

東北放射光計画

Synchrotron Light in Tohoku, Japan (SLiT-J)

~~(LSEJ)~~

－ 光源加速器システムの概要 －

Outlook of Light Source Accelerator Complex

version 2013.5

濱 広幸、早稲田嘉夫 + ビーム物理研究部門

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/理研

SLiT-J/STIR

Synchrotron Light in Tohoku, Japan / Science, Technology, Innovation and Reconstruction

我が国の基礎科学と産業技術の革新的振興を図るとともに、ものづくり産業の優位性の維持とさらなる発展に活用するため、東北地方に中型高輝度リング型放射光施設の設置を目的に東北地区にある7つの国立大学法人の学長で構成された「東北放射光施設推進会議」が、平成24年8月30日に文部科学大臣に対し要望書を提出した。

東北放射光施設は、軟X線領域に特化した3GeV光源で、硬X線領域に優れた性能を有する既設のSPring-8と相互に補完する関係にあり、我が国がこの2つの光源を併せ持つことによって、基礎科学と産業技術の融合に顕著な相乗効果が期待される。



東北から世界に発信する産官学イノベーション

次世代エネルギー ライフサイエンス ●●○

弘前大学: 北日本新エネルギー研究所 (パンフレットより) | 青森県産業技術センター: HPより (<http://www.aomori-ic.or.jp/pg/>)

次世代金属材料 ●●○

地域イノベーション戦略支援プログラム(パンフレットより)

資源回収 ● **磁気記録技術** ●●

地域産官共同研究拠点 整備事業(パンフレットより) | JSイノベーションサテライト 岩手HPより

山形県 **宮城県**

有機エレクトロニクス ●●○△ **バイオ** ●●○

産官学連携有機エレクトロニクス産業化推進センター | 都市エリア産官学連携促進事業(パンフレットより)

次世代医療産業 ●●○○

地域イノベーション戦略支援プログラム(パンフレットより)

青森県 **秋田県** **岩手県** **福島県**

●: 地域卓越研究者戦略的推薦プログラム(JST) ●: 先端融合領域イノベーション抽出拠点形成(JST)
 ●: 地域イノベーション創出総合支援事業(JST) ○: 地域イノベーション戦略推進地域(MEXT)
 ●: 産学共創基盤整備研究プログラム(JST) ○: 都市エリア産官学連携促進事業(MEXT)
 ●: 地域産官共同研究拠点整備事業(JST) ○: 地域イノベーション戦略支援プログラム(MEXT)

○: 低炭素ネットワーク(MEXT) ▲: 最先端研究開発支援プログラム(JSPS)
 △: 各種NEDO事業

東北地域には、産業イノベーションを先導する多彩な産業クラスター地域が存在

SLiIT-J光源施設建設コンセプト

新サステイナブル産業の創世によるグリーンイノベーション

- 放射光ナノアプリケーションによって、東北地域が持つ高い産業ポテンシャルを最大限引き出し、高付加価値製品を開発するとともに新産業を創成する。
- 本邦のものづくりの国際優位性維持と発展に貢献する。

SPring-8と同等の光源性能を低コスト点短期間で建設

- 既存の加速器、放射光、分析技術を最大限に集約する。
- 建設コストを300億円以下に抑え、建設期間も3年以内をめざす。

水平エミッタンス1.2nmrad以下

- アジア最高輝度の世界最高水準の放射光を提供する。

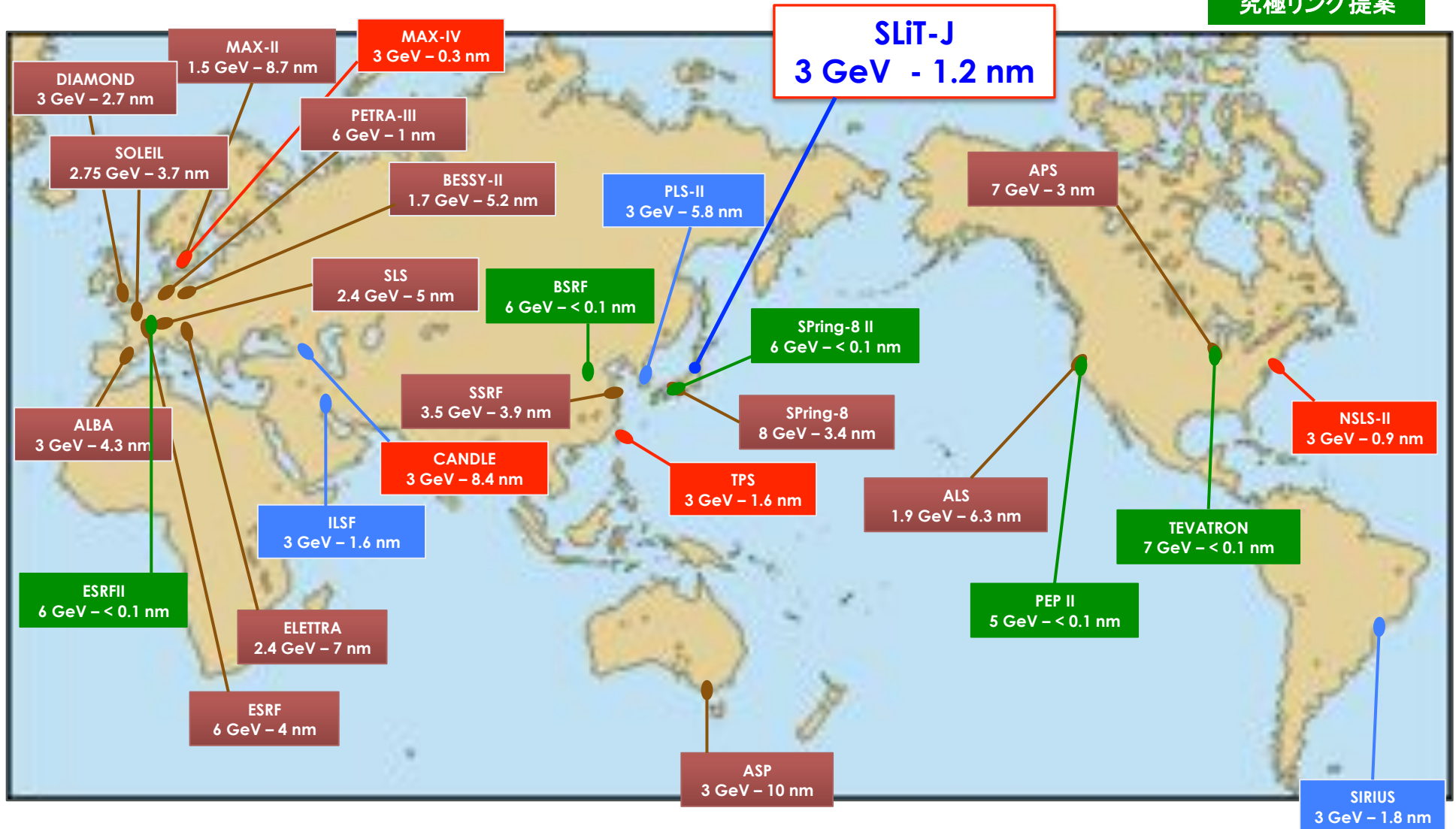
徹底的省エネ設計

- 消費電力3MW程度に抑える。
- 施設内にメガソーラを設置し、大部分の電力の地産地消を可能にする。

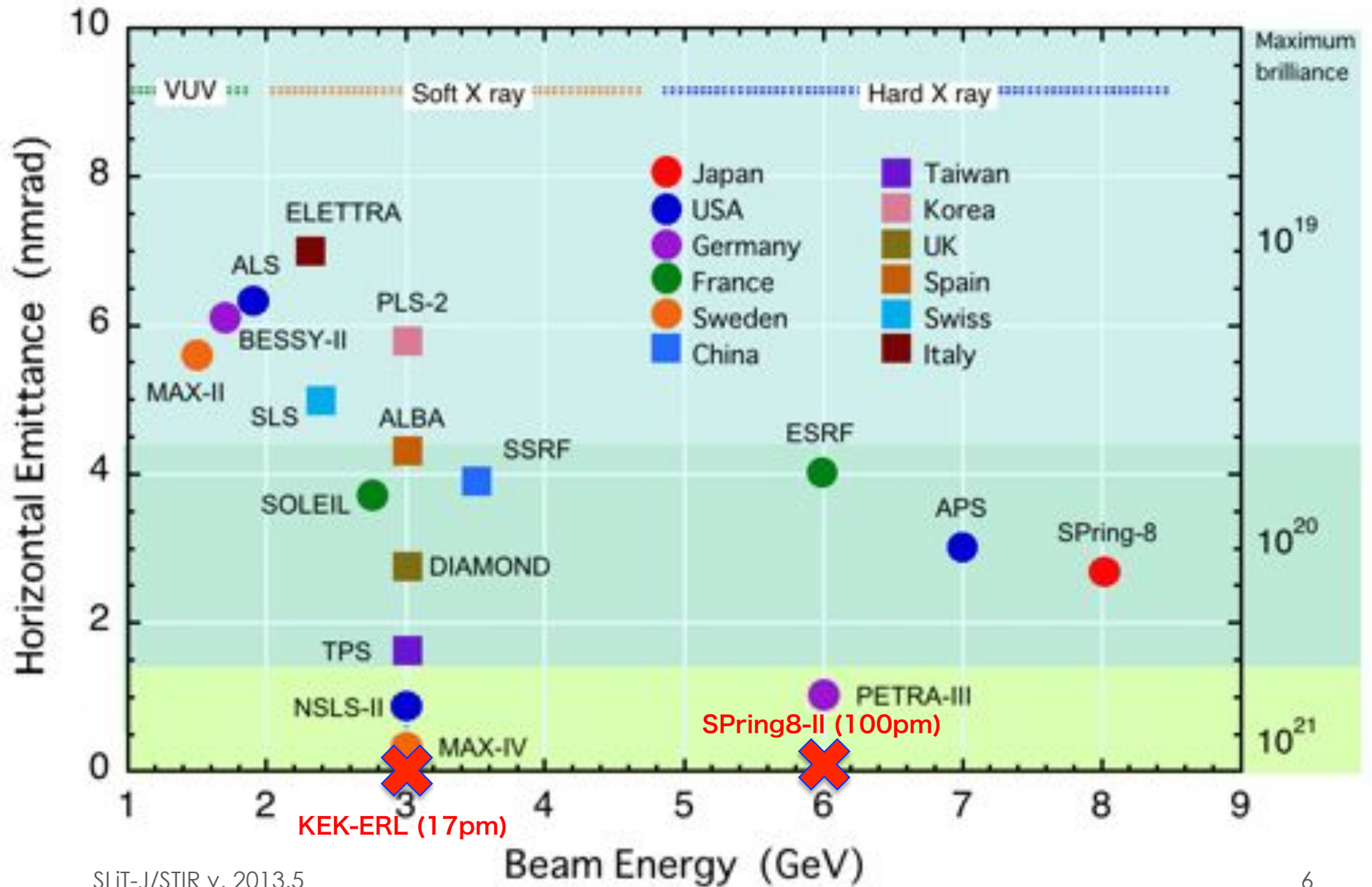
今だならぬ東日本大震災からの真の復興のシンボルとしても！

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

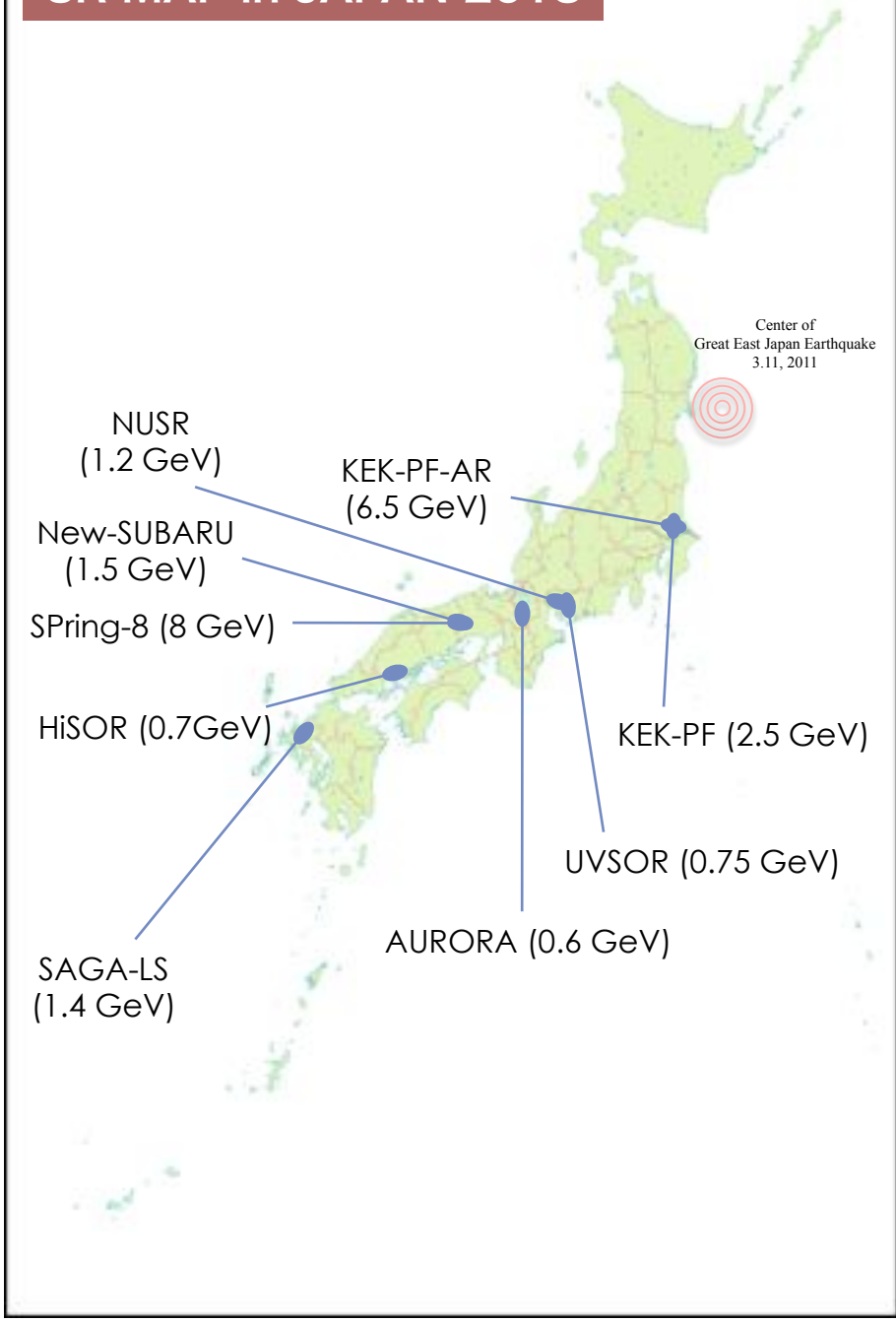
運転中
建設中
計画中
究極リング提案



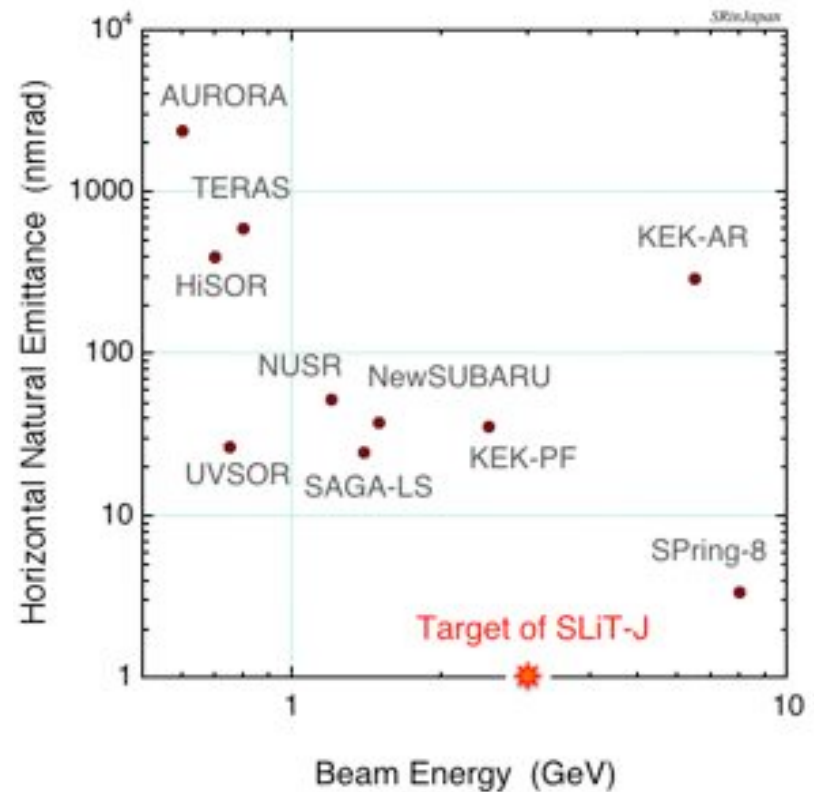
Emittance vs beam energy of 3rd generation light sources in the world



SR MAP in JAPAN 2013

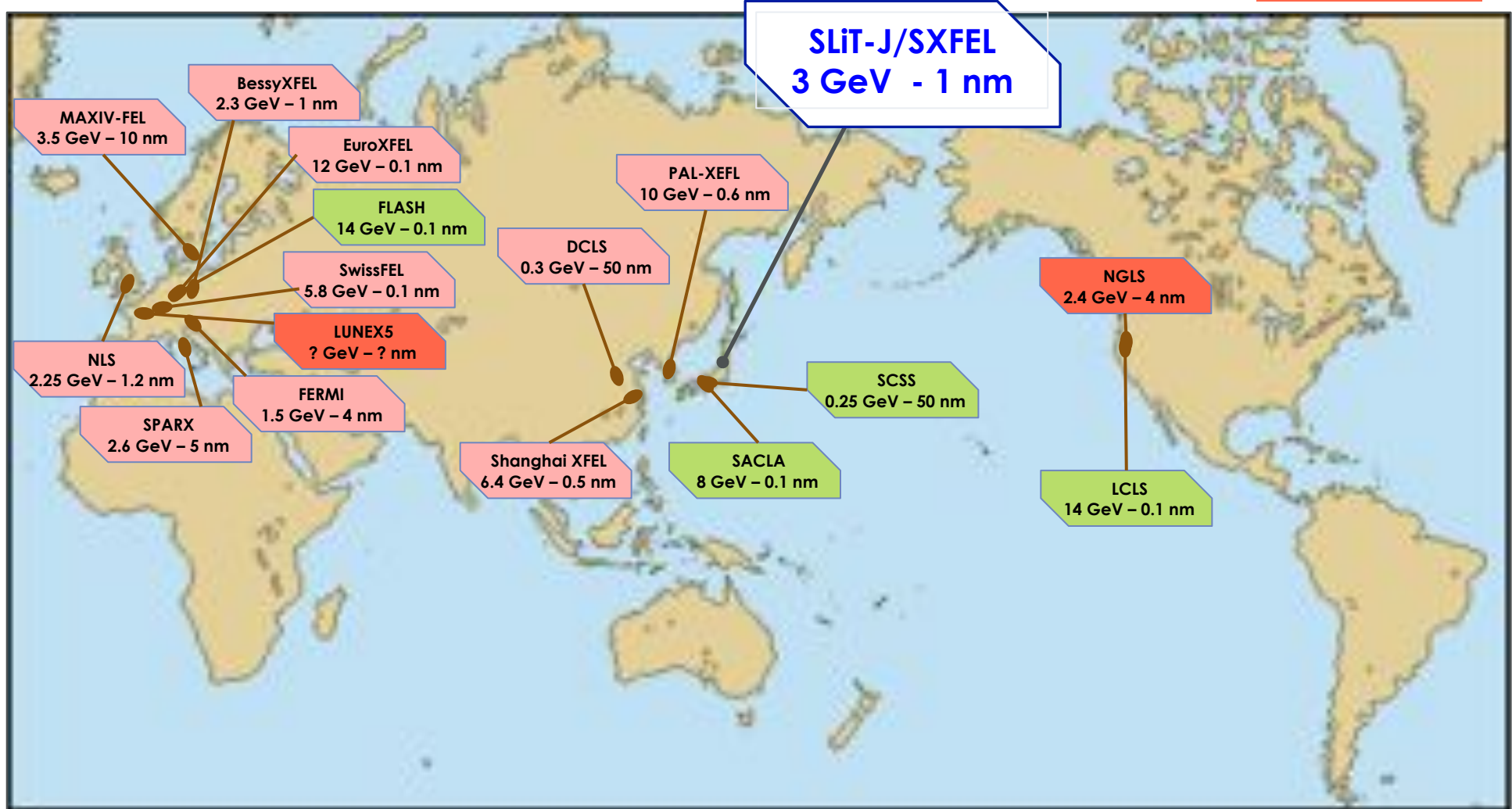


国内には多数の小規模放射光リングがあるが、第3世代リングはSPring-8のみで、各国が保有・建設している最新の3GeVクラス高輝度リングはない。また施設のすべてが関東以西にあり、東北・北海道には放射光拠点がない。



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



● SLiit-J/STIR v. 2013.5 **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 ² /mrad ² /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

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

$$\varepsilon_x = C_q\gamma^2 \frac{\oint H/\rho^3 ds}{\oint 1/\rho^2 ds - \oint (1-2n)\eta/\rho^3 ds} \quad H(s) = \gamma\eta^2 + 2\alpha\eta\eta' + \beta\eta'^2 \quad J_x = 1 - \frac{\oint (1-2n)\eta/\rho^3 ds}{\oint 1/\rho^2 ds}$$

●理論的最小エミッタンス

Theoretical minimum emittance

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

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

θ ; bending angle (rad)

J_x ; horizontal damping partition (~ 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

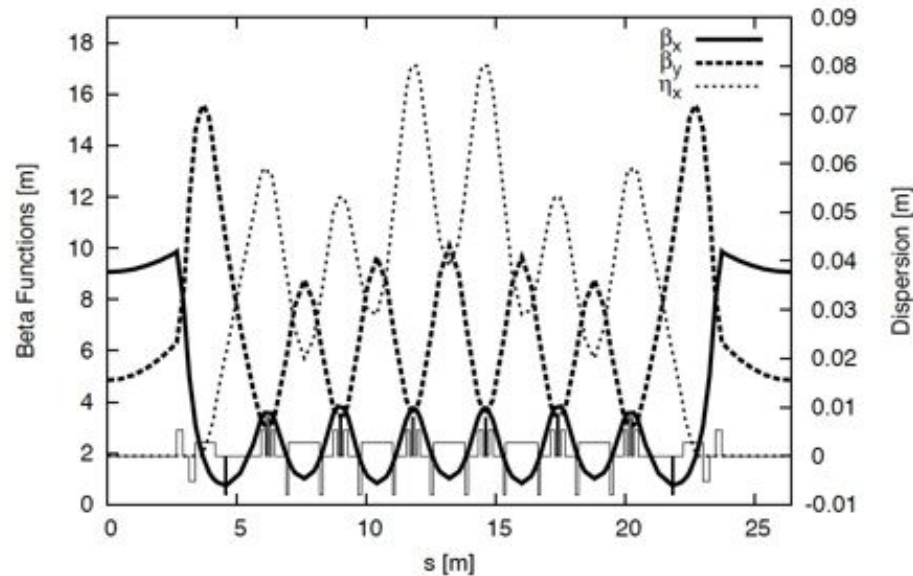



FIG. 2: Beta functions β_x , β_y and dispersion η_x for one achromat of the 3 GeV storage ring. The position of the dipoles, quadrupoles, and sextupoles are indicated at the bottom.

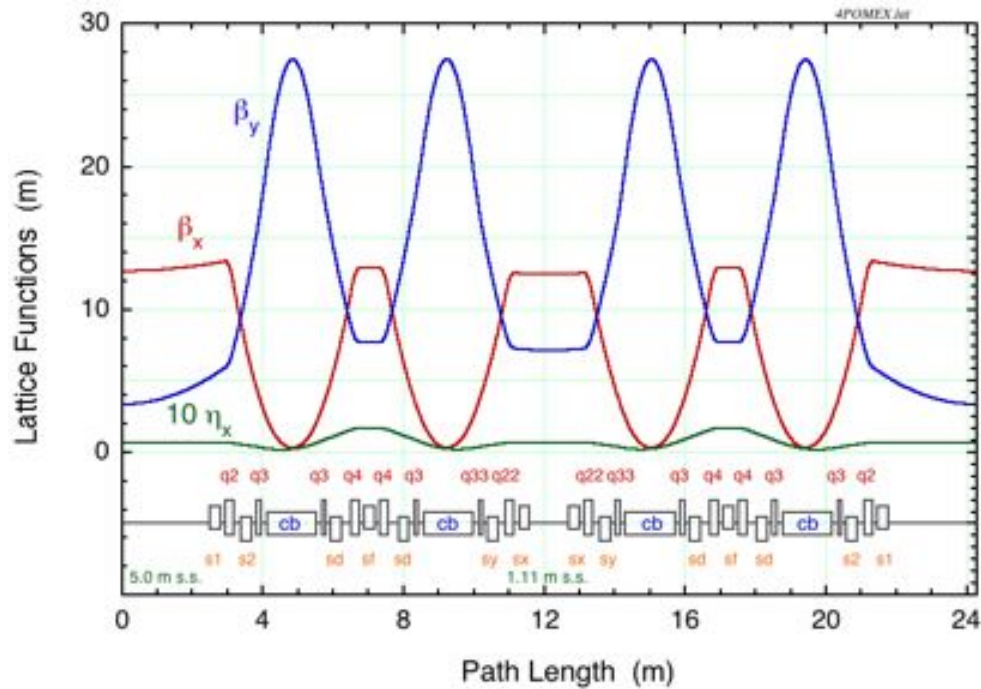
TABLE I: Parameters for the MAX IV 3 GeV storage ring. Permanent-magnet damping wigglers (PMDWs) are used to further reduce the storage ring emittance (see Section II C).

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	3.07×10^{-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	$\pm 4.5\%$

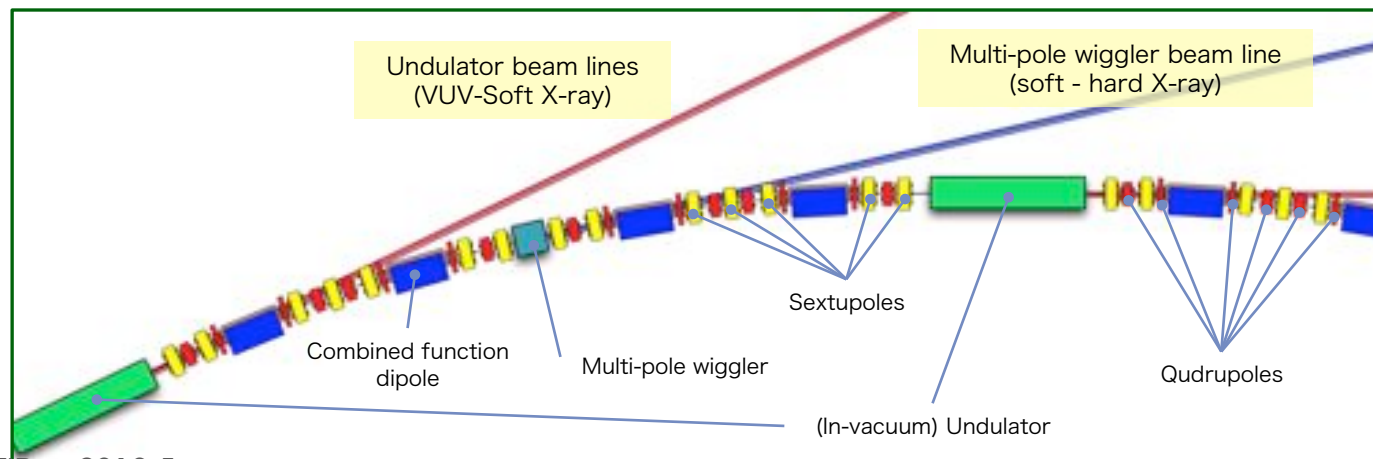
- 7つの偏向磁石でセルを構成（両端のそれは半分の長さ）して、低エミッタンス化。
- マルチポールウィグラーを導入して放射減衰効果を増強し更に低エミッタンスを狙う。
- 1セルが長いので周長が530mもありながら20セル。
- クロマティシティー補正の6極磁場が非常に強く、そのためにビーム動力学上の非線形性も極めて強い。
- その補正に8極磁石まで動員  極端に複雑なビーム光学

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 (6pomex.lat)

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	(25.85, 6.75)
自然クロマチシティ	(-64.8, -44.7)
自然水平ミツタンス	1.10 nrad
運動量収縮因子	0.00055
自然エネルギー幅	0.0825 %
直線部のラティス関数	$(\beta_x, \beta_y, \eta_x) = (13.2, 2.96, 0.069) \text{ m}$
減衰分配係数	$(D, J_x, J_s) = (-0.442, 1.442, 1.558)$
減衰時間	$(\tau_x, \tau_y, \tau_s) = (8.2, 11.9, 7.6) \text{ ms}$
偏向磁石による放射損失	0.573 MeV/turn
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

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

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

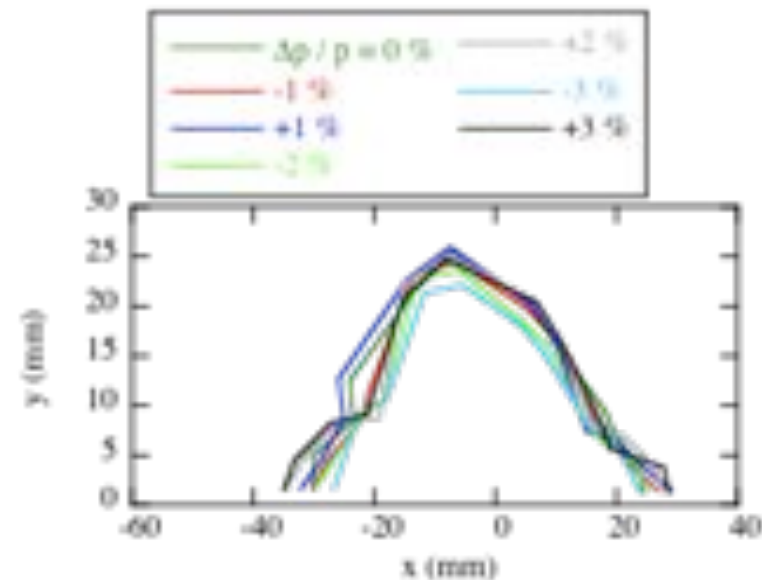


消したいチューンシフトの数と同数以上のファミリーの非線形磁石を用いて最適化する

2

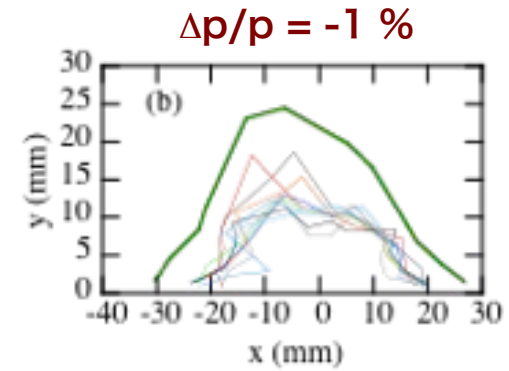
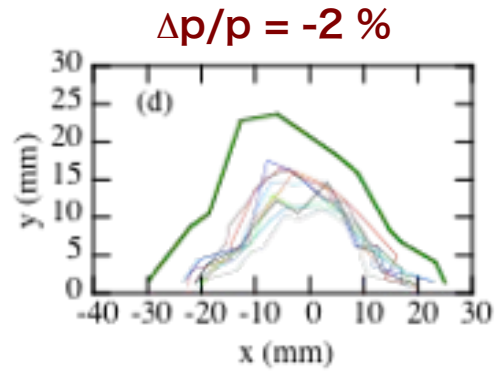
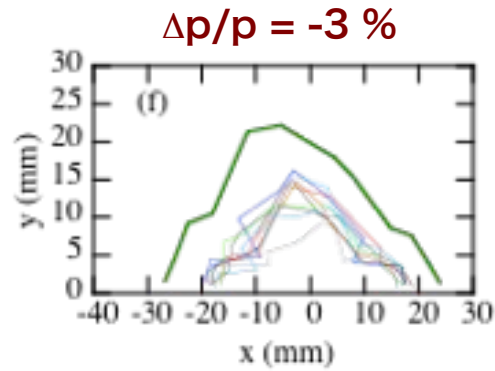
遺伝的アルゴリズム Genetic Algorithms (GA) とは

- 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.

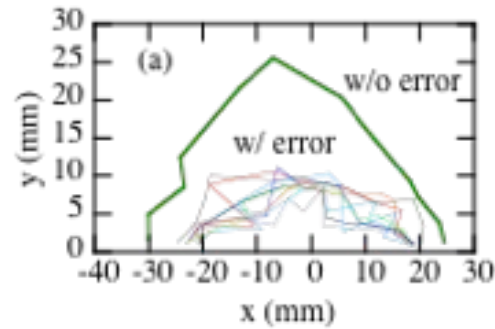


オンモーメントム粒子及びオフモーメントム粒子に関するダイナミックアパーチャー（直線部で観測）

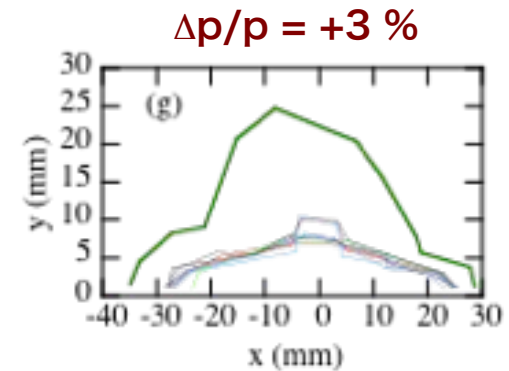
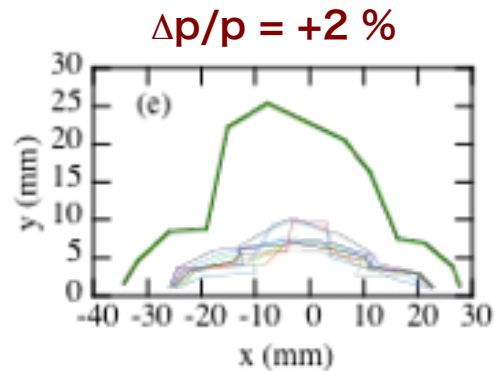
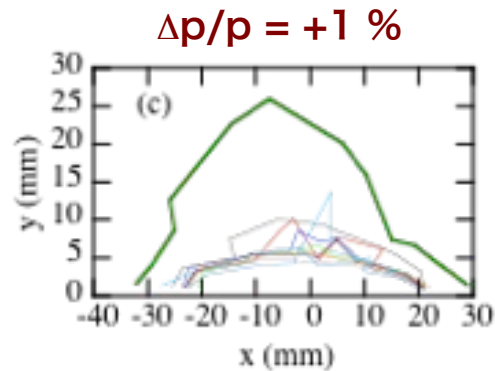
六極磁石のアライメントエラー ($\sigma = 50 \mu\text{m}$, 2σ cut) による力学的口径の縮小



$\Delta p/p = 0 \%$

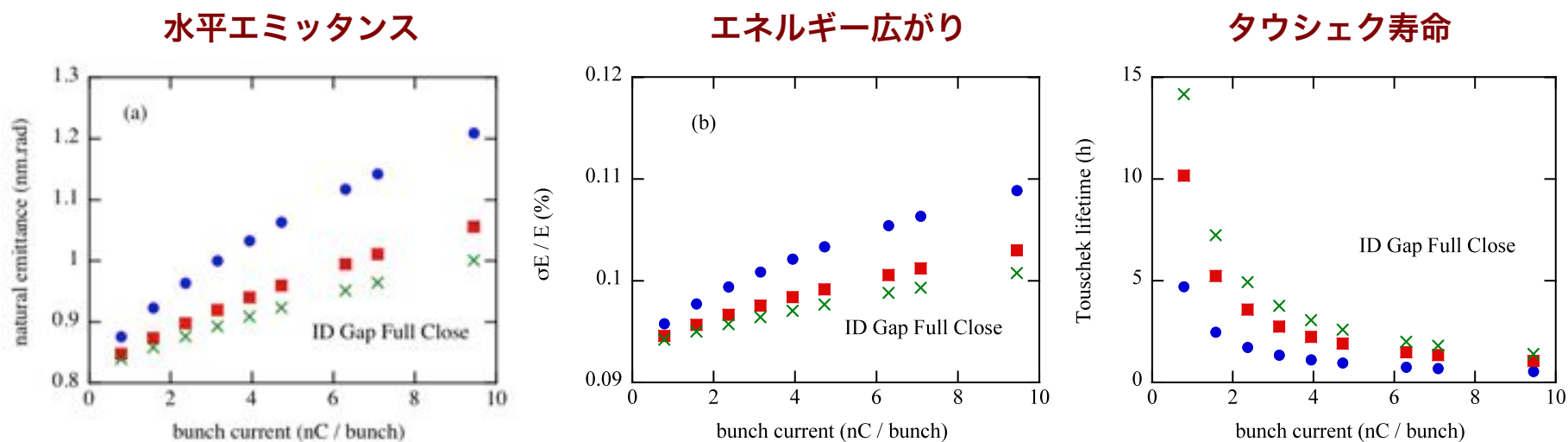


良好な結果が得られた！



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-垂直エミッタンス結合比 K)

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



● $K = 0.2 \%$

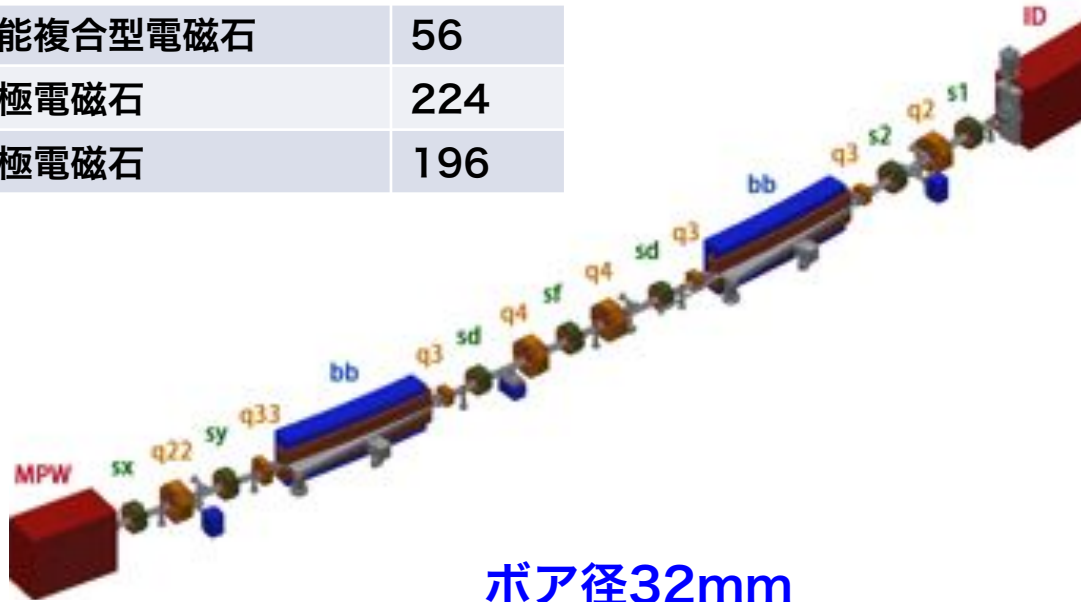
■ $K = 1 \%$

× $K = 2 \%$

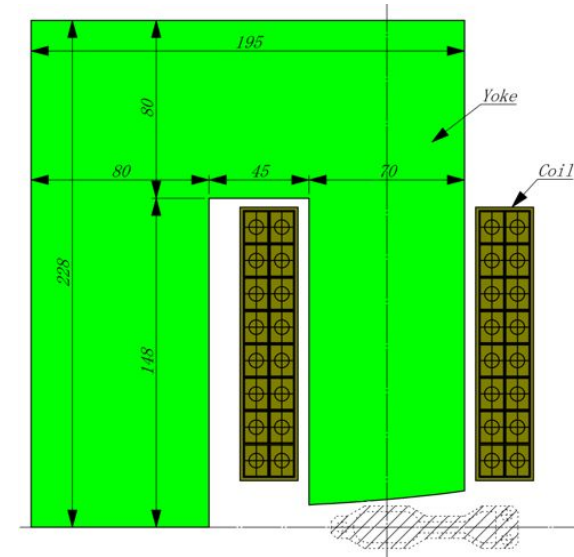
- 挿入光源による放射減衰効果が大きい -> エミッタンス減少
- 400mA以上の高電流運転では光源性能劣化は免れない
- 400mA以下でもトップアップ運転は必須
- リングインピーダンスやCSRによる不安定性の詳細調査が必要

電磁石

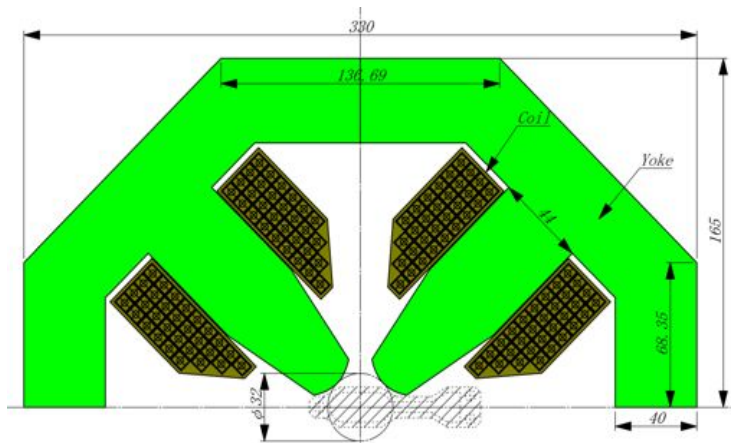
電磁石	員数
機能複合型電磁石	56
4極電磁石	224
6極電磁石	196



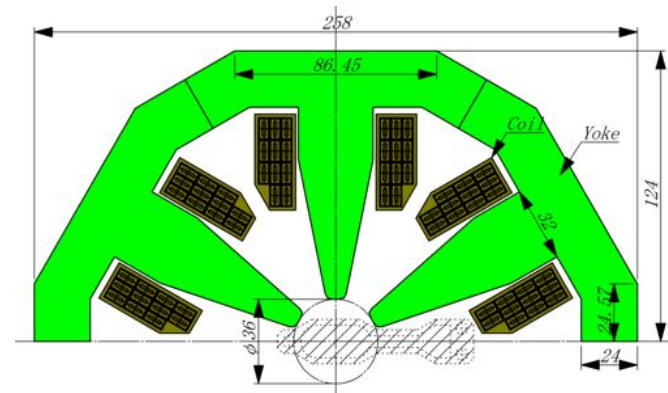
ボア径32mm



偏向電磁石



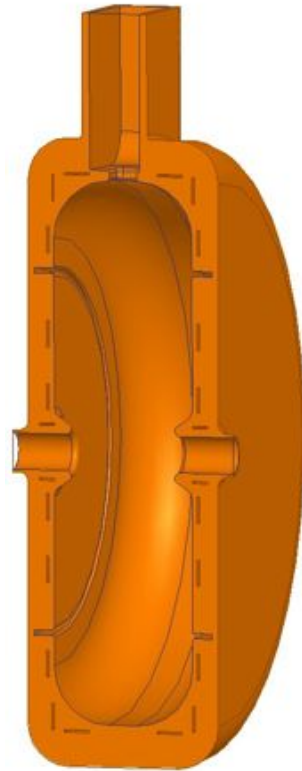
4極電磁石



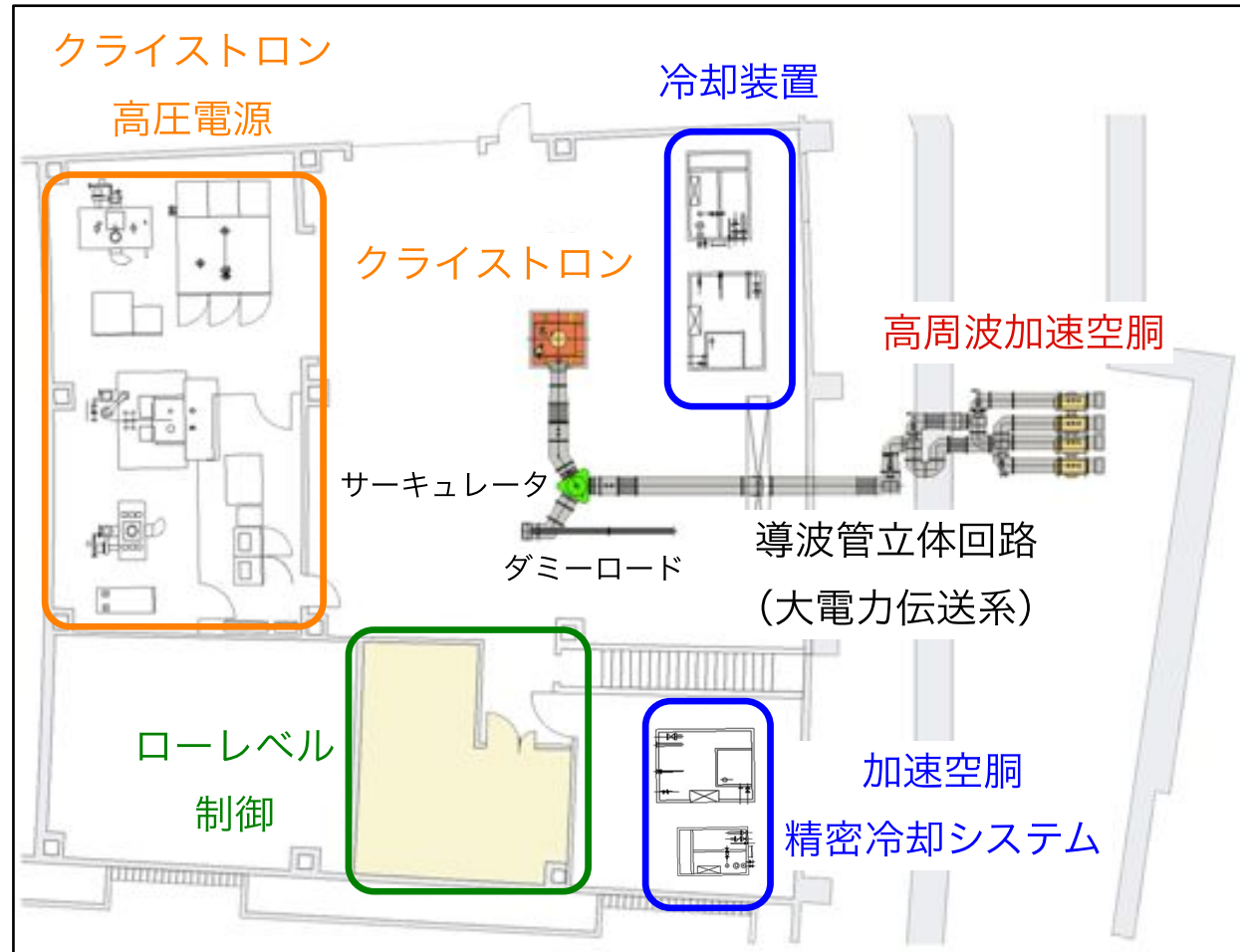
6極電磁石

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



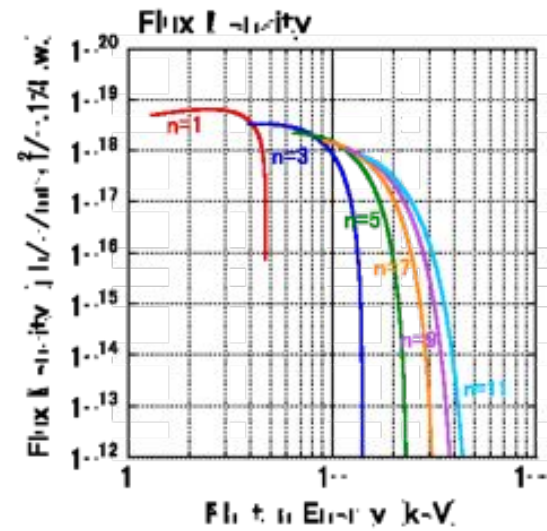
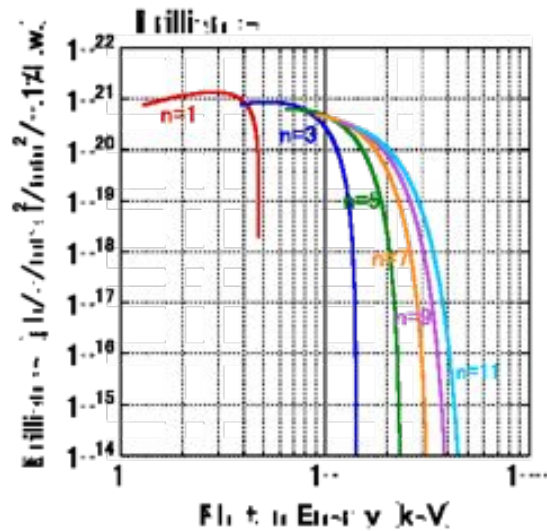
HOM抑制TM020空洞
シャントインピーダンス 6.8 MΩ
無負荷Q値 60300
R/Q 113



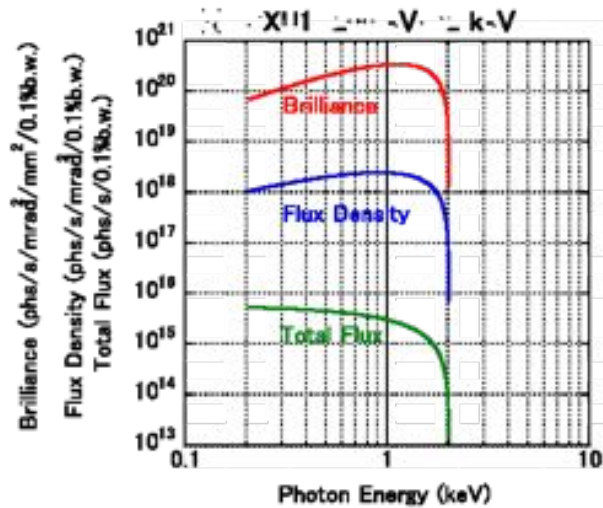
挿入光源

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/mrad²/mm²/0.1%b.w.], フラックス密度 [photons/s/mrad²/0.1%b.w.]

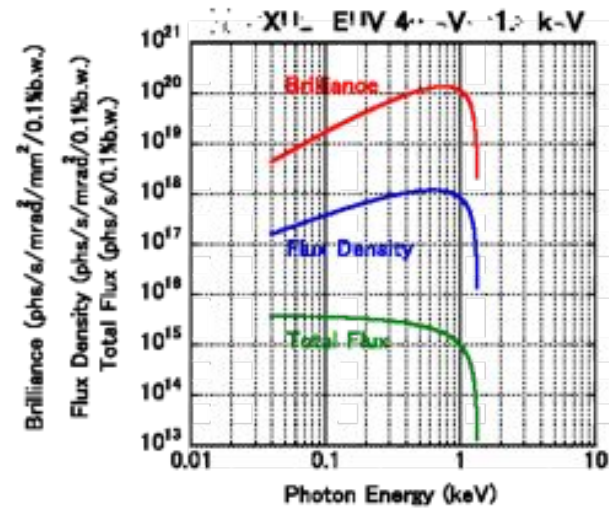
	ID type	光子エネルギー [keV]	Brilliance/ Flux Density	放射パワー密度分布 最大角度広がり H/V [mrad]	最大全放射 パワー [kW]
HXU 5m ID sec.	planar	1.3 ~ 30	$10^{19} \sim 10^{21} /$ $10^{17} \sim 10^{19}$	$\pm 0.5 / \pm 0.4$	18.5
SXU1 5m ID sec.	helical	0.2 ~ 2.0	$\sim 10^{20} /$ $\sim 10^{18}$	$\pm 1.0 / \pm 1.0$	11.4
SXU2(EUV) 5m ID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



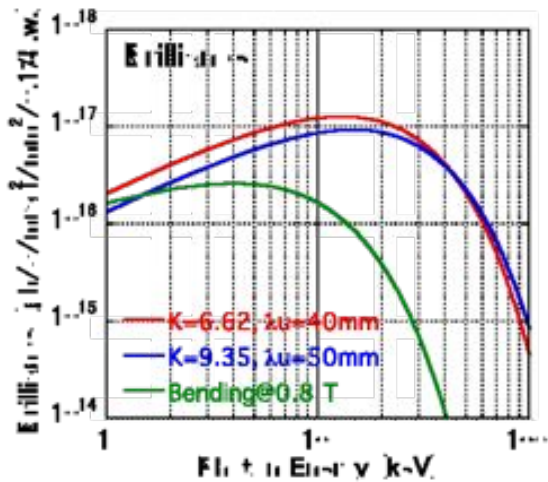
HXU ($\lambda_u = 18 \text{ mm}$, $N_u = 241$, $K_{\text{max}} = 2.3$) からの放射@400mA



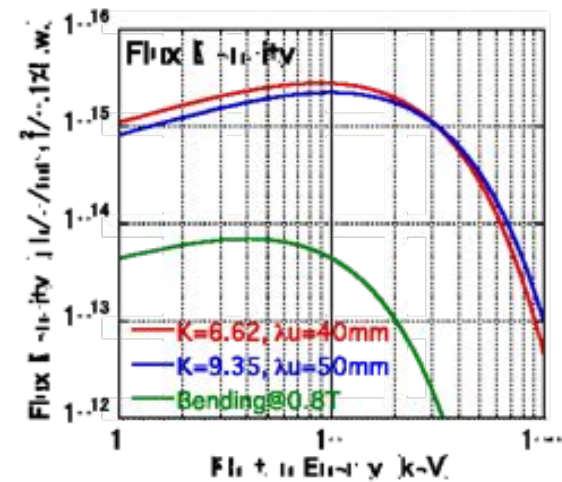
SXU1 ($\lambda_u = 42$ mm, $N_u = 104$, $K_{\max} = 2.97$)
からの放射@400mA



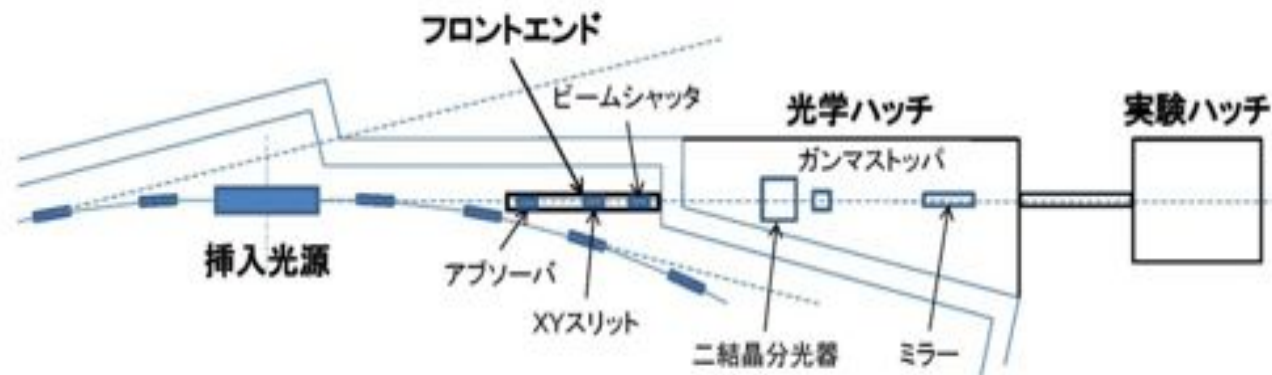
SXU2 ($\lambda_u = 64$ mm, $N_u = 68$, $K_{\max} = 53.74$)
からの放射@400mA



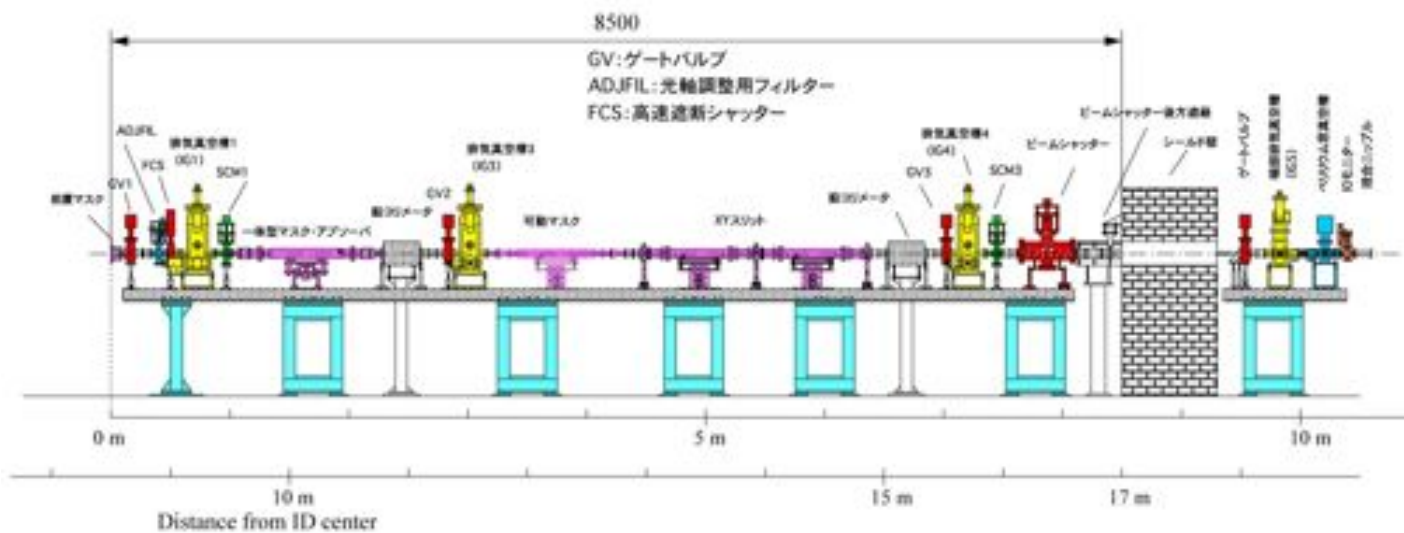
MPW1 ($\lambda_u = 40$ mm, $N_u = 20$, $K_{\max} = 6.62$)、MPW2 ($\lambda_u = 50$ mm, $N_u = 16$, $K_{\max} = 9.35$)
及びBend(0.8T)からの放射@400mA



ビームライン



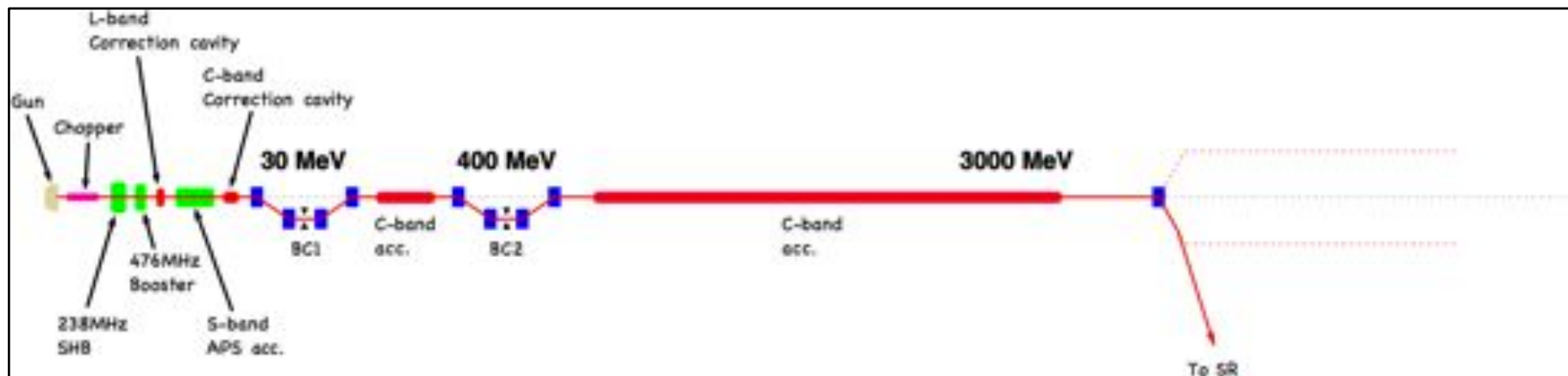
ビームラインの全体構成案



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	δE	< 0.1 %
Beam charge	Q	~ 1 nC (max) 0.5 nC (通常積み上げ時)
Charge stability	δQ	~ 1 %
Normalized emittance	$\gamma \epsilon$	< 5 mm.mrad (入射用) ~ 1 mm.mrad (FELモード)
Unnormalized emittance	ϵ	< 1.7 nm.rad
Bunch length	τ	< 5 ps
Repetition rate	f_{rep}	25 Hz (max)



入射器のレイアウト案

東北リング *+, 計算(概算)結果

計算パラメータ-

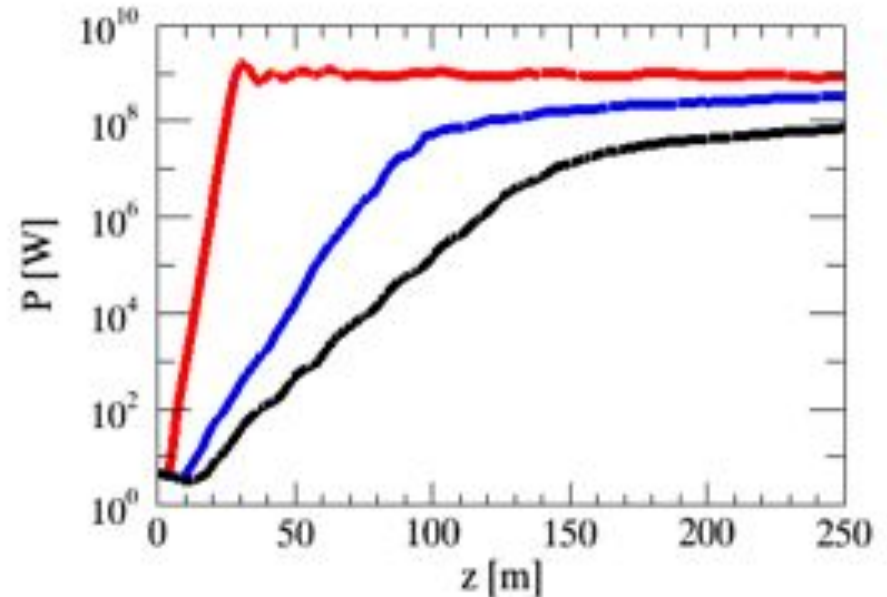
. -/012345-6/-81049:-
 ;<)≠ #! \$-/012->? -
 "-/-21@AB@C3-6-D<E:-
 #"/"-/B10F GB10F -
 H<&? -!≠<-/-2B-\$? -)? | -
 +? ≠&"×-/0-? ? P)&#-
 !)-/B1A8950-"? - **~1.7 keV**
 ;<&L->\$))<"'-/8-L. -6<#:GB1@L. -6M\$<:-

N<'&<におけるQ&L=R計算-
 (電子バンチの時間分布を考慮に-
 入れるのではなく、ある瞬間における-
 ピーク電流のところの*+, ピークパワー-
 を計算する方法。計算時間が短く、-
 概略をつかむための計算)

計算結果。! "#\$%&()は一体ものを想定。

(赤) #"/"-/B10F G; <&L/8L. -
 (青) #"/"-/B10F G; <&L/8L. -
 (黒) #"/"-/B10F G; <&L/B1@. -

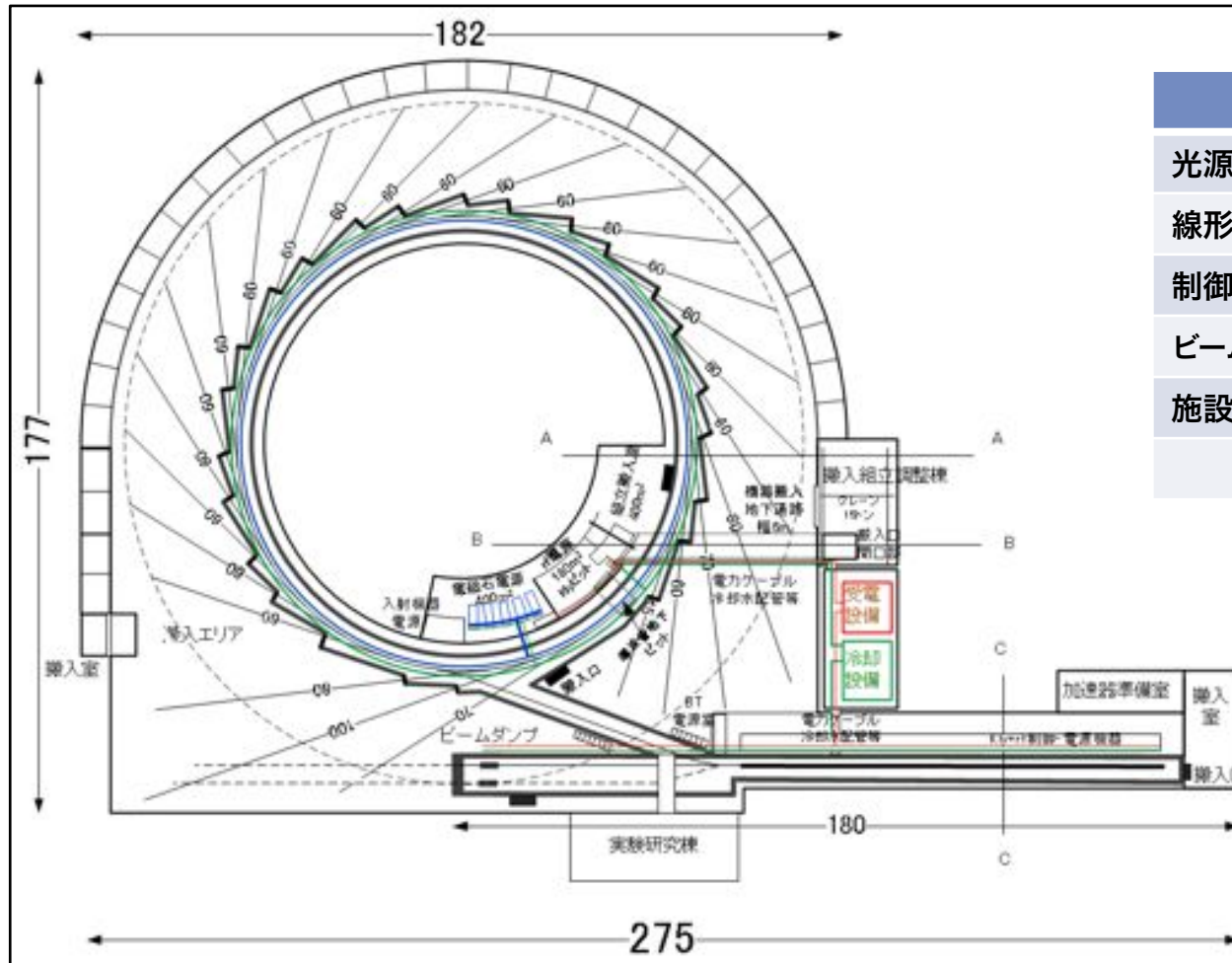
S赤は、「+<)ROIT)<&#が十分に短い」-
 という仮定が入っている理論計算と-
 概ね一致。-



入射器で考えること

- **何故シンクロトロンではないのか**
 - 建設費は安価（ただしロスなしトップアップを追求すれば巨大なものになる）
 - トップアップ時の消費電力が大きい
 - 将来光源の発展性がまったくない
- **新竹DCガンかフォトカソードRFガンか？**
 - DCガン 安定性 vs バンチングセクションの複雑化
 - RFガン シンプルな構成 vs トップアップに不利
- **Cバンド加速構造の採用**
 - 経費の増大はさほど大きくない
 - 敷地面積を大幅に縮小できる
 - 技術継承の意味は大きい
- **FELオプション**
 - SASEでいいのか
 - シードFELやEEHGを積極的に展開すべきではないか

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/m²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。

SLiT-J 3 GeV Storage Ring

- 水平エミッタンス 1.1 nmrاد
- 軟X線領域 (@~1keV) で
 - 輝度 $>10^{21}$ phs/s/mrad²/mm²/0.1%b.w.
 - フラックス $\sim 10^{19}$ phs/s/mrad²/0.1%b.w.
- トップアップで電流400mAを確保
- MPWを連続波長光源
 - 硬X線領域で偏向磁石より2桁大きいフラックス
- 大電流シングルバンチでの不安定性抑制

(私見ではあるが) 蓄積リングで高い基本的なビーム性能を確保すれば、特徴ある高品位光源は先端的な挿入光源のチョイス・アイディアとビームラインの科学技術で実現する。リングに長い直線部が必要、というような考えは古い。

=> Beamline scientists の役割の重要性



弘前大学

Hirosaki University
(弘前大学)



Iwate University
(岩手大学)



Akita University
(秋田大学)

Miyagi University of
Education
(宮城教育大学)



Center of
Great East Japan
Earthquake
3.11, 2011



Yamagata University
(山形大学)

Tohoku University
(東北大学)



東北大学

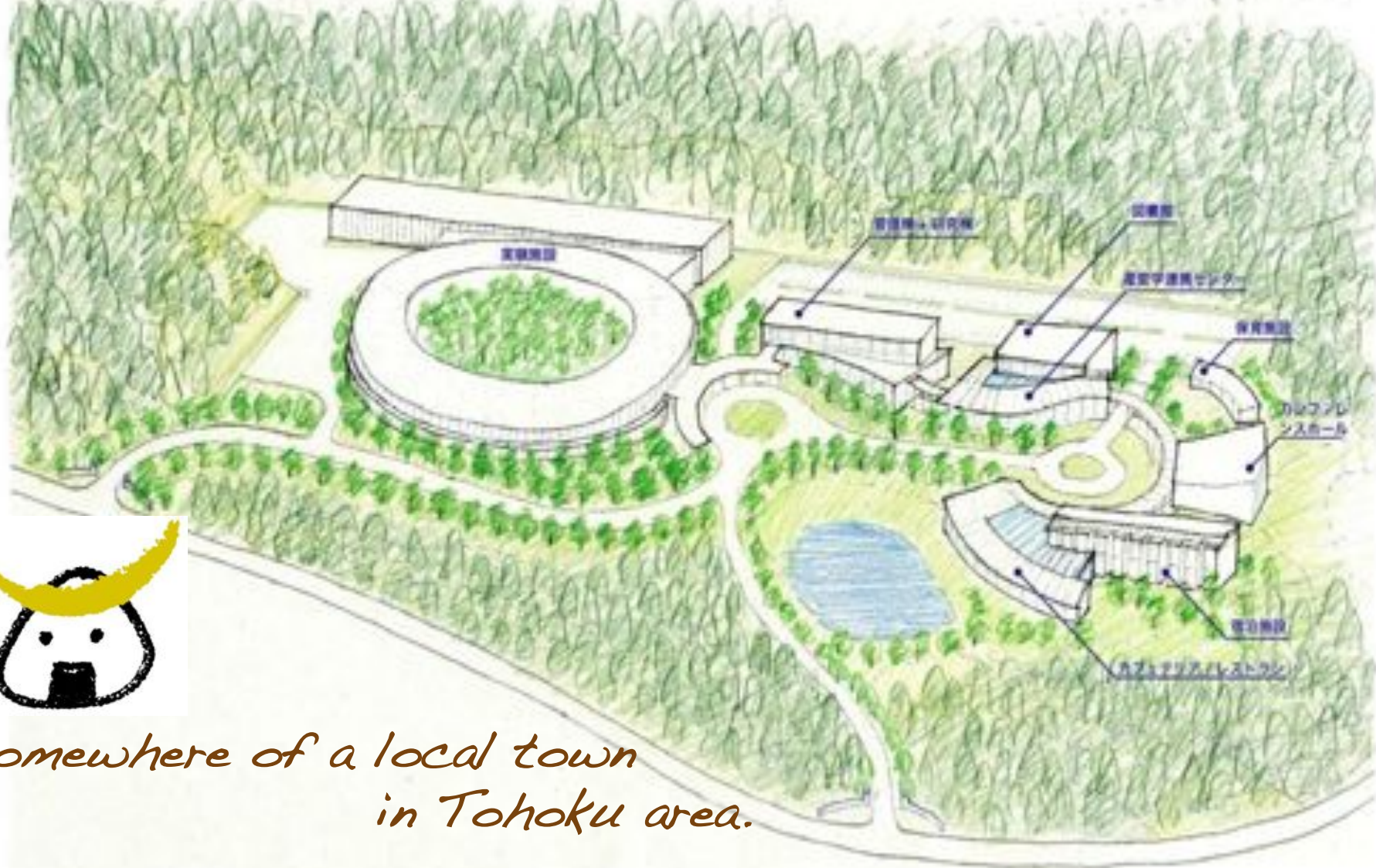
Fukushima University
(福島大学)



SLiT-J/STIR 未来予想図2017

東北の光

放射光科学において世界に対抗できる基礎科学・イノベーション拠点を東北に！



*Somewhere of a local town
in Tohoku area.*



CDR of SLiT-J, coming soon !

