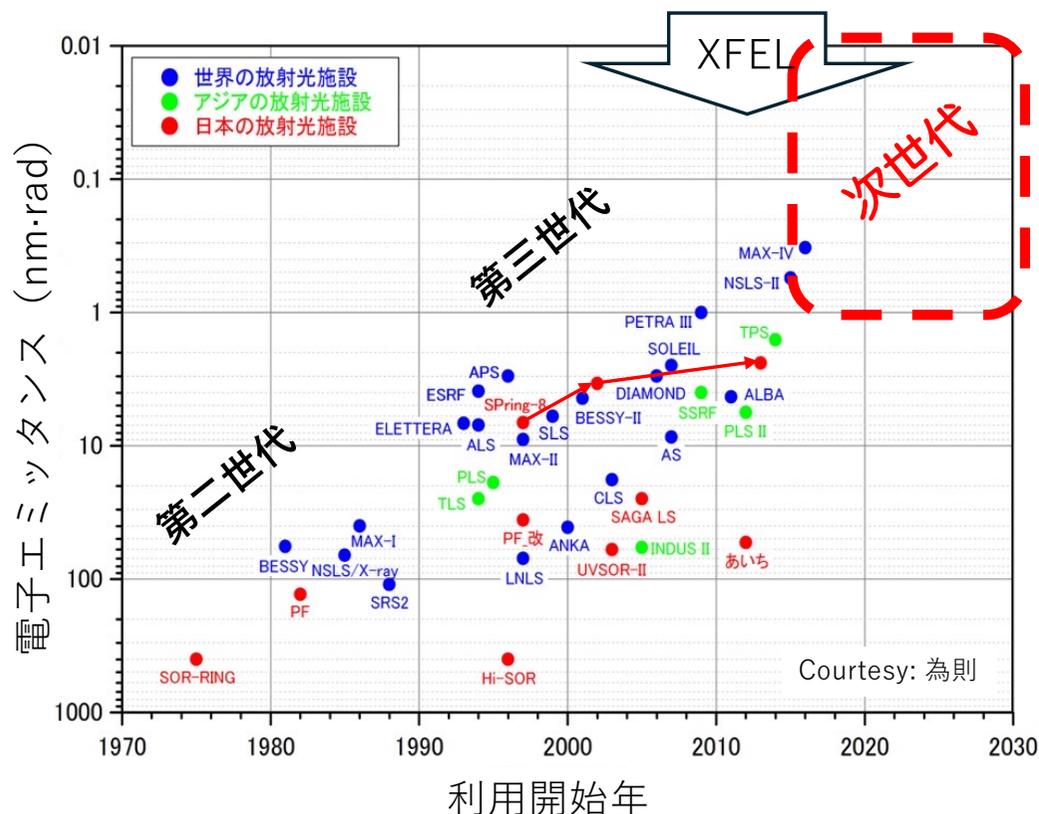
似て非なる 2つの大型光源

- SPring-8：放射光（"incoherent"）、高**平均**輝度、高繰り返し、高安定度
- SACLA：自由電子レーザー（"coherent"）、高**ピーク**輝度、超短パルス

**本日は、SPring-8のアップグレードの話**



# 光科学・産業を支える光源加速器の進化



2010年前後～

次世代光源について世界的議論

**“What is our future?”**  
(FLS2010 他)

「蓄積リング型光源に伸び代はあるのか？」

「XFELが実現した今、リング型光源に意味はあるのか？」

「Energy recovery linac (ERL)？」

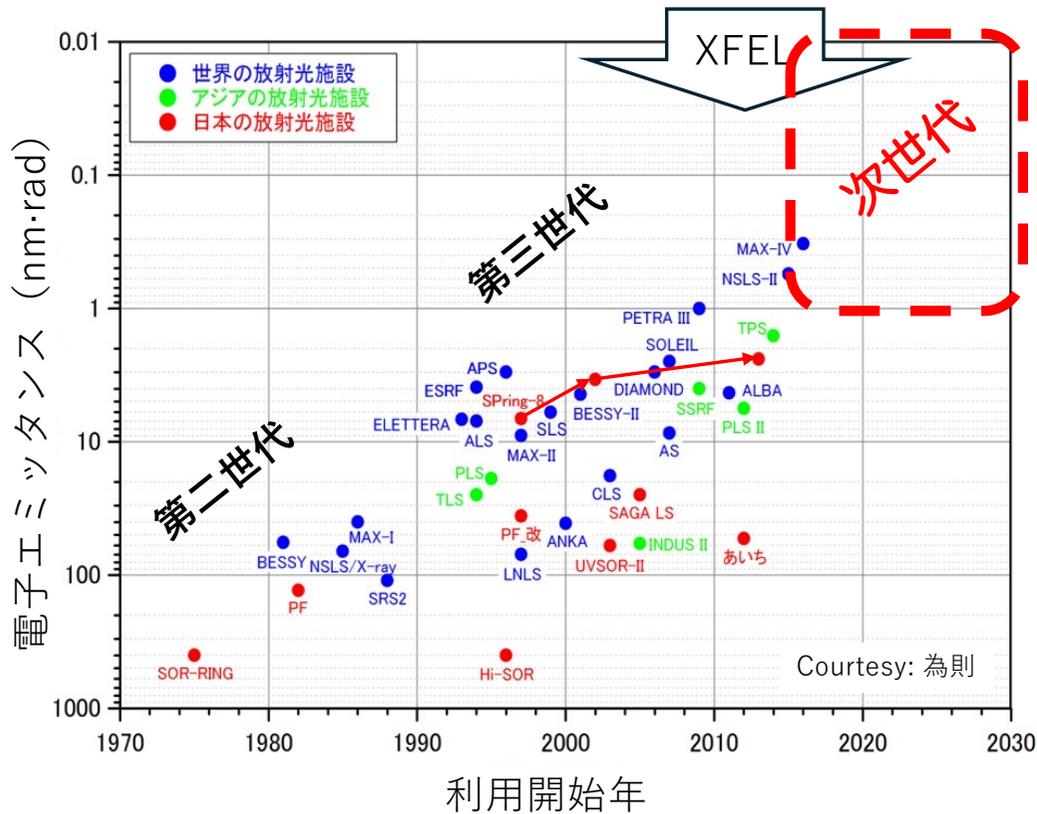
などなど

これまでの数十年、光源加速器の持続的な進歩により光の輝度  $B$  が格段に上昇してきた

$$B \left[ \frac{\text{photons}}{\text{sec} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{mrad}^2 \cdot 0.1\% \text{ b.w.}} \right] = \frac{\text{Flux}}{4\pi^2 \Sigma_x \Sigma_{x'} \Sigma_y \Sigma_{y'}}$$

$\Sigma_{x,x',y,y'}$  : 電子ビーム拡がりで決まる光の空間拡がり

# 光源加速器は「次世代」へ



<ヨーロッパ>  
ESRF-EBS、SLS 2.0  
Elettra 2.0、PETRA-IV  
etc.

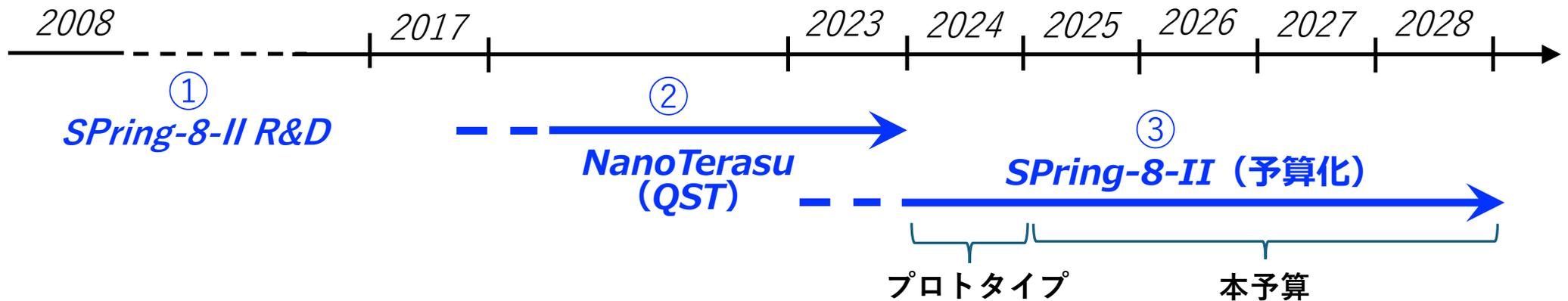
<アメリカ>  
SIRIUS、APS-U、  
ALS-U、etc.



<アジア>  
NanoTerasu、HEPS  
SPS-II、etc.

蓄積リング型光源の重要性が再認識され、コミュニティの競争・協奏により数々の小さなブレイクスルーが起き、今や世界中で次世代リング型光源計画が進行中

# SPring-8-II 計画 ～ SPring-8を次世代へ ～



- ① 2008年頃より次世代光源を見据えた検討を開始（当時、世界中が五里霧中）  
“ユーザーの声”  
加速器の全体設計、ラティス、磁石、真空、モニタ、高周波、挿入光源、制御等、加速器のほぼ全てを新たに設計・開発
- ② NanoTerasu（3GeV 中型**軟**X線光源）が先行して予算化、①を反映した設計・製作  
→ 多くを実証
- ③ SPring-8-II 本格始動（**正式に予算化**）  
これまでの経験を踏まえ、SPring-8-II特有の事情も考慮した上で、最新の設計を行い、現在進行中

# SPring-8-II 計画

## < 目標 >

- 1) 次世代蓄積リング型硬X線光源 (エミッタンス 2.4 nm·rad → <100 pm·rad)
- 2) グリーン化 cf. 2021年 SPring-8・SACLAグリーンファシリティ宣言

## < 主な境界条件 >

- ・既存の加速器トンネルを用いる ← コスト
- ・現SPring-8と同様の波長領域 ← ユーザーからの要望
- ・既存のUndulator beamline位置を変えず ← beamlineへの影響考慮 (コスト、含)
- ・シャットダウン期間 ~ 1年 +  $\alpha$  ← ユーザーへの影響考慮

現SPring-8の特長である高い安定度、信頼度の維持等も考慮したMulti-objectiveな全体設計が肝要

<SPring-8 運転統計>  
(FY2020-24平均)

運転時間 [h]	5244
ダウンタイム [h]	16.6
利用率 [%]	99.6
平均故障間隔 [h] (MTBF)	445

# SPring-8-II 設計方針（抜粋）

- > 磁石配列 “lattice” の刷新
    - 2-bend lattice -> 5-bend lattice
  - > 電子エネルギー 8GeV → 6GeV
  - > アンジュレータの短周期化（22, 24, 28mm）
  - > Longitudinal gradient bend, BQ combined bend
  - > 永久磁石（偏光磁石）
  - > Damping wiggler（次ページ）
- 高輝度
  - 高輝度、グリーン
  - 同波長領域カバー
  - 高輝度
  - グリーン、故障軽減、メンテ軽減
  - 高輝度

## 電子エミッタンス

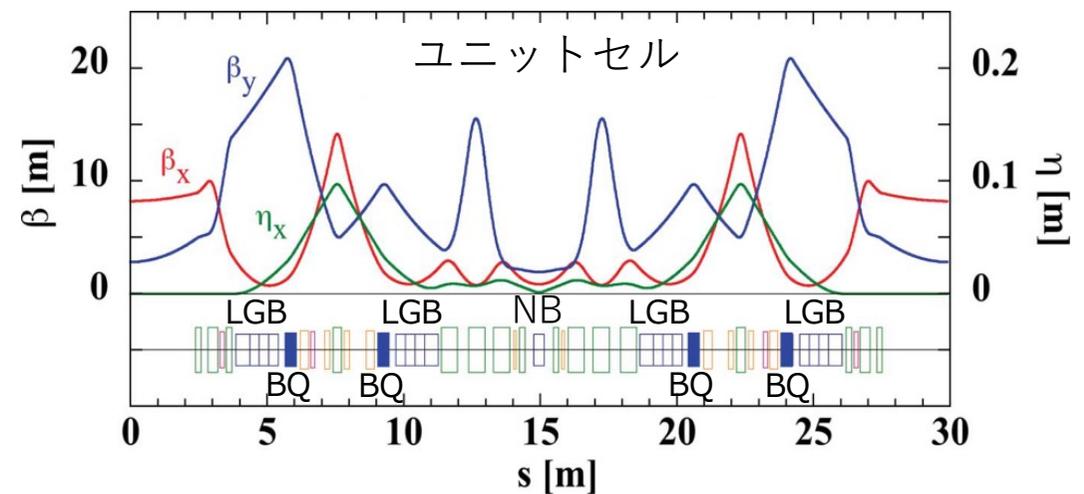
$$\epsilon = C_q \frac{\gamma^2 \langle \mathcal{H} / |\rho|^3 \rangle}{J_x \langle 1/\rho^2 \rangle}$$

$\gamma$  : electron energy  
 $J_x$  : damping part. #

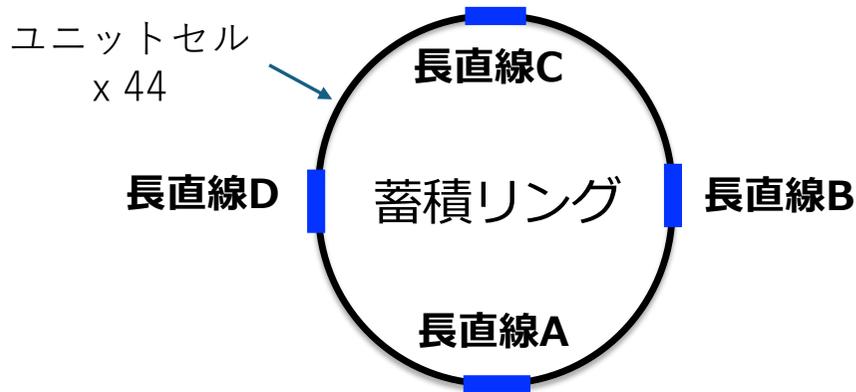
## アンジュレータからの放射の波長

$$\lambda_r = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left( 1 + \frac{K^2}{2} \right)$$

$\lambda_u$  : undulator period  
 $K$  : undulator strength  
 $\gamma$  : electron energy



# Damping wiggler@長直線部 + Undulator@通常直線部



エミッタンスの更なる減少

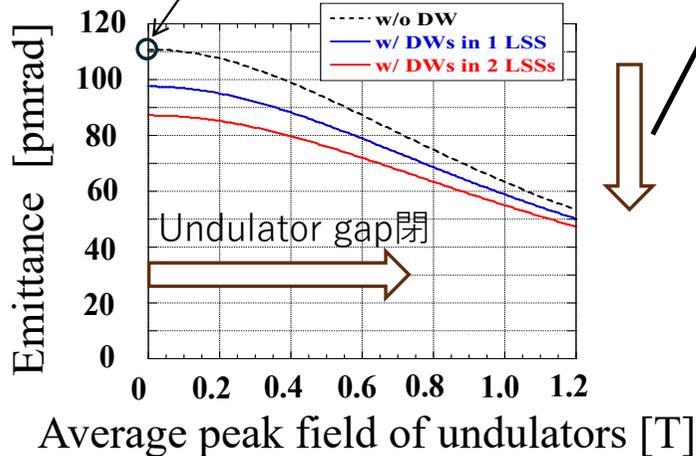
オプション (エミッタンス変動抑制)

1) Non-achromat lattice

T. Hiraiwa et. al., *PRAB* **25**, 040703 (2022).

2) Damping wigglerによるFeedforward補正

挿入光源なしエミッタンス  
 $\epsilon_{\text{natural}} = 110 \text{ pmrad}$



重要

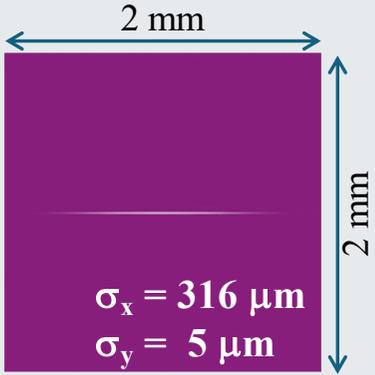
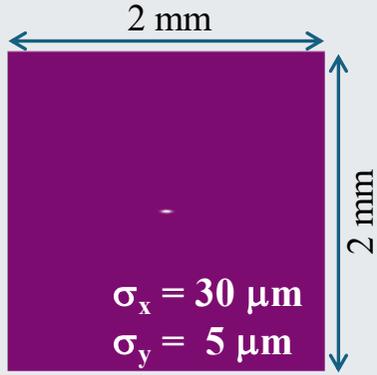
Damping wiggler光を利用者に提供

100 keV以上の硬X線

広スペクトル

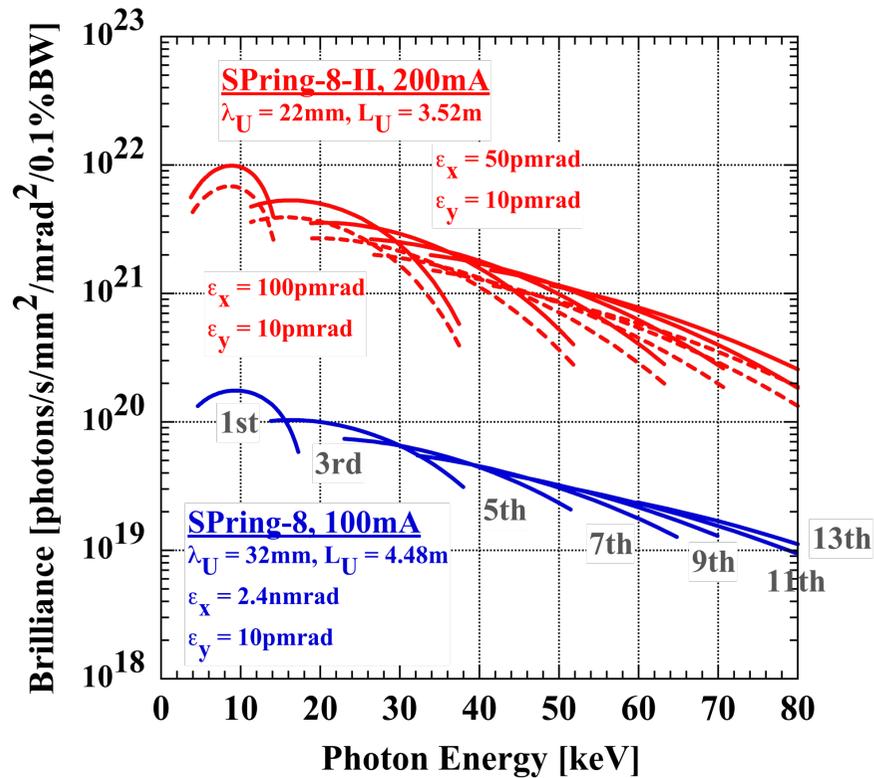
DWのパラメータ (台数、位置、周期、磁場強度、etc.) は利用、ダメージ、コストなど様々な観点から現在最適化中

# SPring-8-II 基本パラメータ

	SPring-8	SPring-8-II
Beam energy (GeV)	8	<b>6</b>
Stored current (mA)	100	<b>200</b>
Circumference (m)	1435.95	<b>1435.43</b>
Lattice	Double bend non-ach	<b>5 bend achromat</b>
Damping part. # ( $J_x, J_y, J_s$ )	1.0, 1.0, 2.0	<b>1.383, 1.0, 1.617</b>
Emittance (pmrad)	2,400	<b>110 → &lt; 100</b>
$(\beta_x, \beta_y, \eta_x)$ [m] @ ID	(31.2, 5.0, 0.146)	<b>(8.2, 2.8, 0.0)</b>
$\sigma_{\Delta p/p}$ [%]	0.109	<b>0.098</b>
Straight section length (m)	6.6	<b>4.8</b>
Beam size at undulator center (諸条件で変動)	 <p><math>\sigma_x = 316 \mu\text{m}</math> <math>\sigma_y = 5 \mu\text{m}</math></p>	 <p><math>\sigma_x = 30 \mu\text{m}</math> <math>\sigma_y = 5 \mu\text{m}</math></p>

# 輝度（指向性を考慮した光の明るさ）

Undulator radiation



輝度 (*Brilliance*)

$$B \left[ \frac{\text{photons}}{\text{sec} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{mrad}^2 \cdot 0.1\% \text{ b. w.}} \right] = \frac{\text{Flux}}{4\pi^2 \Sigma_x \Sigma_{x'} \Sigma_y \Sigma_{y'}}$$

$\Sigma_{x,x',y,y'}$  : 電子ビーム拡がりで決まる光の空間拡がり

※ SPring-8からSPring-8-IIに移行した場合の恩恵は、  
実験毎に様々

# 「省エネ」という光源性能 ～ 永久磁石 ～

## 動機

”バカなアイデアでも良いので出し合おう“ (2008年～)

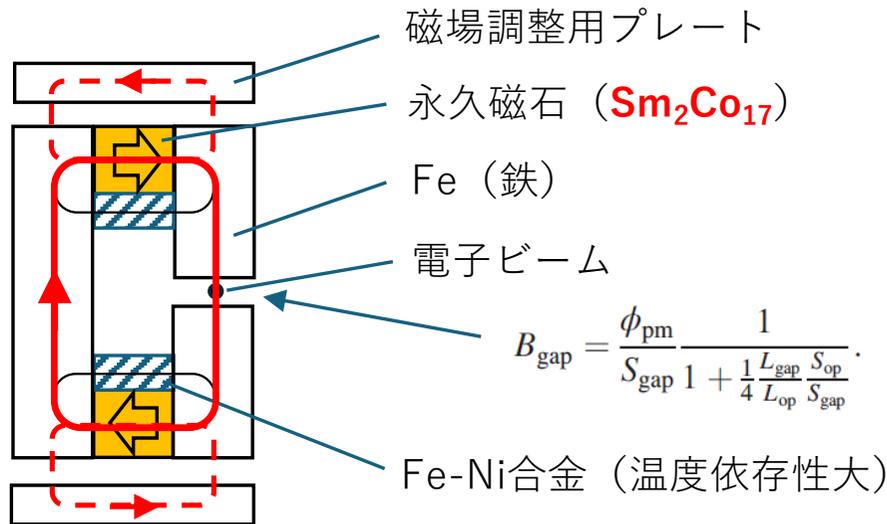
- 電気代を食う割に偏向磁石は常時同じ磁場
- 電源トラブル、水トラブルは極力抑制したい

## 課題

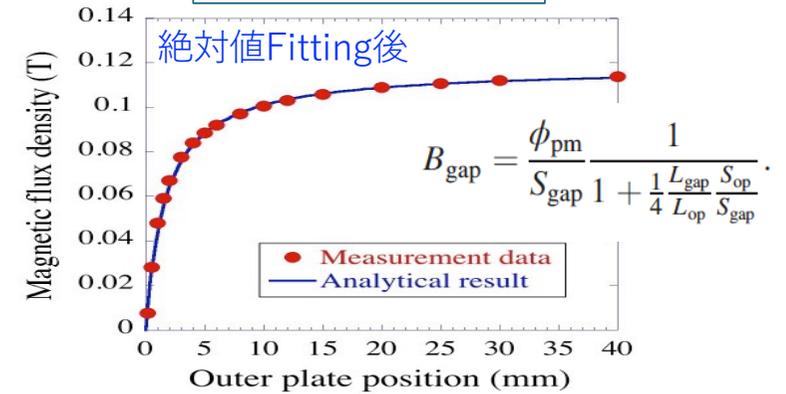
- 永久磁石ピース製作時の磁化のバラツキ
- 電子が当たると減磁する
- 磁場を調整しにくい
- 環境温度で磁場が変わってしまう

## 設計

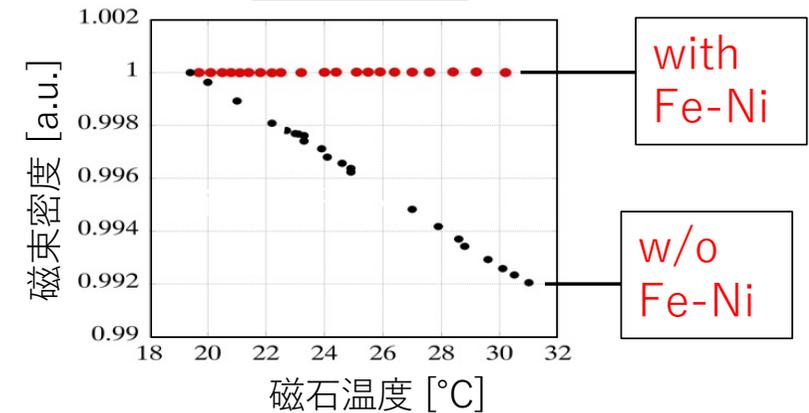
非Halbach型



磁場の調整機構



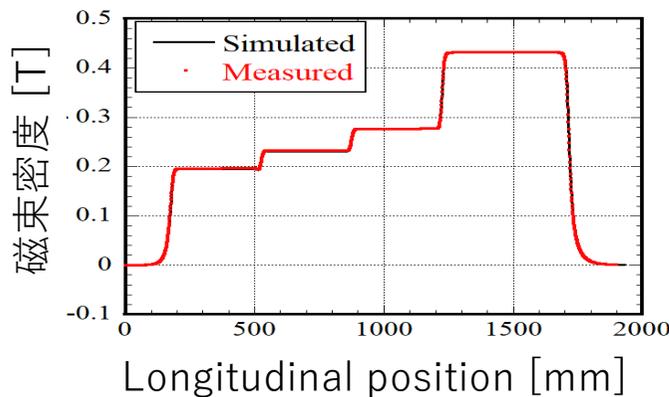
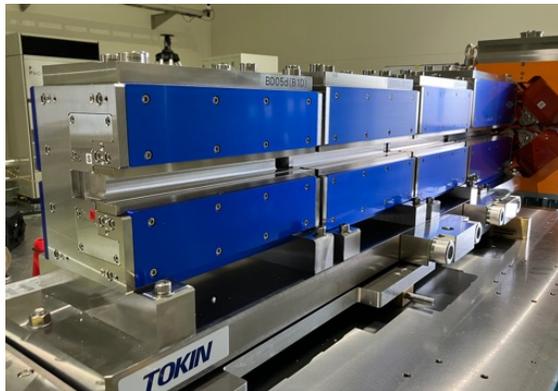
温度補償



T. Watanabe et al., PRAB 20, 072401 (2017).

# 「省エネ」という光源性能

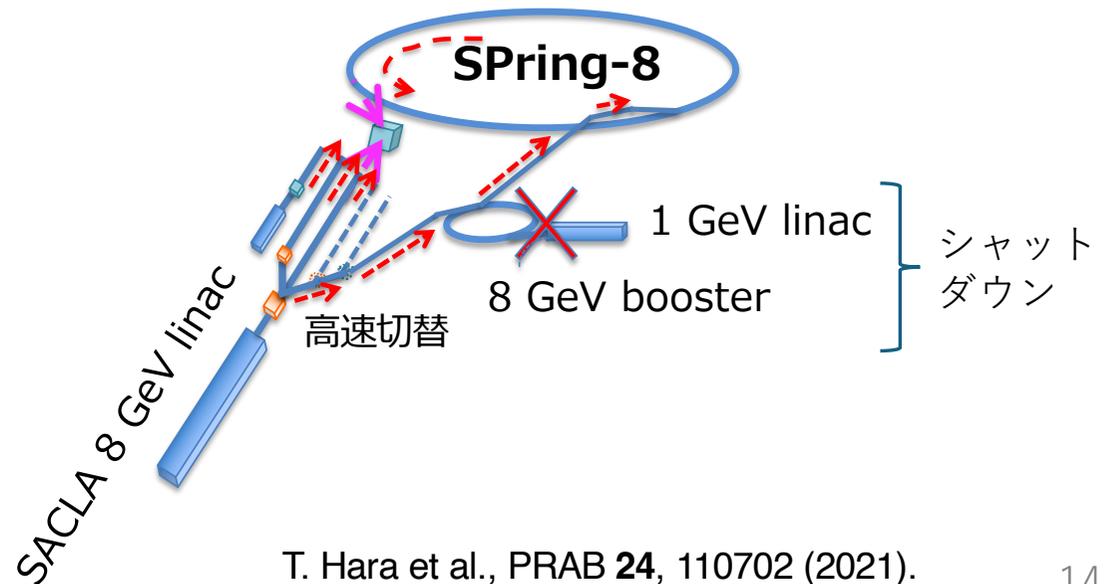
永久磁石型  
*Longitudinal gradient bend (LGB)*



WEP070 谷内、 FRO605 深見

## グリーン化

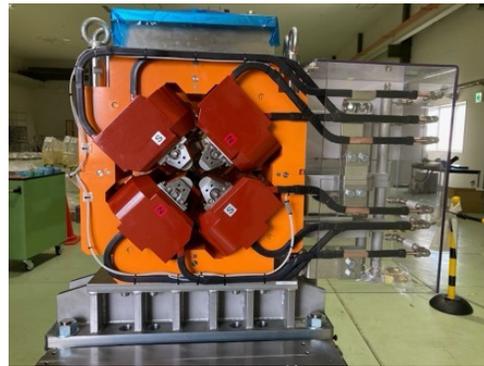
- 永久磁石
- 電子エネルギー 8GeV → 6GeV
- 新ラティス (偏向磁石による放射減)
- SACLAからの新たな電子ビーム入射  
→ 旧 linac & booster シャットダウン



T. Hara et al., PRAB **24**, 110702 (2021).

# SPring-8-IIを具現化する要素設計・開発1 ～磁石～

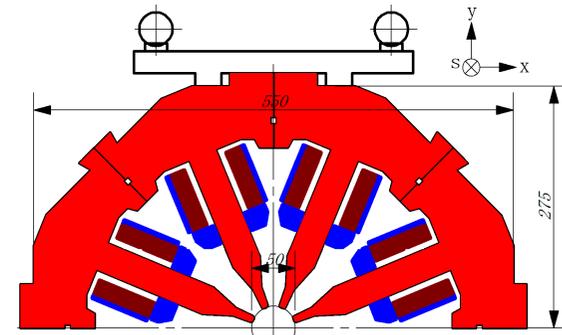
## 狭ボア 高磁場磁石



(最大値)

四極	55 T/m
六極	3 kT/m <sup>2</sup>
八極	100 kT/m <sup>3</sup>
複合	0.26 T + 24 T/m
ステアリング、Skew-Q	

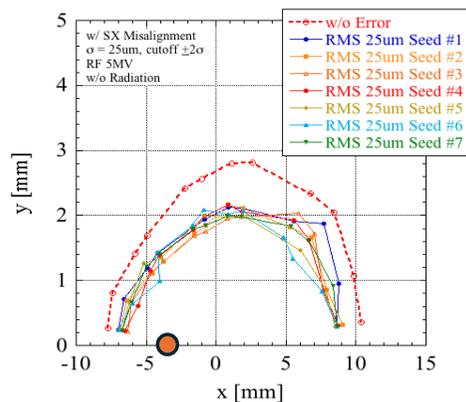
八極 + 切替 (Skew-Q / ステア)



## 精密アライメント

FRO605 深見、FRO608 近藤

Dynamic aperture (上半分)



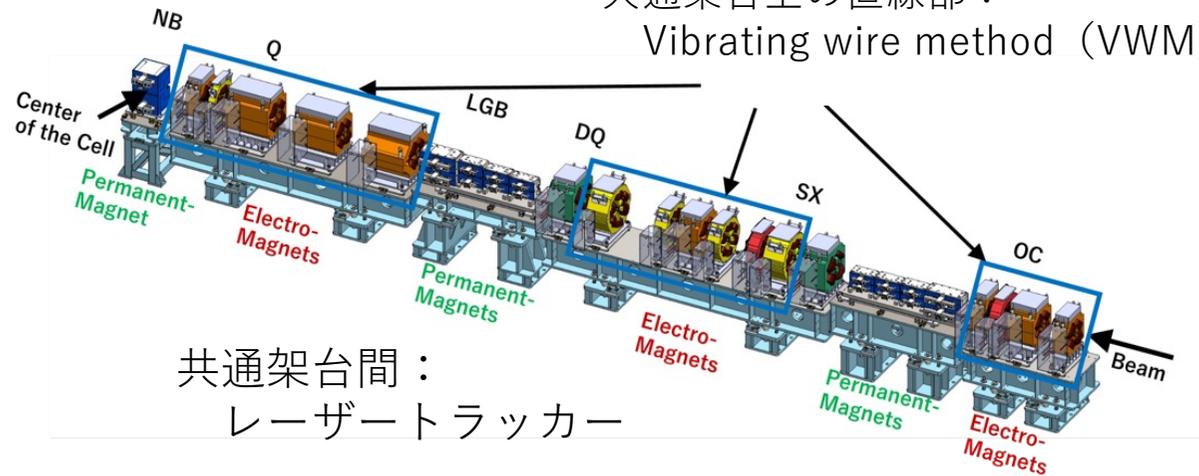
重要

ビームの動的安定領域確保

● ビーム入射点

共通架台上の直線部:

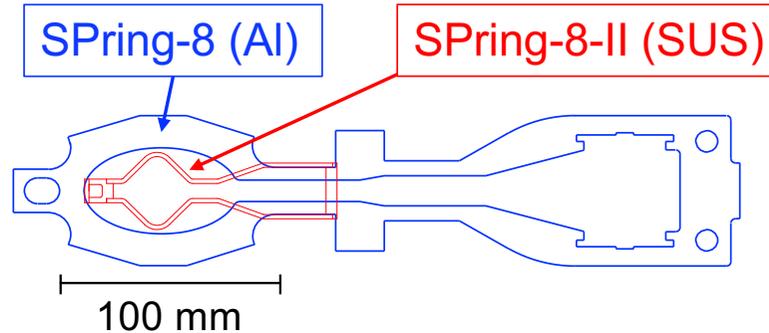
Vibrating wire method (VWM)



# SPring-8-IIを具現化する要素設計・開発2 ～ 真空 ～

## 狭口径 超高真空システム

- ・ 小口径、薄肉
- ・ 干渉を避ける為の3D設計
- ・ インピーダンスの抑制
- ・ 振動対策
- ・ 高パワーのハンドリング
- ・ 排気能力の確保

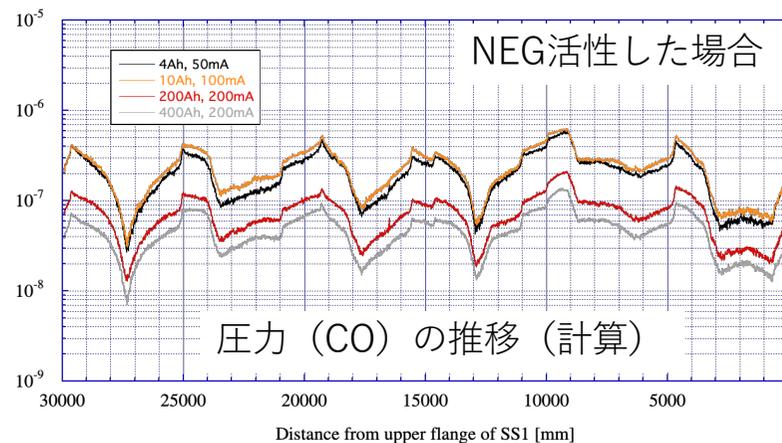


## 圧力分布計算

### SynRad & MolFlow

光刺激脱離や3次元構造等を考慮した真空評価

FRP014 上田

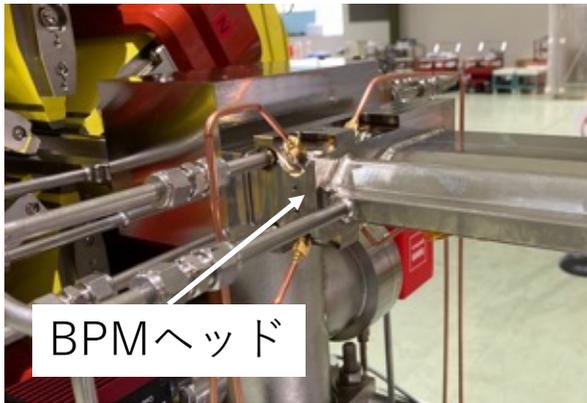


**3D設計ルール：磁石－真空間クリアランス $\geq 900 \mu\text{m}$**

製作誤差（歪み etc.）、設置誤差、溶接ビード、etc.

# SPring-8-IIを具現化する要素設計・開発3 ～ モニタ ～

## 高精度・高安定ビーム位置モニタ (Beam position monitor; BPM)



### 分解能

- < 0.1  $\mu\text{m}$  std@10Hz (Slow acquisition)
- < 1  $\mu\text{m}$  std@10kHz (Fast acquisition)
- < 100  $\mu\text{m}$  std@single pass acquisition

### 安定度

5  $\mu\text{m}$  p-p/month

H. Maesaka et al., PASJ2024 **FRP005**.

## ビーム不安定性抑制用バンチ毎フィードバック (Bunch-by-bunch feedback)

電子エネルギー [GeV]	8 → 6
蓄積電流 [mA]	100 → 200
チェンバ口径	約 1/1.4
チェンバ材	Al → SUS

- Transverse方向 バンチ毎フィードバック
- Longitudinal方向 バンチ毎フィードバック

**THO706 正木**

## 超低エミッタンス診断

10 $\mu\text{m}$ 以下のビームサイズ測定

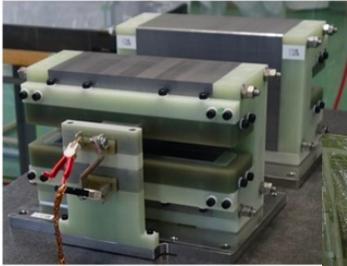
M. Masaki et al., PRST-AB **18**, 042802 (2015).



# その他の要素設計・開発

## リングへのOff-axisビーム入射

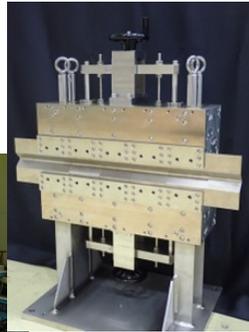
高相似キッカー



真空封止  
パルスセプトム



DCセプトム



## ビームシェイカー&スクレイパー

高密度電子ビームを安全に落とす仕掛け

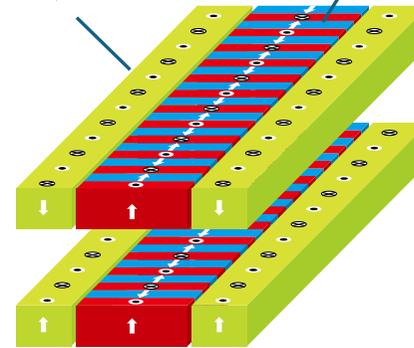
## 新しい加速器制御システムMADOCA4.0

WEP008 岡田

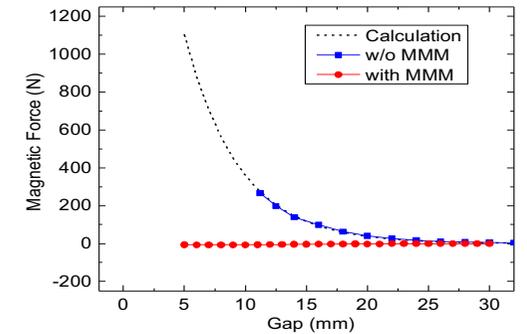
## 新型 真空封止アンジュレータ IVU-II

吸引力相殺用  
磁化モジュール

通常の磁石列



ほぼ完璧に吸引力を相殺

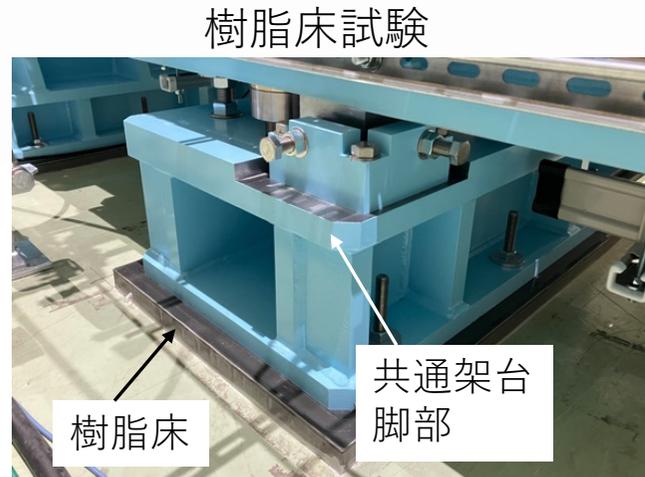
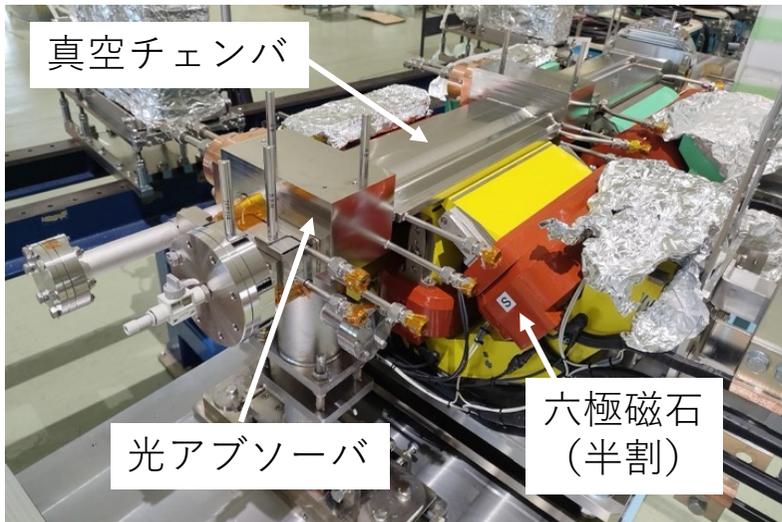


- ✓ 6GeV対応のための短周期化
- ✓ 吸引力相殺によるサイズダウン
- ✓ 耐減磁特性を増強した磁気回路
- ✓ 製造工程・磁場調整手法の改善

K. Imamura et. al., *J. Synch. Rad.* **31**, 1154-1160 (2024).

# FY2025 プロトタイプ of 構築・検証から量産へ

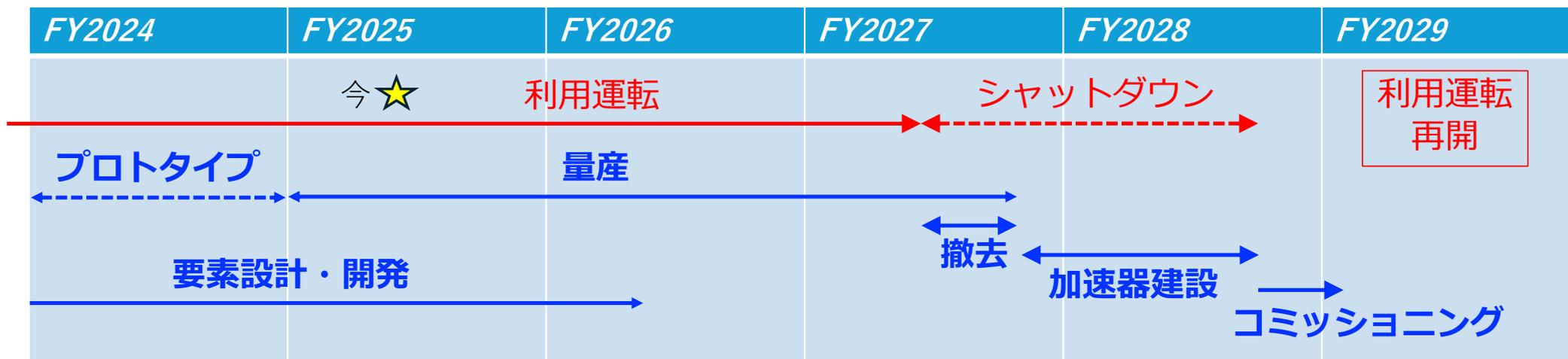
## < SPring-8-II five-bend lattice >



密集した装置群の空間干渉 & 手順確認

既存の凸凹な床への対応  
→ グラウト & 樹脂により丸ごと嵩上げ (~30mm)

# 最大の課題 ～時間とコスト～



(時間) ESRF-EBSの1.7倍、NanoTerasuの4.1倍の周長をもつSPring-8

量産：2年半 +  $\alpha$

シャットダウン：1年 +  $\alpha$

➡ 研究所 & 受注者の両者が、経験に基づく工程の最短化・最効率化に尽力

(コスト) 空前の物価高 x 円安

見積書を取得する度に価格アップ

➡ 経験と詳細な検討に基づき、ギリギリまで設計の削ぎ落とし

# 「次世代光源」の今後

第3世代で実現した「当たり前」を改めて実現する重要性と難しさ

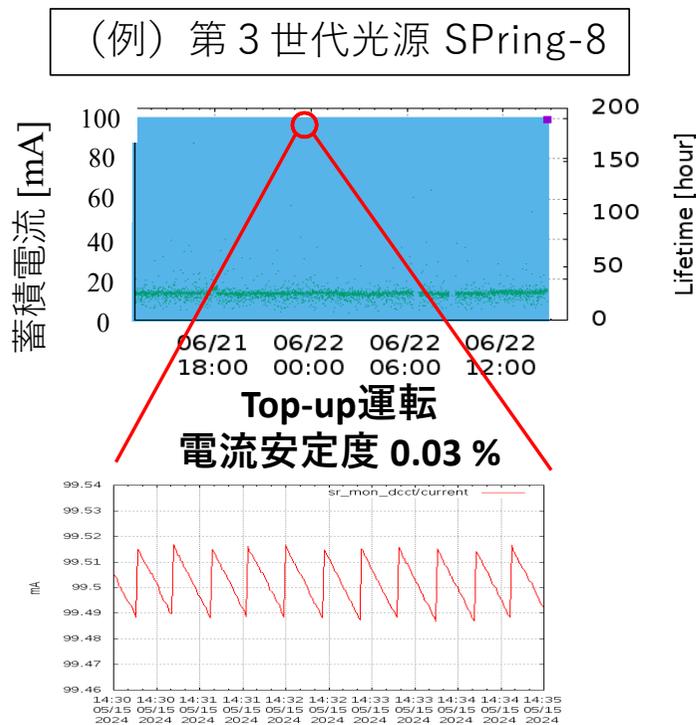
性能向上に見合った、より高いレベルでの安定化

光のサイズが格段に小さくなる次世代では、求められるPointing stabilityも格段に上がる

新しい軌道補正の形

今後出てくるであろう要望への対応

- > ラティスの変更？
  - > なんらかのPerturbationの持ち込み？
  - > 新しい運転・維持管理の形？  
(e.g., Machine learning)
- etc.



「次世代光源」の真価が問われるのは、まだこれから

## “ *What is our future?* ”

2010年頃以降、世界の光源加速器専門家が競争・協奏し、広範な科学・産業のための新しい道「次世代光源」を生み出したように、今後、加速器やその他の関係者がどのような道を切り拓くのか？

- ＞ 蓄積リング型放射光源の進化（低エミッタンス化、etc.）
- ＞ 線型X線自由電子レーザー光源の進化（高繰り返し化、etc.）
- ＞ その他の様々な新しいアイデア

挑戦的なアイデアを出し合う重要性  
&  
それを実用まで持っていく重要性・難しさ

磁石	WEP070	谷内 努	SPring-8-II 縦勾配型偏向永久磁石の製作
	FR0605	深見健司	SPring-8-II 蓄積リング磁石システム
	FR0608	近藤 力	SPring-8-IIの電磁石電源システム
真空	FRP014	上田庸資	SPring-8-II蓄積リングにおけるビーム寿命の評価
モニタ	TH0706	正木満博	SPring-8-IIにおけるビーム不安定性抑制用バンチ毎フィードバックの設計
高周波	WE0703	斗米貴人	SPring-8-IIへ向けた加速空洞高次モード起因の不安定性の抑制
	THP055	岩井瑛人	SPring-8 高周波加速システムにおける RF位相の初期化と整列
	FRP003	稲垣隆宏	SPring-8-II蓄積リングの高周波システムの設計と準備状況
制御	WEP008	岡田謙介	MADCOCA 4.0加速器運転端末システム更新の記録
BL	FRP077	青柳秀樹	SPring-8挿入光源ビームラインにおける四象限型XBPMを用いた光軸測定
SACLA	THP040	佐藤大輔	SACLA高度化に向けた高輝度電子銃用単結晶CeIr <sub>2</sub> 熱電子源の研究開発
	FRP057	大島隆	同期トリガ・クロック発生装置
	FRP044	馬込保	SACLA電子銃カソードの仕事関数その場測定
	FR0705	渡川和晃	SACLA高度化に向けた高輝度高繰り返し電子源の開発状況
	FR0055	安留健嗣	XバンドSUS430製渦巻き型ダミーロードの開発
企画	THK001	前坂比呂和	加速器運転における機械学習の応用

磁石	WEP070	谷内 努	SPring-8-II 縦勾配型偏向永久磁石の製作	
	FR0605	深見健司	SPring-8-II 蓄積リング磁石システム	
	FR0608	近藤 力	SPring-8-IIの電磁石電源システム	
真空	FRP014	上田庸資	SPring-8-II蓄積リングにおけるビーム寿命の評価	
モニタ	TH0706	正木満博	SPring-8-IIにおけるビーム不安定性抑制用バンチ毎フィードバックの設計	
高周波	WE0703	斗米貴人	SPring-8-IIへ向けた加速空洞高次モード起因の不安定性の抑制	
	THP055	岩井瑛人	SPring-8 高周波加速システムにおける RF位相の初期化と整列	
	FRP003	稲垣隆宏	SPring-8-II蓄積リングの高周波システムの設計と準備状況	
制御	WEP008	岡田謙介	MADOCA 4.0加速器運転端末システム更新の記録	
BL	FRP077	<p style="text-align: center;"> <i>SPring-8/SACLA</i>では、新しい人材を募集中！！  まずはお問い合わせください  <a href="mailto:twatanabe@spring8.or.jp">twatanabe@spring8.or.jp</a> </p>		光軸測定
SACLA	THP040			研究開発
	FRP057			
	FRP044			
	FR0705			
	FR0055	安留健嗣	XバンドSUS430製渦巻き型ダミーロードの開発	
企画	THK001	前坂比呂和	加速器運転における機械学習の応用	