

# 東北放射光計画

Synchrotron Light in Tohoku, Japan (SLiT-J)

— 光源加速器システムの概要 —

Outlook of Light Source Accelerator Complex

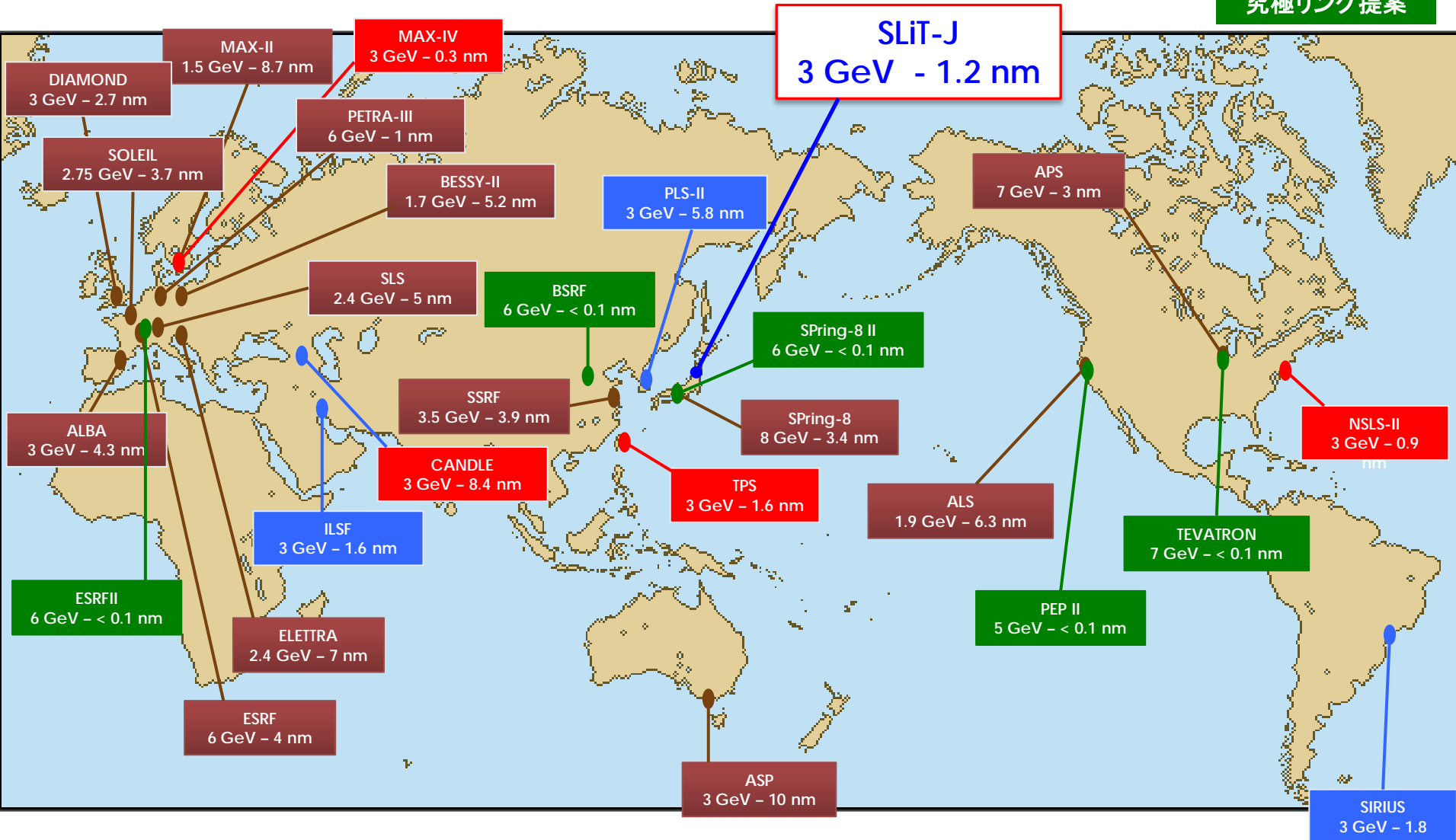
version 2013.5

濱 広幸 + 加速器・ビーム物理部門  
東北大学電子光理学研究センター  
東北大学大学院理学研究科物理学専攻

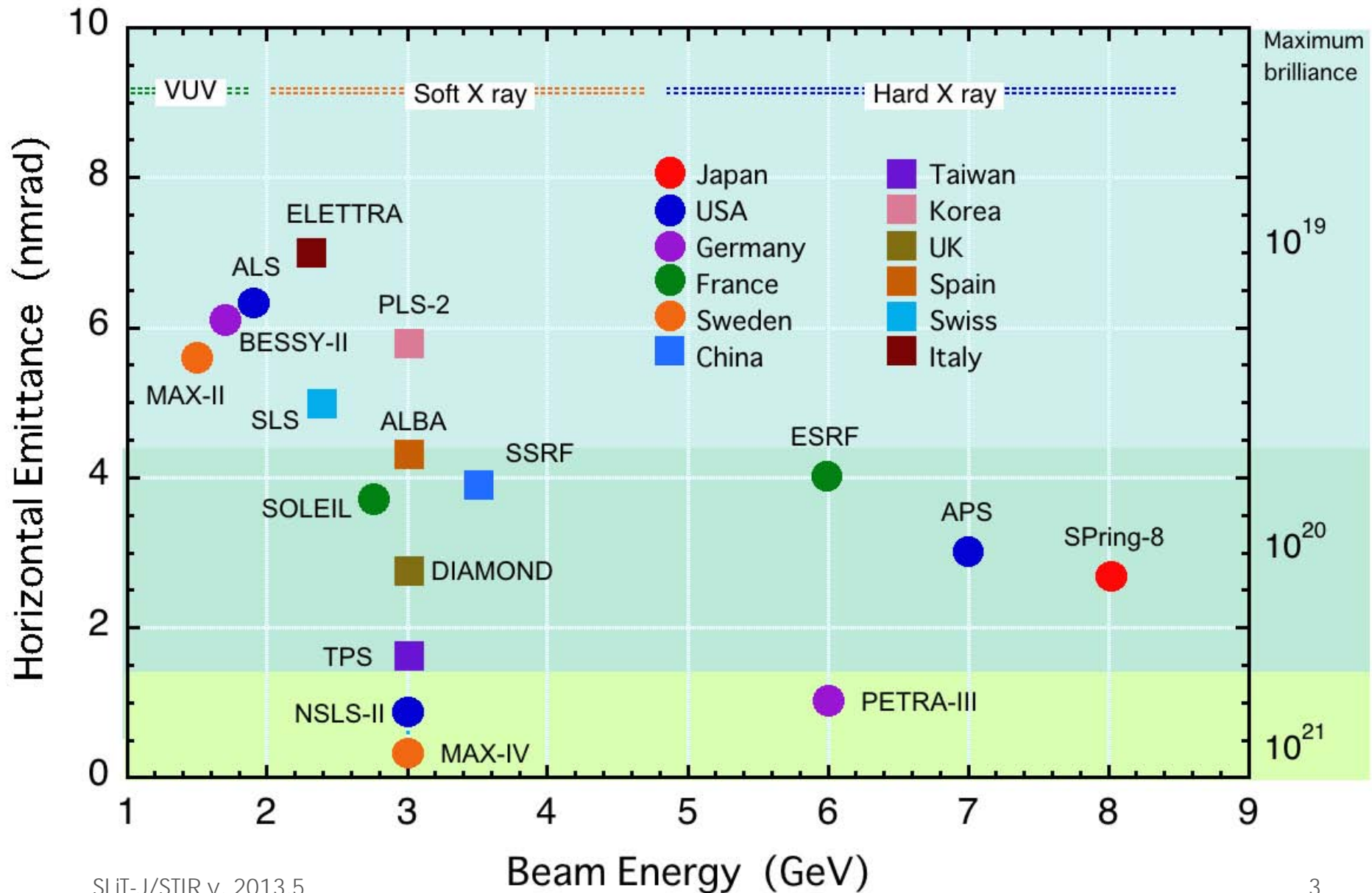
SLiT-Jデザインチーム  
SPring-8/高輝度光科学研究センター

# 世界の高輝度放射光リング ( $\epsilon < 10 \text{ nmrad}$ )

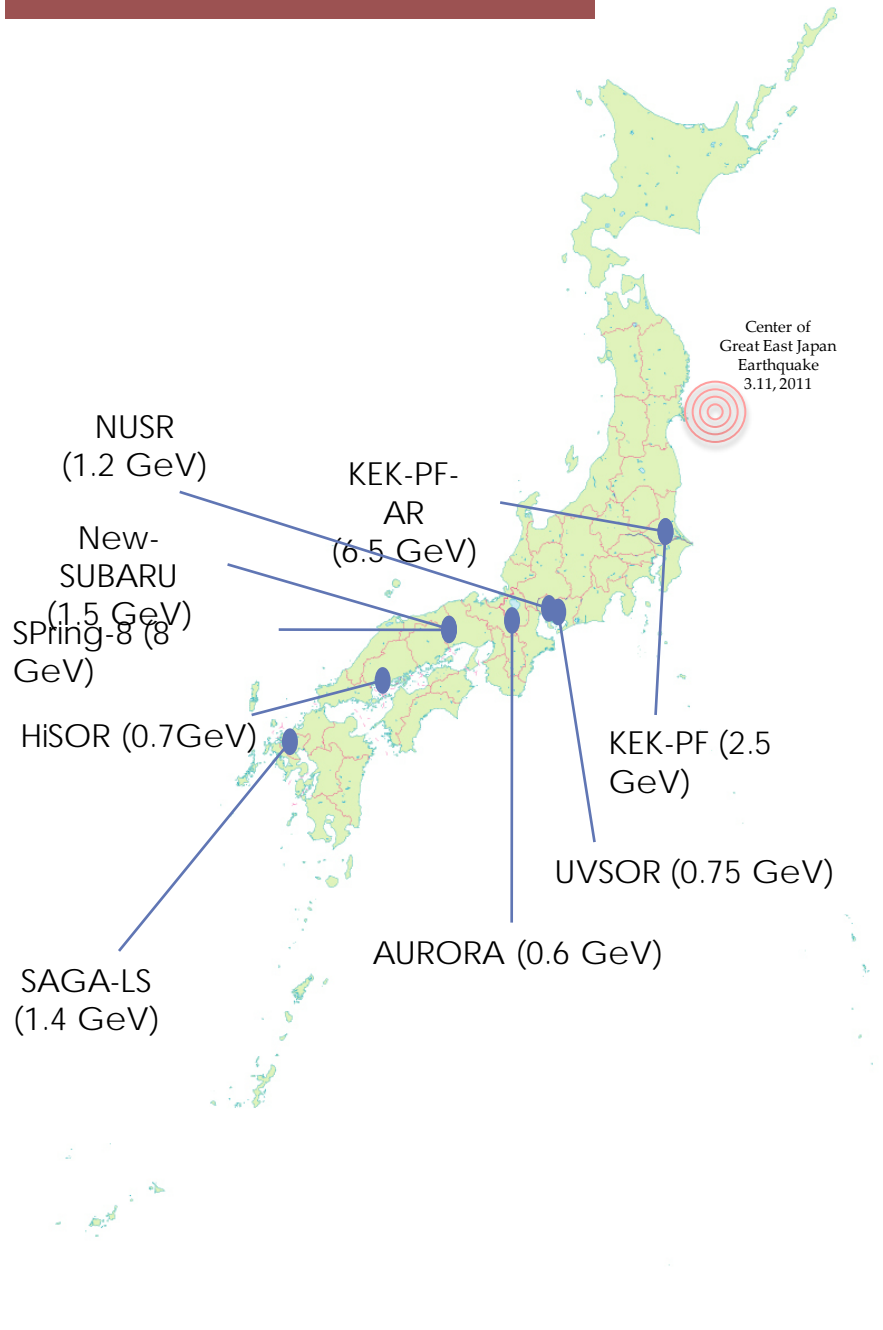
運転中
建設中
計画中
究極リング提案



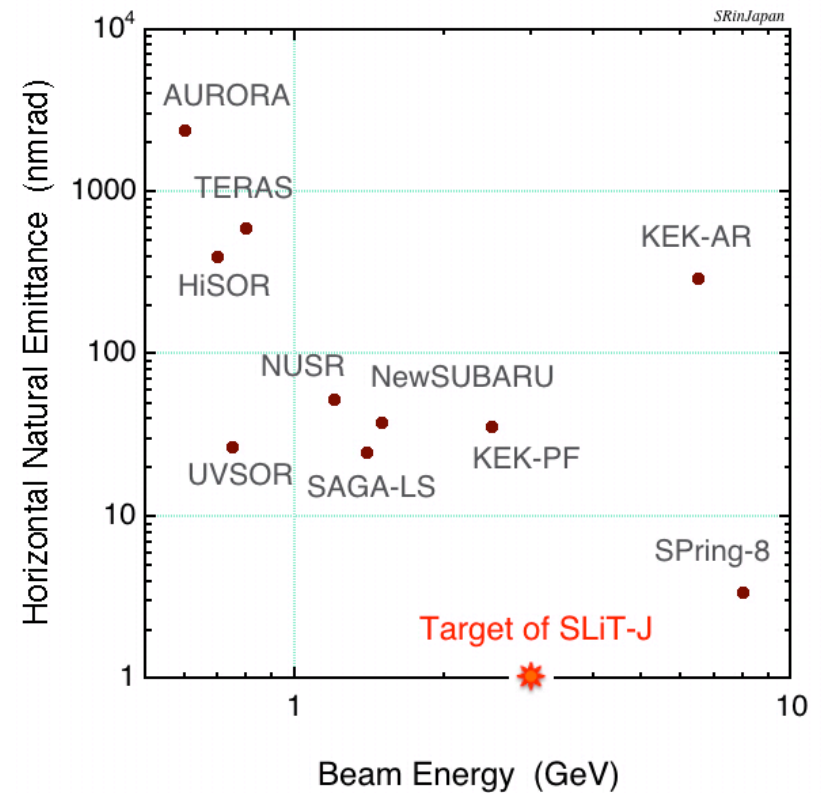
# Emittance vs beam energy of 3rd generation light sources in the world



# SR MAP in JAPAN 2013



国内には多数の小規模放射光リングがあるが、第3世代リングはSPring-8のみで、各国が保有・建設している最新の3GeVクラス高輝度リングはない。また施設のすべてが関東以西にあり、東北・北海道には放射光拠点がない。

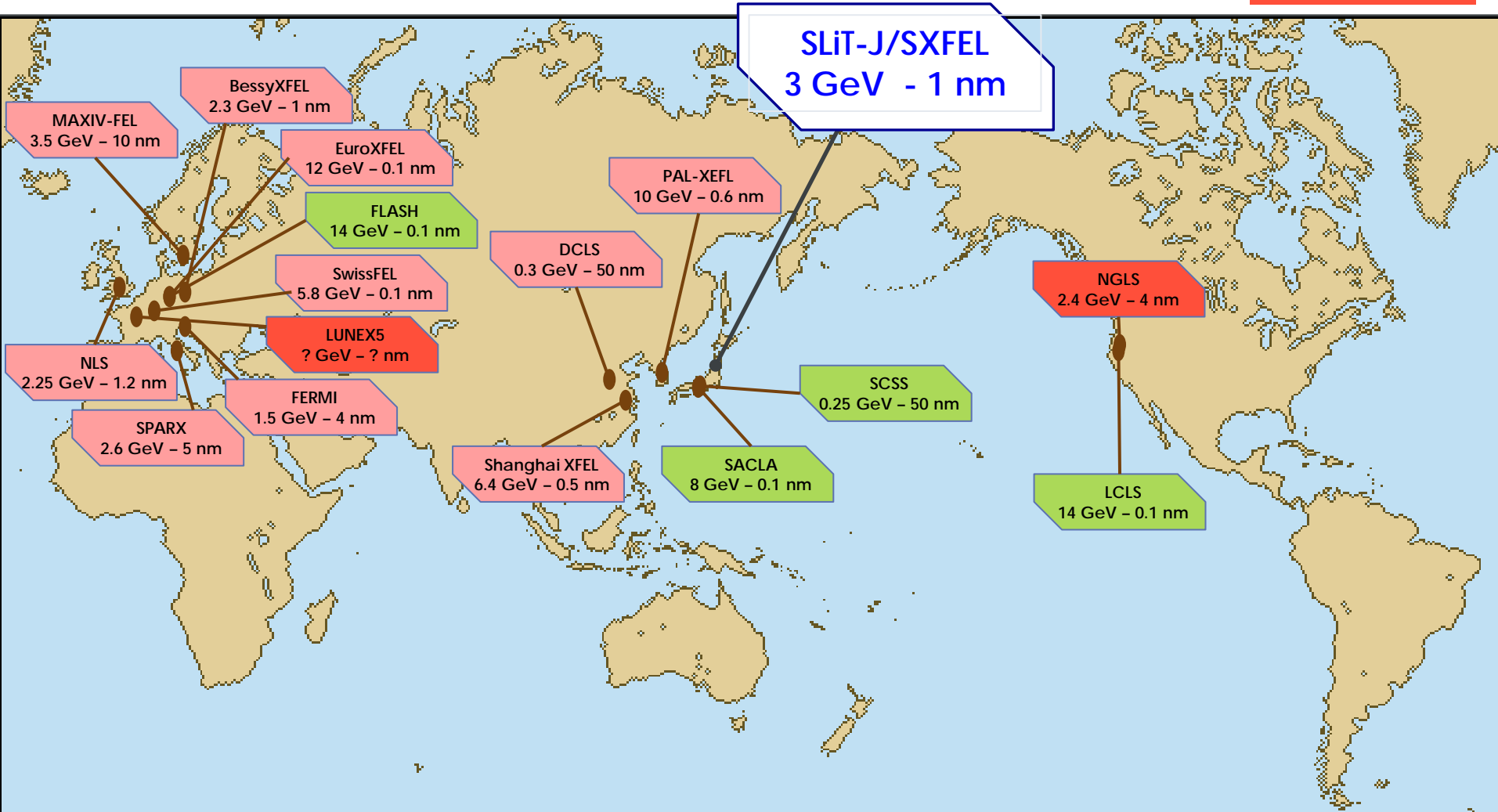


# 世界のシングルパス自由電子レーザー

運転中

R&D中

計画中



VUV - 軟X線FELも世界各国が注目している

# 東北3GeV放射光計画の立脚点と目標

## 【背景】

最新加速器テクノロジーを駆使した3GeVクラスの中型放射光リングは、高輝度であり汎用性に優れた利用機能を備えることができる。放射光科学においての利用研究分野が広く、利用者数も極めて多い軟X線領域付近をカバーする中核施設を、本邦に開設することは、日本の放射光科学展開に急務である。

## 【期待】

先端3GeVクラス高輝度リングの施設規模は国内唯一の第3世代光源であるSPring-8の1/4程度であってもあり、軟X線領域での光源性能は現在のSPring-8のそれと同等以上を期待する事ができる。建設費用はもちろん、徹底的なエネルギー消費管理の導入によって運転経費も低く抑えられ、高いコストパフォーマンスを達成できる可能性を持つ。

## 【光源加速器目標】

最適化波長領域	0.1 ~ 10 keV
最大輝度	$10^{21}$ phs/s/mm <sup>2</sup> /mrad <sup>2</sup> /0.1%b.w. @ 1 keV
水平エミッタンス	~ 1 nmrad
光源リング周長	~ 300 m
将来オプション	full-energy入射可能な線形加速器によるsoft-XFEL
その他	真空封じアンジュレータ、Cバンドリナック等の本邦独自の加速器技術の発展的継承

# 高輝度光源設計の戦略

## ● 輝度とエミッタンス

$$\text{Brilliance} = \frac{dN_{\text{photon}} / dt}{4\pi^2 \sigma_x \sigma_{x'} \sigma_y \sigma_{y'} \frac{\Delta\omega}{\omega}} \left( \text{ph/s/mm}^2/\text{mrad}^2/0.1\% \text{bw} \right) \propto \frac{I_{\text{beam}}}{\varepsilon_x \varepsilon_y}$$

$$\varepsilon_x = \frac{\gamma^2}{J_x \rho} \langle H \rangle_{\text{dipole}} \quad H(s) = \gamma\eta^2 + 2\alpha\eta\eta' + \beta\eta'^2$$

## ● 理論的最小エミッタンス

Theoretical minimum emittance

$$\varepsilon_x^{\min} = \frac{1}{4\sqrt{15}} \frac{C_q \gamma^2 \theta^3}{J_x} \text{ (achromat)}, \quad \varepsilon_x^{\min} = \frac{1}{12\sqrt{15}} \frac{C_q \gamma^2 \theta^3}{J_x} \text{ (non-achromat)}$$

$$C_q = 3.83 \times 10^{-13} \text{ (mrad)}$$

$\theta$ ; bending angle (rad)

$J_x$ ; horizontal damping partition ( $\sim 1.5$ )

$\Rightarrow$  for 3 GeV ring

$$n_B = 20 \rightarrow \approx 23 \text{ nmrad}$$

$$n_B = 40 \rightarrow \approx 2.7 \text{ nmrad}$$

$$n_B = 60 \rightarrow \approx 0.82 \text{ nmrad}$$

$n_B$ ; number of identical bending magnets

沢山の偏向磁石からリングを構成し、1つの磁石の偏向角度を小さくすればエミッタンスは小さくなる。



リングは増々巨大になる

# 何かと話題のMAX-IV

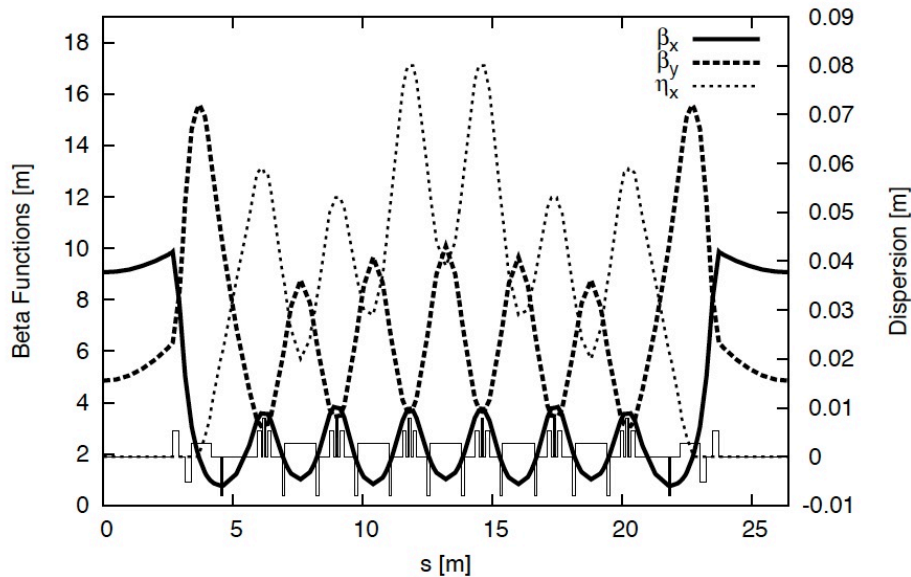



FIG. 2: Beta functions  $\beta_x, \beta_y$  and dispersion  $\eta_x$  for one achromat of the 3 GeV storage ring. The position of the dipoles, quadrupoles, and sextupoles are indicated at the bottom.

TABLE I: Parameters for the MAX IV 3 GeV storage ring. Permanent-magnet damping wigglers (PMDWs) are used to further reduce the storage ring emittance (see Section II C).

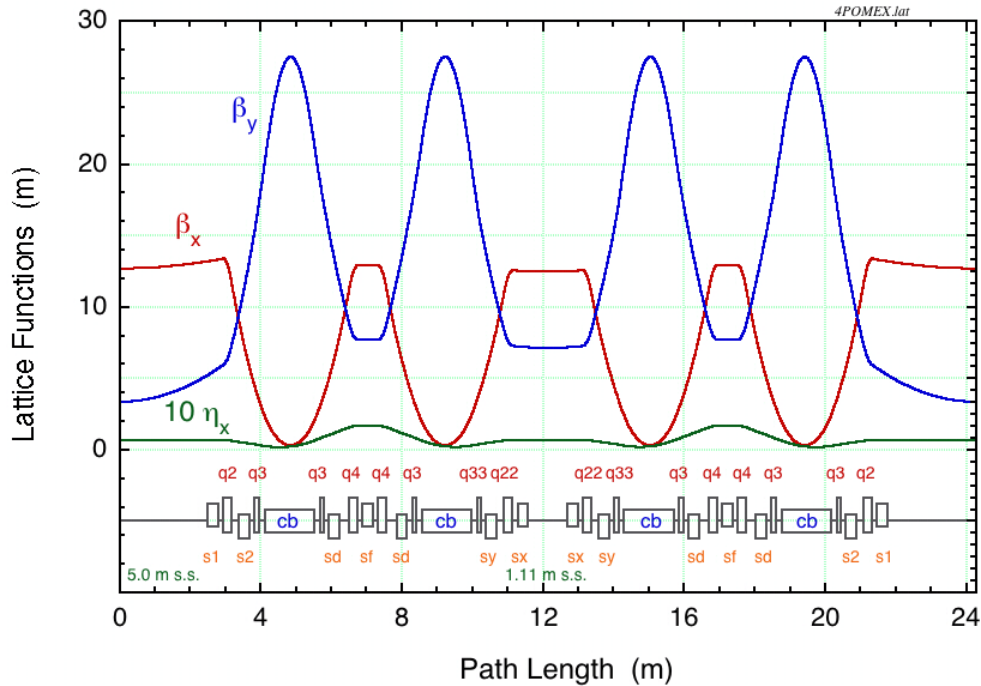
Energy [GeV]	3.0
Main radio frequency [MHz]	99.931
Harmonic number	176
Circulating current [mA]	500
Circumference [m]	528
Number of achromats	20
No. of long straight sections available for IDs	19
Betatron tunes (horizontal / vertical)	42.20 / 14.28
Natural chromaticities (horizontal / vertical)	-49.8 / -43.9
Corrected chromaticities (horizontal / vertical)	+1.0 / +1.0
Momentum compaction factor	$3.07 \times 10^{-4}$
Horizontal damping partition $J_x$	1.86
Horizontal emittance (bare lattice) [nm rad]	0.326
Horizontal emittance (with 4 PMDWs) [nm rad]	0.263
Radiation losses per turn (bare lattice) [keV]	360.0
Radiation losses per turn (with 4 PMDWs) [keV]	572.1
Natural energy spread	0.077%
Energy spread (with 4 PMDWs)	0.096%
Required dyn. acceptance (hor. / ver.) [mm mrad]	7.1 / 1.3
Required lattice momentum acceptance	$\pm 4.5\%$

- 7つの偏向磁石でセルを構成（両端のそれは半分の長さ）して、低エミッタンス化。
- マルチポールウィグラーを導入して放射減衰効果を増強し更に低エミッタンスを狙う。
- 1セルが長いので周長が530mもありながら20セル。
- クロマティシティ補正の6極磁場が非常に強く、そのためにビーム動力学上の非線形性も極めて強い。
- その補正に8極磁石まで動員  極端に複雑なビーム光学

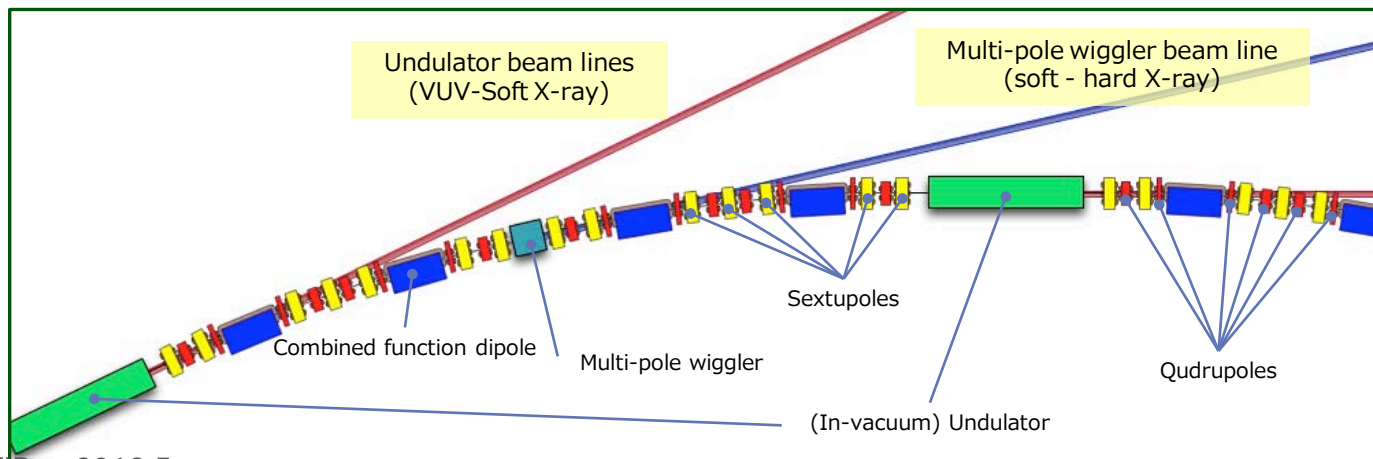
マルチバンドに対する妥協点をどのように見いだすか



# SLiT-J / 4 ベンドハイブリッドオプティクス



- セル数 : 14
- 偏向磁石 : 4/セル、0.8 T、機能複合型
- 4極磁石 : 全て収束用、5ファミリー
- 6極磁石 : 6ファミリー
- 直線部 : 5.0 m - 真空封じ型を中心とした挿入光源、VUV-SX領域
- 1.1 m - 高エネルギー連続光源用多極ウィグラー



## Basic Parameters of SLiT-J Storage Ring

電子ビームエネルギー	2.998 GeV
ラティス構造	4-bend cell
周長	339.92 m
セル数	14
直線部	5.00 m × 14
短直線部	1.11 m × 14
ベータトロンチューン	(25.60, 6.56)
自然クロマチシティ	(-61.1, -40.5)
自然水平ミッタンス	1.15 nmrاد
運動量収縮因子	0.00055
自然エネルギー幅	0.0815 %
直線部のラティス関数	$(b_x, b_y, h_x) = (12.7, 3.35, 0.066)$ m
減衰時間	$(t_x, t_y, t_s) = (8.5, 11.9, 7.5)$ ms
偏向磁石による放射損失	0.57 MeV
RF加速周波数	508 MHz
RF加速電圧	3 MV
ハーモニック数	576
自然バンチ長	3.43 mm (11.1 ps)

# ビーム動力学上の非線形補正による安定性の確保

$$\left(\frac{\partial v_x}{\partial \delta}, \frac{\partial v_y}{\partial \delta}\right), \left(\frac{\partial v_x}{\partial J_x}, \frac{\partial v_y}{\partial J_y}\right), \left(\frac{\partial v_x}{\partial J_y}, \frac{\partial v_y}{\partial J_x}\right), \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial \delta \delta}, \frac{\partial^2 v_y}{\partial \delta \delta}\right), \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial \delta J_x}, \frac{\partial^2 v_y}{\partial \delta J_x}\right), \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial \delta J_y}, \frac{\partial^2 v_y}{\partial \delta J_y}\right), \dots$$

十分な力学的口径（安定に周回しうる位相空間領域）を得るために

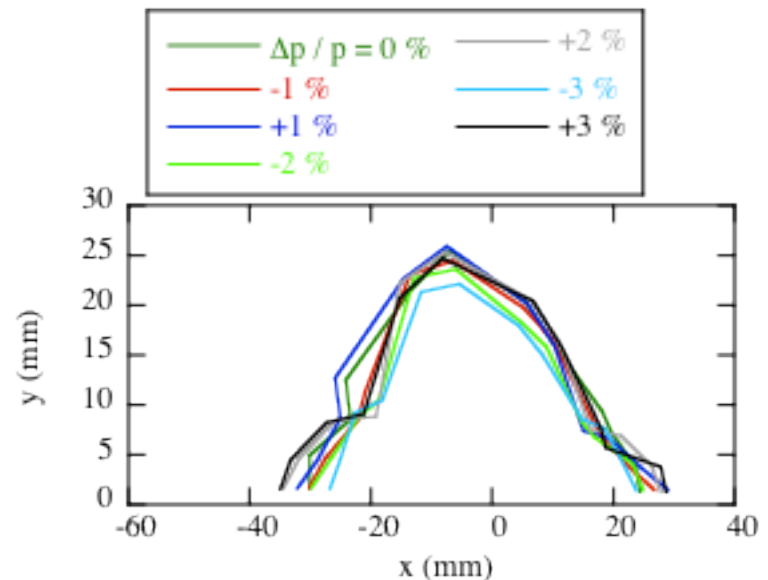


消したいチューンシフトの数と同数以上のファミリーの非線形磁石を用いて最適化する

2

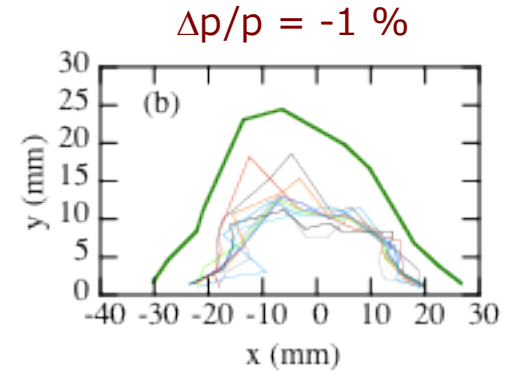
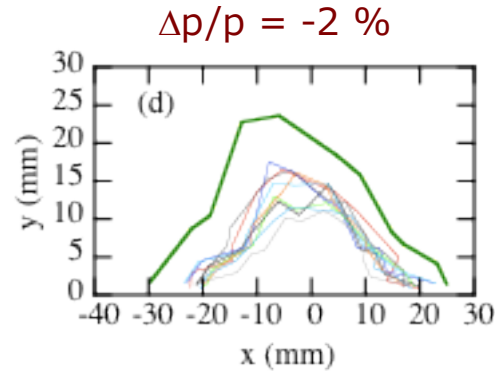
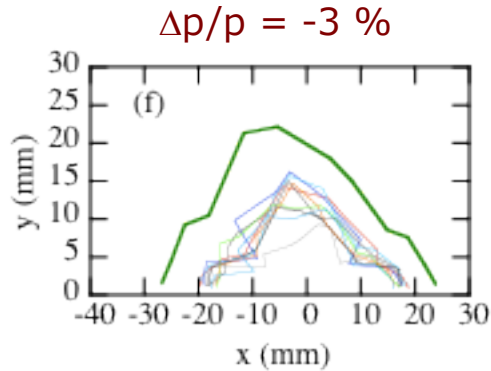
## 遺伝的アルゴリズム Genetic Algorithms (GA) とは

- 遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms : GA) とは生命の進化 (evolution of life) のように、交叉 (crossover)、突然変異 (mutation)、淘汰 (selection) を繰り返しながら環境に適応することをコンピュータ上で模擬したもの
- データ (解の候補) を遺伝子で表現した「個体 (individual)」として扱い、「個体」の集まりである「集団 (population)」の進化の過程をシミュレートすることで最適化問題を解く手法
- 解が適合度という形で評価できるなら解の適合度に対する連続性や可微分性がなくても答えを探ることができる → 不連続な関数やキックのある関数の解を見つけることができる
- (注) GA は厳密解を与えるものではなくて確からしい解を導くもの。
- (Note) GA will not get the exact solution, but may lead a solution close to that.

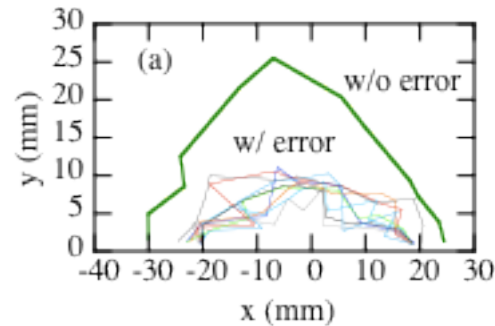


オンモーメンタム粒子及びオフモーメンタム粒子に関するダイナミックアパーチャー（直線部で観測）

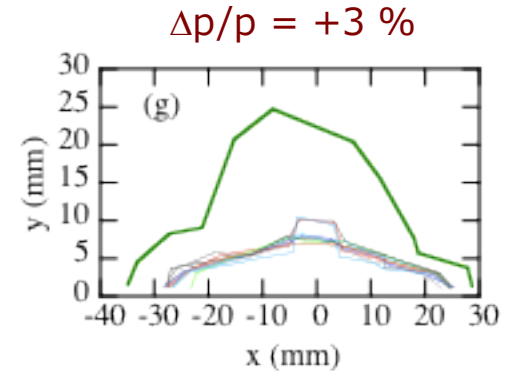
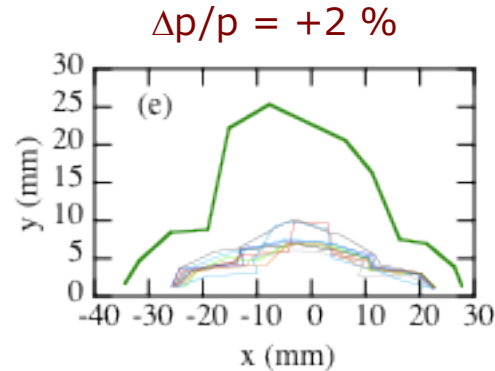
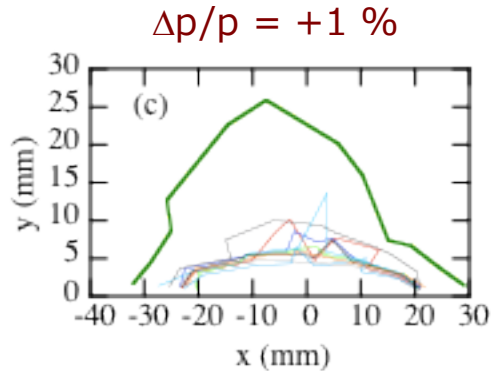
# 六極磁石のアライメントエラー ( $\sigma = 50 \mu\text{m}$ , $2\sigma$ cut) による力学的口径の縮小



$\Delta p/p = 0\%$



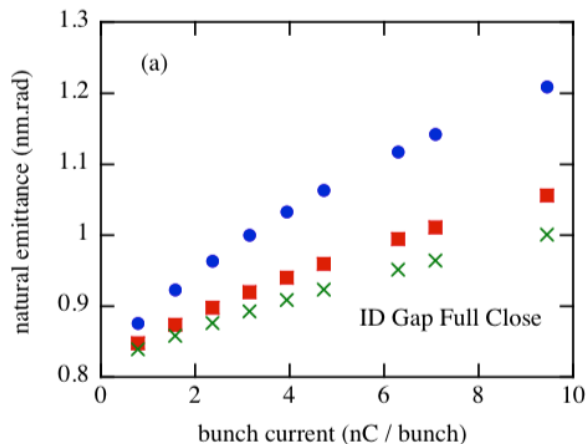
良好な結果が得られた！



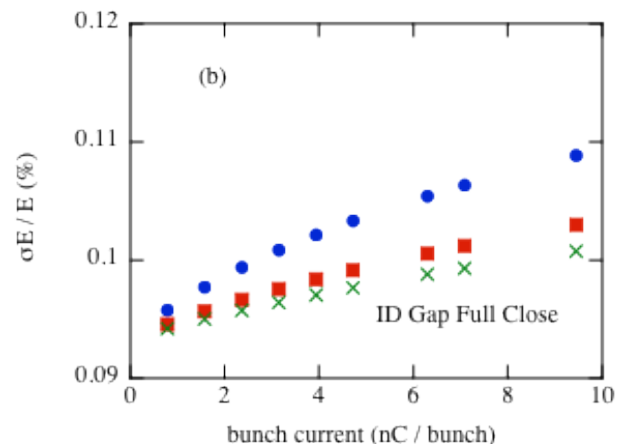
# 全ての挿入光源を最小ギャップにした場合の電流依存ビーム性質変化 (水平 $\square$ 垂直エミッタンス結合比 $\kappa$ )

1 nC/bunch => 169 mA (1/3 buckets case)  
400 mA => 2.36 nC/bunch

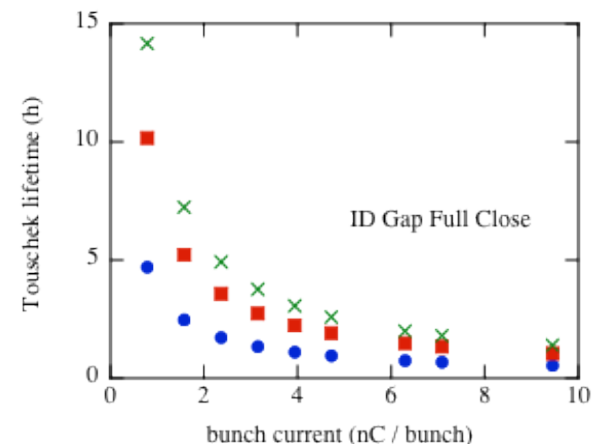
水平エミッタンス



エネルギー広がり



タウシェク寿命

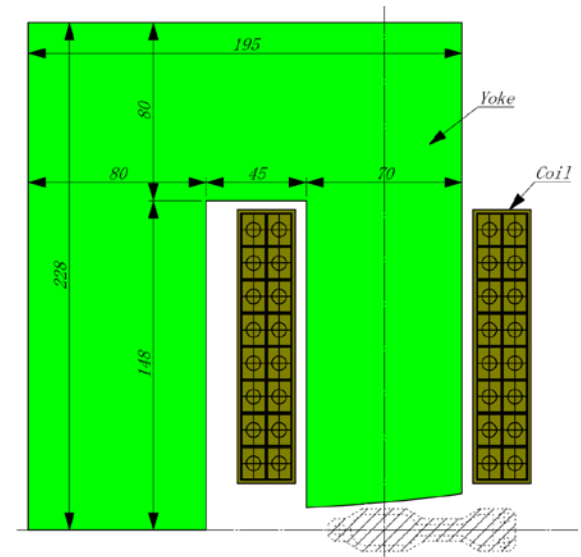
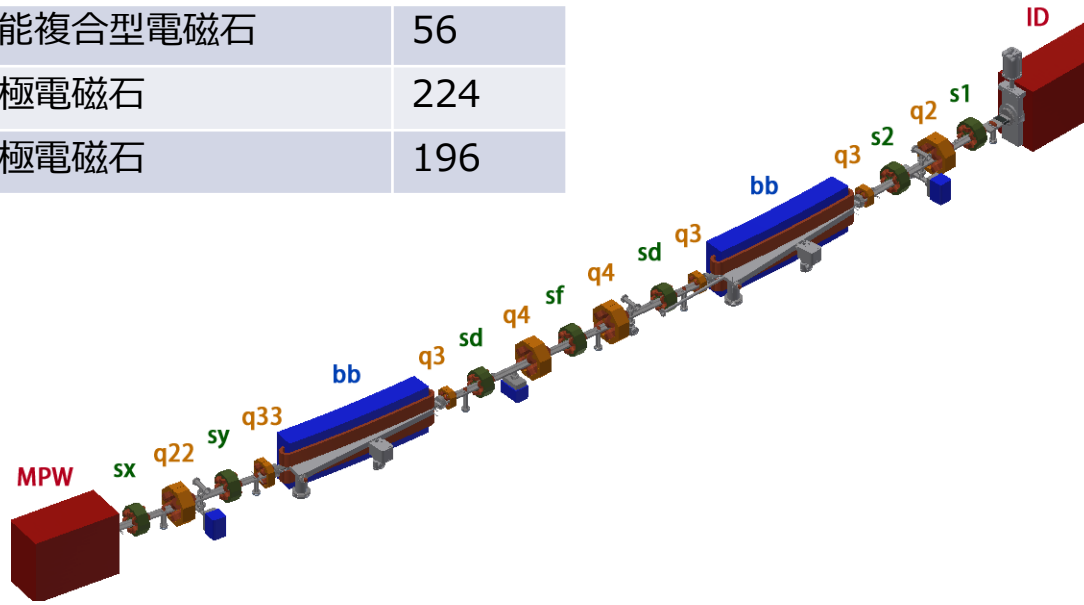


- $\kappa = 0.2\%$
- $\kappa = 1\%$
- ×  $\kappa = 2\%$

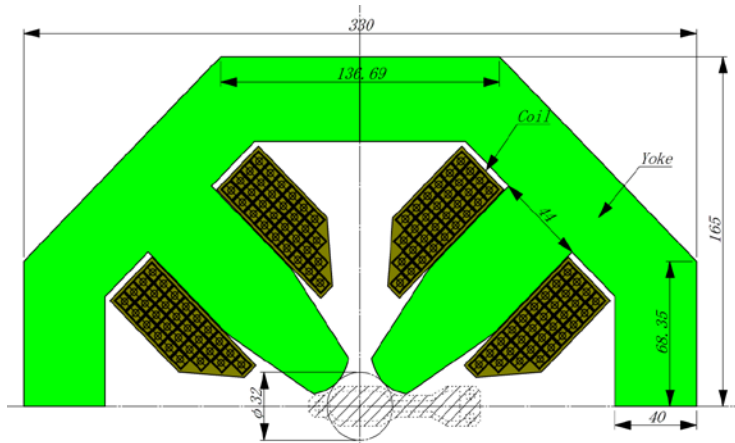
- 挿入光源による放射減衰効果が大きい -> エミッタンス減少
- 400mA以上の高電流運転では光源性能劣化は免れない
- 400mA以下でもトップアップ運転は必須
- リングインピーダンスやCSRによる不安定性の詳細調査が必要

# 電磁石

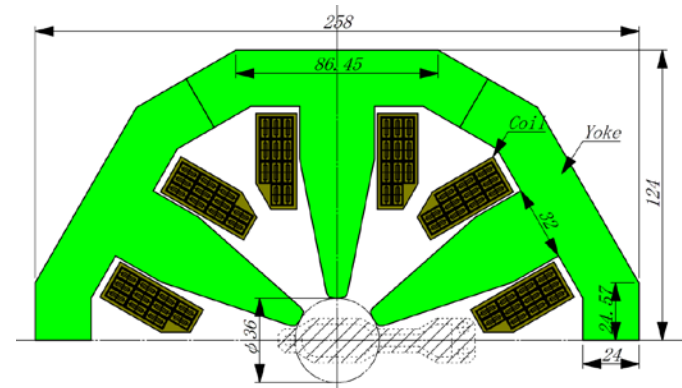
電磁石	員数
機能複合型電磁石	56
4極電磁石	224
6極電磁石	196



偏向電磁石



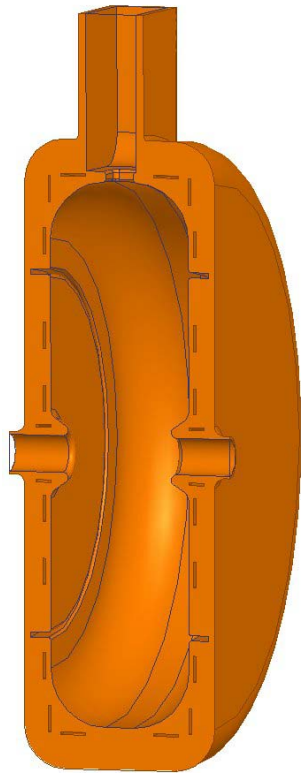
4極電磁石



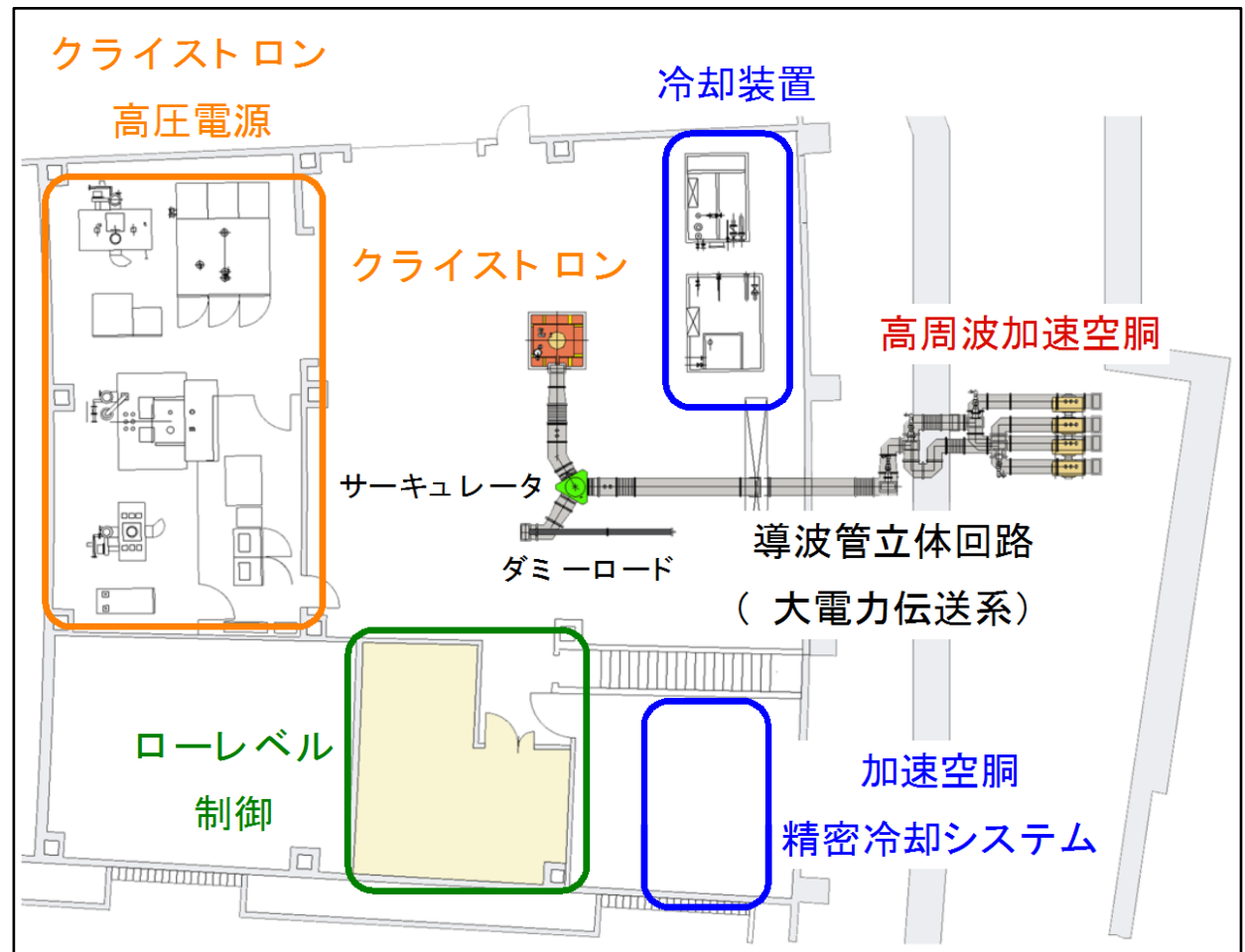
6極電磁石

# 高周波加速系

加速電圧：3 MV, 最大放射パワー：480kW, 空洞ロスパワー：340 kW



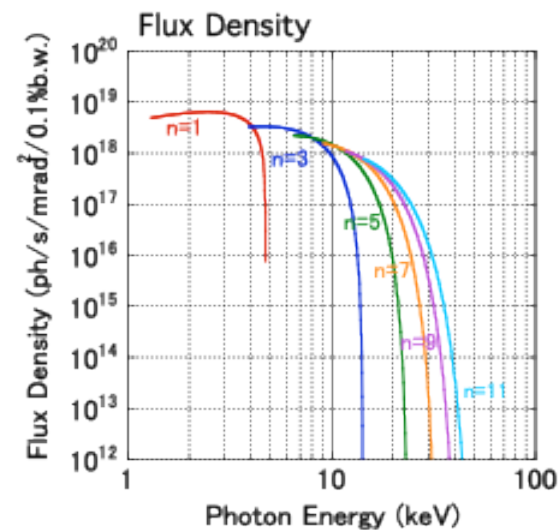
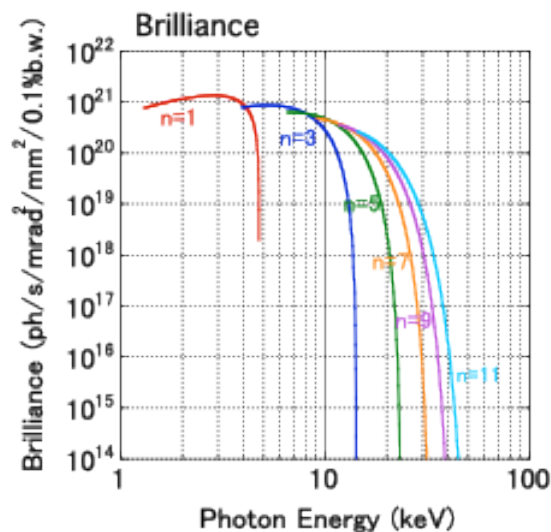
HOM抑制TM020空洞  
シャントインピーダンス 6.8 M $\Omega$   
無負荷Q値 60300  
R/Q 113



# 挿入光源

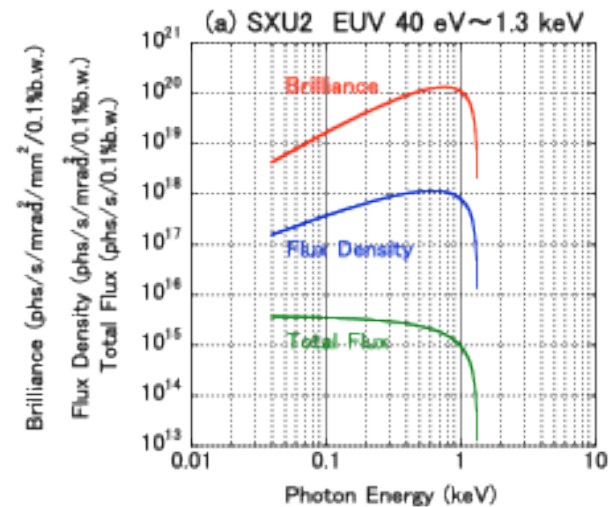
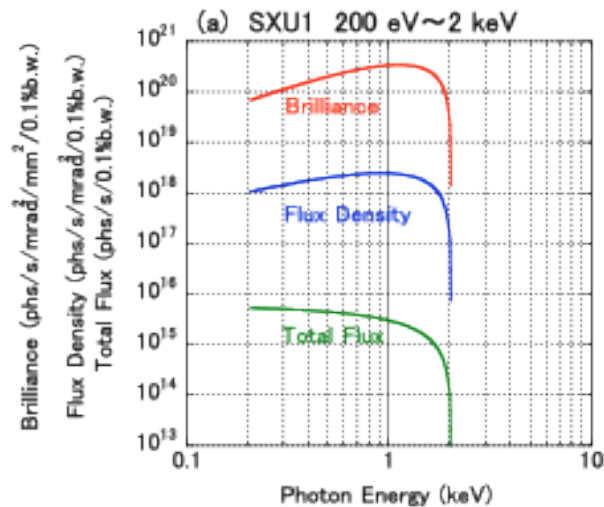
代表的な挿入光源の光子エネルギー範囲、輝度/フラックス密度、放射光パワー分布の角度広がり、全放射パワー  
 輝度 [photons/s/mrad<sup>2</sup>/mm<sup>2</sup>/0.1%b.w.]、フラックス密度 [photons/s/mrad<sup>2</sup>/0.1%b.w.]

	ID type	光子エネルギー [keV]	Brilliance/ Flux Density	放射パワー密度分布 最大角度広がり H/V [mrad]	最大全放射 パワー [kW]
HXU 5m ID sec.	planar	1.3 ~ 30	10 <sup>19</sup> ~ 10 <sup>21</sup> / 10 <sup>17</sup> ~ 10 <sup>19</sup>	±0.5 / ±0.4	18.5
SXU1 5m ID sec.	helical	0.2 ~ 2.0	~ 10 <sup>20</sup> / ~ 10 <sup>18</sup>	±1.0 / ±1.0	11.4
SXU2(EUV) 5m ID sec.	helical	0.04 ~ 1.3	10 <sup>19</sup> ~ 10 <sup>20</sup> / 10 <sup>17</sup> ~ 10 <sup>18</sup>	±1.5 / ±1.5	18.3
MPW 1m short ID sec.	planar	1 ~ 100	10 <sup>15</sup> ~ 10 <sup>17</sup> / 10 <sup>13</sup> ~ 10 <sup>15</sup>	±1.7 / ±0.5	6 ~ 7



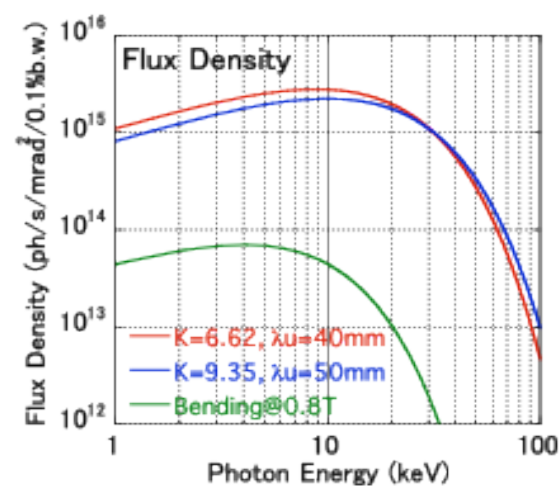
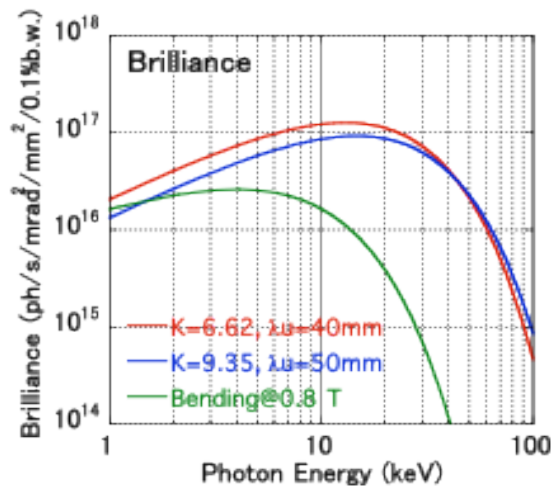
HXU ( $\lambda_u = 18$  mm,  $N_u = 241$ ,  $K_{max} = 2.3$ ) からの放射@400mA





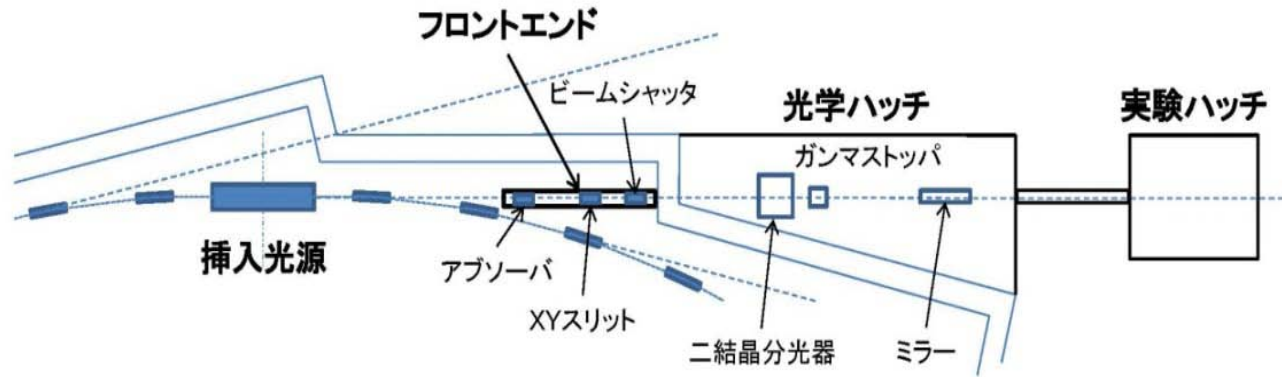
SXU1 ( $\lambda_u = 42$  mm,  $N_u = 104$ ,  $K_{\max} = 2.97$ ) からの放射@400mA

SXU2 ( $\lambda_u = 64$  mm,  $N_u = 68$ ,  $K_{\max} = 53.74$ ) からの放射@400mA

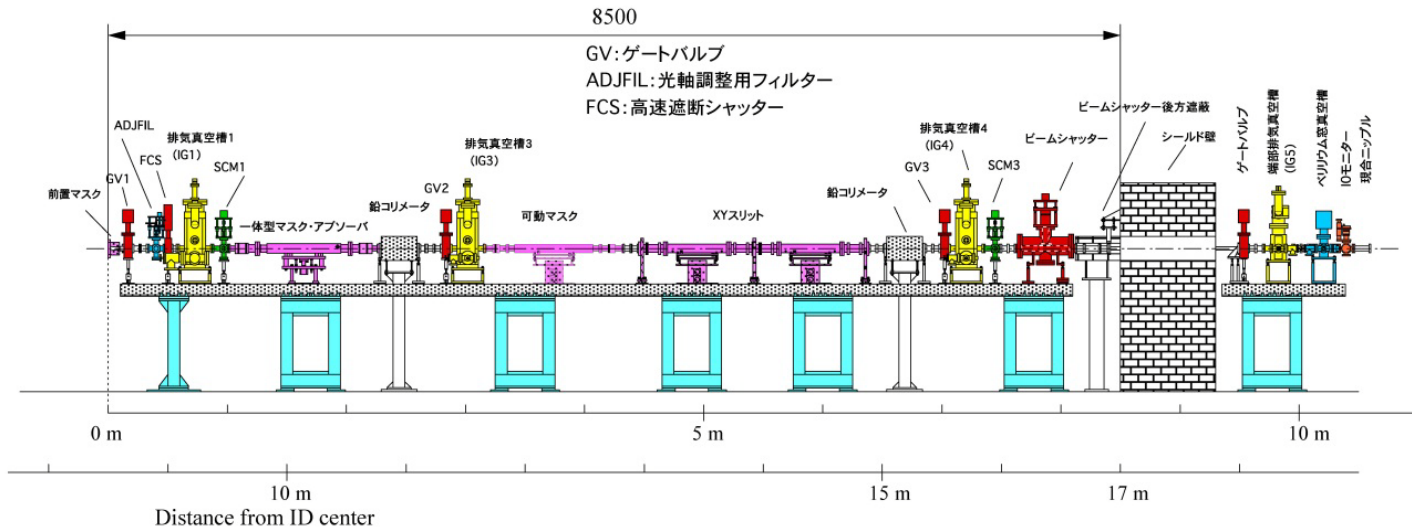


MPW1 ( $\lambda_u = 40$  mm,  $N_u = 20$ ,  $K_{\max} = 6.62$ )、MPW2 ( $\lambda_u = 50$  mm,  $N_u = 16$ ,  $K_{\max} = 9.35$ )及びBend(0.8T)からの放射@400mA

# ビームライン



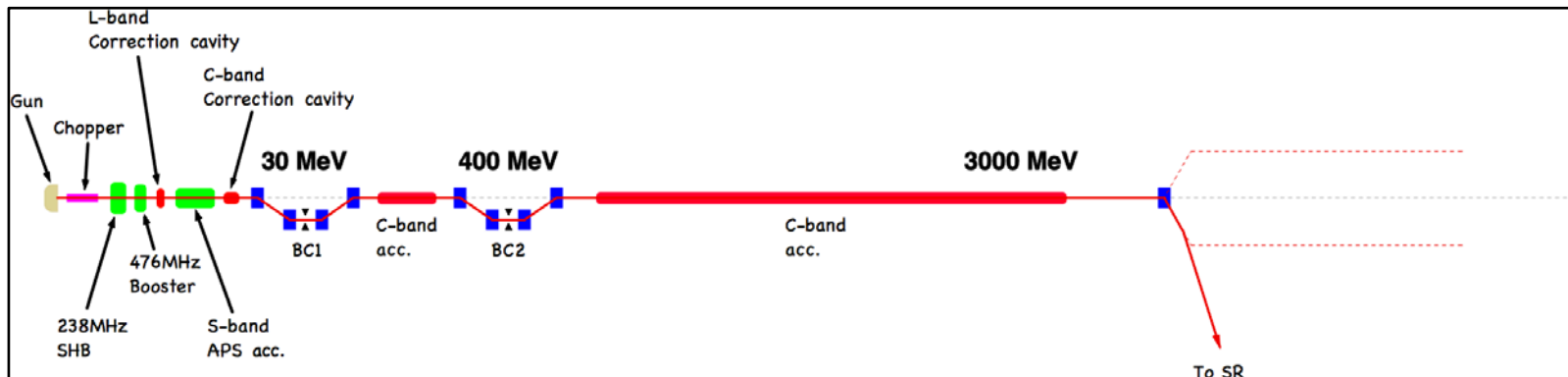
## ビームラインの全体構成案



## フロントエンドの機器レイアウト案 (X線アンジュレータビームライン用)

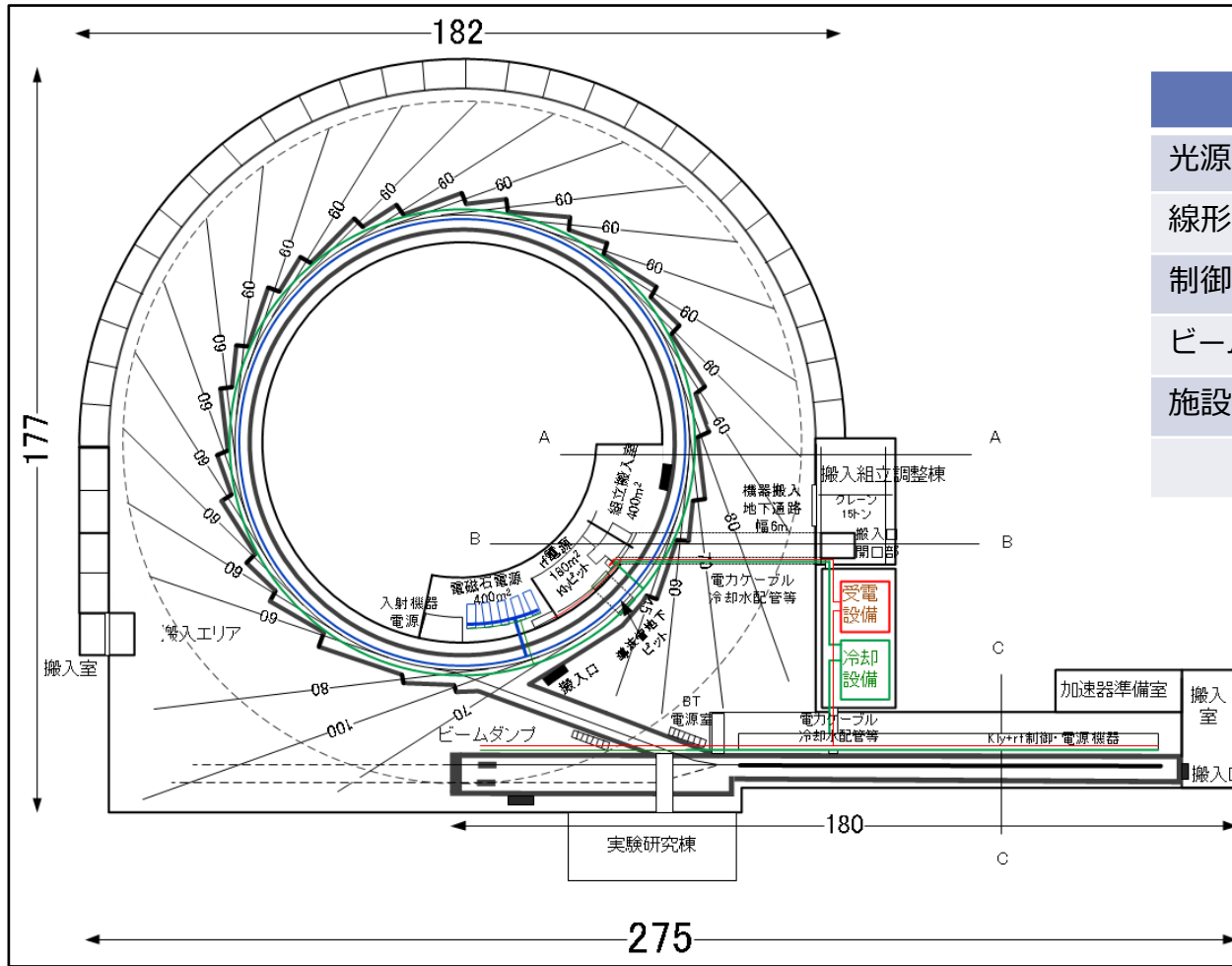
# Cバンド-フルエネルギー線形入射器

線形入射器の諸性能		
Beam energy	E	3 GeV
Energy spread	$\Delta E/E$	< 1 %
Energy stability	$\delta E$	< 0.1 %
Beam charge	Q	~ 1 nC (max) 0.5 nC (通常積み上げ時)
Charge stability	$\delta Q$	~ 1 %
Normalized emittance	$\gamma\varepsilon$	< 5 mm.mrad (入射用) ~ 1 mm.mrad (本文参照)
Unnormalized emittance	$\varepsilon$	< 1.7 nm.rad
Bunch length	$\tau$	< 5 ps
Repetition rate	$f_{\text{rep}}$	25 Hz (max)



入射器のレイアウト案

# 建屋・消費電力



建屋平面図

消費電力見込み	
光源リング	2.02
線形入射器	0.25
制御系	0.10
ビームライン・実験系 (24本)	0.24
施設・ユーティリティ	1.10
計	3.71 MW

約15400平米の加速器施設棟の屋上に0.22kw/m<sup>2</sup>の発電能力を持つソーラーパネルを設置すれば約3.4MWの発電量を得ることができ、ほぼ運転消費電力をまかなうことができる。