

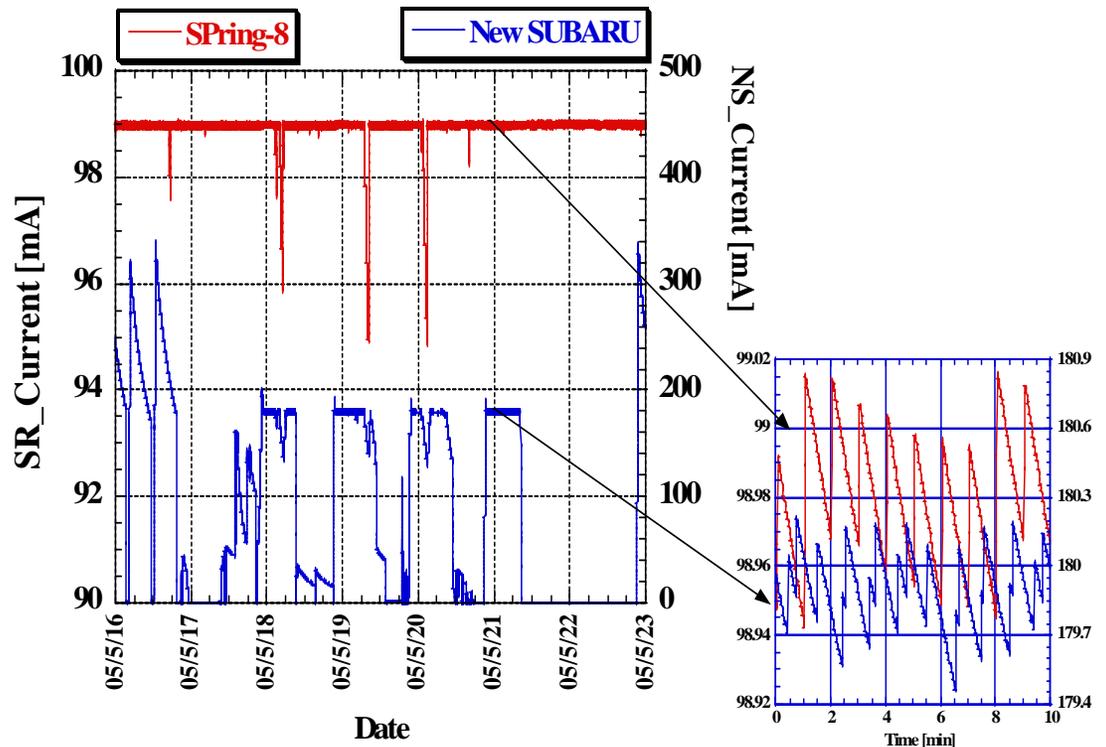
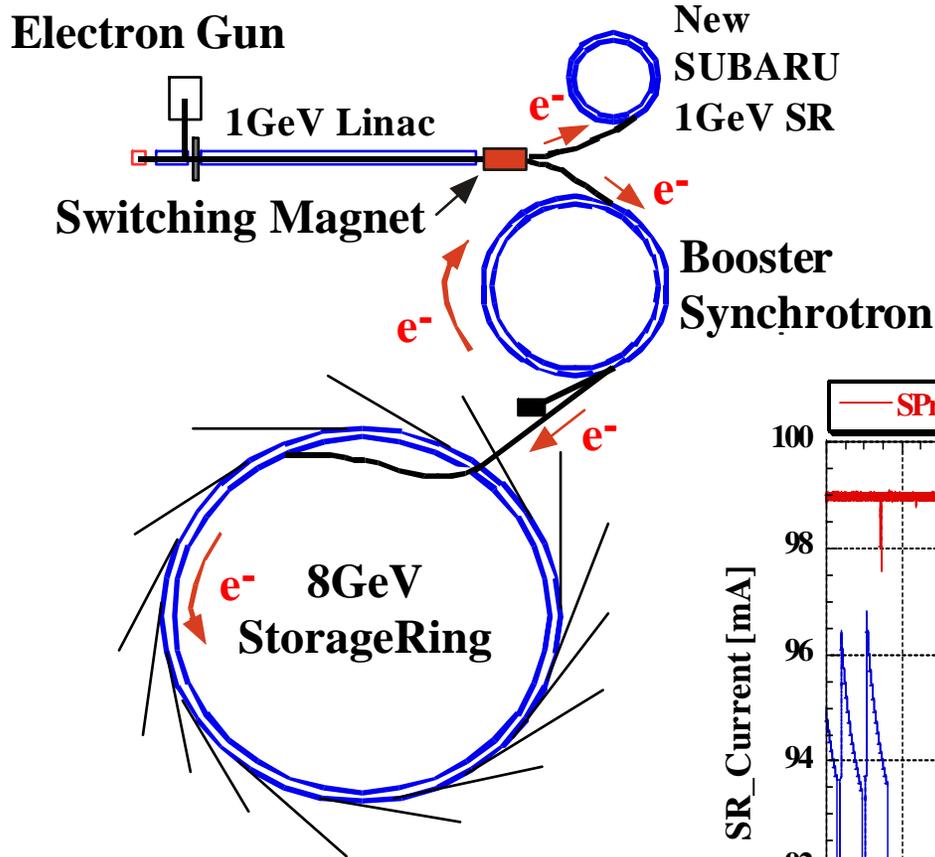
SPring-8 加速器のこれから

大熊春夫

JASRI加速器部門

1. Top-up 運転の高度化
2. 10T 超伝導ウイグラーによる高エネルギー放射光の生成 (早乙女)
3. 加速器診断での計画
 - ・ 遠赤外レーザーコンプトンによるMeV γ 線の生成
 - ・ レーザースライシングによる短パルス光の生成
4. LEPS2計画 (伊達)
5. 短パルス放射光生成 (中里)
6. 低エミッタンスリングの検討 (妻木)
7. ラティスの変更による低エミッタンス化 (早乙女)

Top-up運転の高度化



Top-up運転のFilling Modeとビーム寿命

	bunch current	lifetime
Multi-bunch (160 bunch-train × 12)	0.05 mA	~ 200 hr
203 bunches	0.5 mA	25 ~ 30 hr
4 bunch-train × 84	0.3 mA	35 ~ 50 hr
11 bunch-train × 29		
1/12-filling + 10 single bunches	1.5 mA (single)	25 ~ 30 hr
2/21-filling + 18 single bunches		20 ~ 25 hr
6/42-filling + 35 single bunches	0.7 mA (single)	35 ~ 42 hr
10/84-filling + 73 single bunches		32 ~ 40 hr

1/12-filling + 10 single bunches

1.8 mA (single)

実施済み

1/7-filling + 5 single bunches

3.0 mA (single)

実施予定

Single bunchの電流増加; 高強度パルス光の利用

問題点:

(1) RFコンタクトの発熱



櫛歯型ゲートバルブの開発(KEK共同研究)

(2) Top-up 入射電流の制限

ユーザーの要求: 21 bunches (4.8mA/bunch)



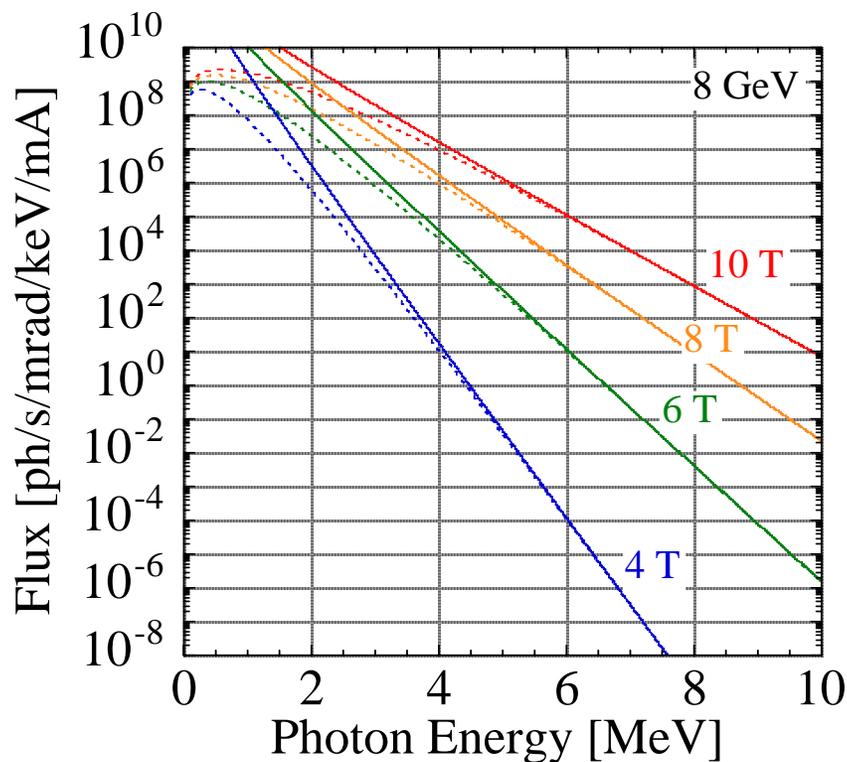
入射効率の増加が望ましい(80%→90%)



(KEK末次)

10T 超伝導ウイグラーによる高エネルギー放射光の生成

8GeV Storage Ring + 10T SCW
 → MeV領域の γ 線生成



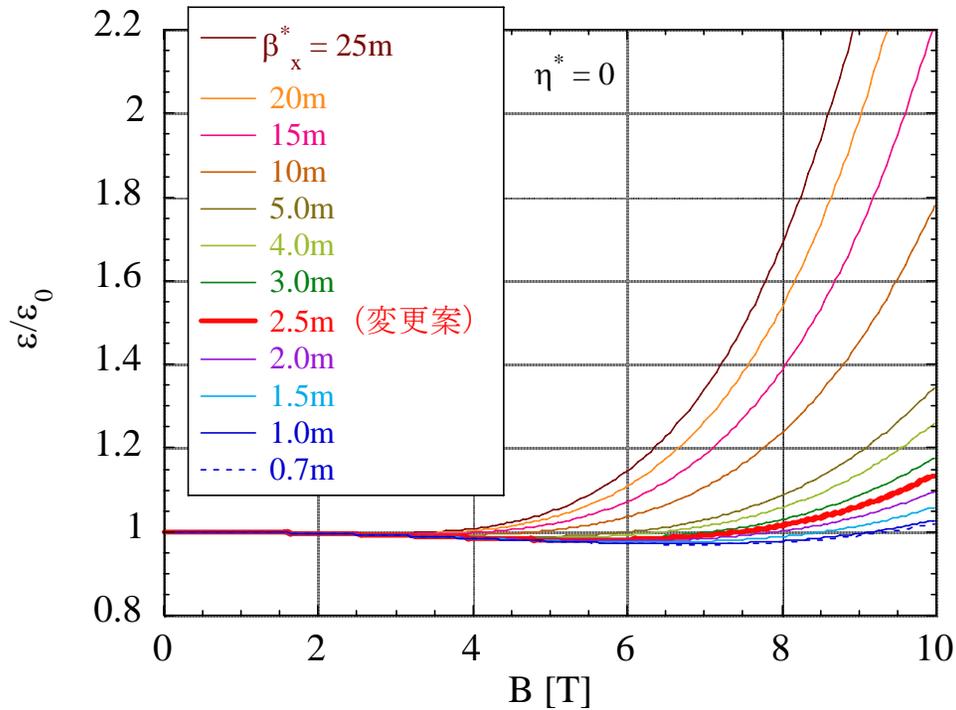
Critical Energy: 0.43 MeV
Total Power: 1 kW/mA
Max. Power Density: 0.22 kW/mrad²/mA

[K.Soutome, et.al., Proc. PAC03, p. 250]

[H.Utsunomiya, et.al., to be published in NIMA]

エミッタンスの増加(計算)

Low-Emittance Optics



実効的なエミッタンス :

$$\epsilon_{\text{eff}} = [\epsilon^2 + \epsilon \delta^2 \eta^2 / \beta_x]^{1/2}$$

δ : energy spread

η : dispersion

	変更前	変更案 (SCW 0T)	変更案 (SCW 10T)
ϵ [nmrad]	3.43	3.80	4.32
ϵ_{eff} [nmrad]	3.72	4.09	4.86 (at Normal Straight Section)
δ [%]	0.11	0.11	0.15

設置と実験の計画案

第一段階: SCW設置とマシン収納部内フロントエンド建設

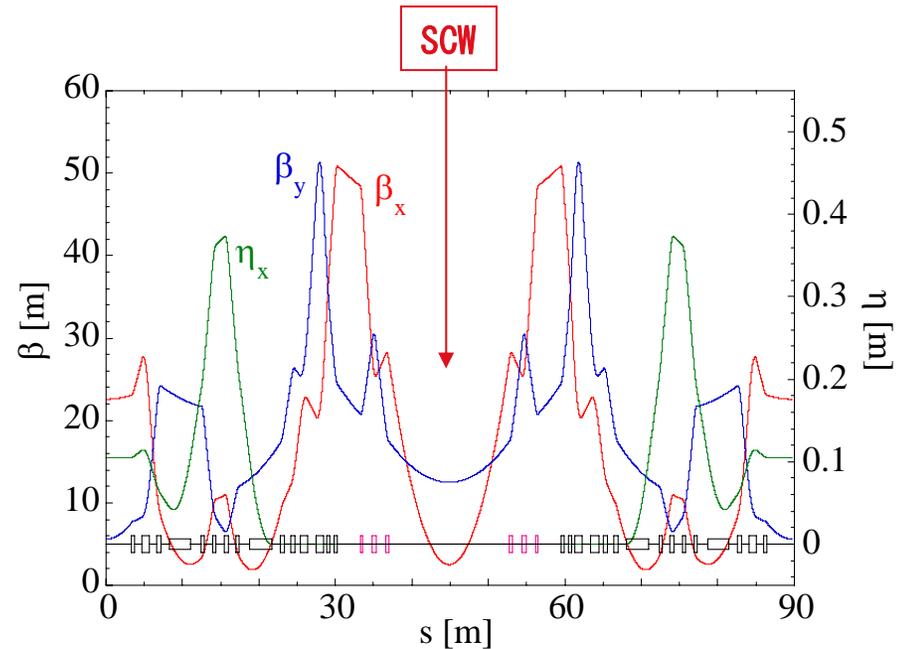
→ 天体核物理における光核反応(γ, n) Reaction実験

30m長直線部への設置案を検討中

- ・ 4極電磁石の追加設置などによる
オプティックスの局所的な変更
- ・ 放射光の輝度の劣化を防ぐため、
ベータトロン関数などを最適化し、
エミッタンスの増加を極力抑える



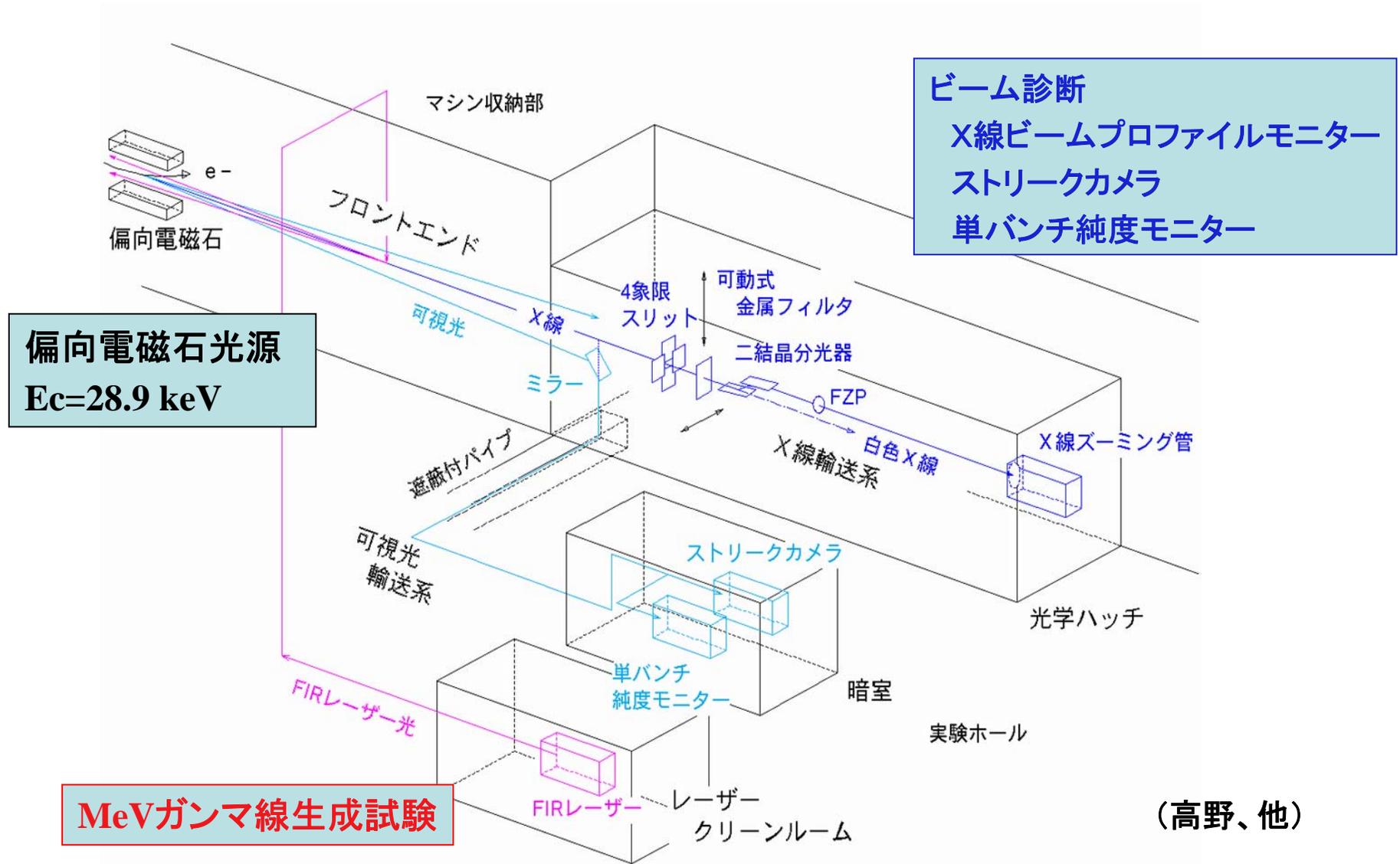
他の放射光ユーザーとの共存



第二段階以降、ハッチ建設

- 円偏光性を利用した原子核構造におけるパリティ非保存実験
- 磁気コンプトン散乱による物性研究
- 陽電子生成(対生成利用)、中性子生成(Be 利用)

加速器診断 I (BL38B2)



ビーム診断
X線ビームプロファイルモニター
ストリークカメラ
単バンチ純度モニター

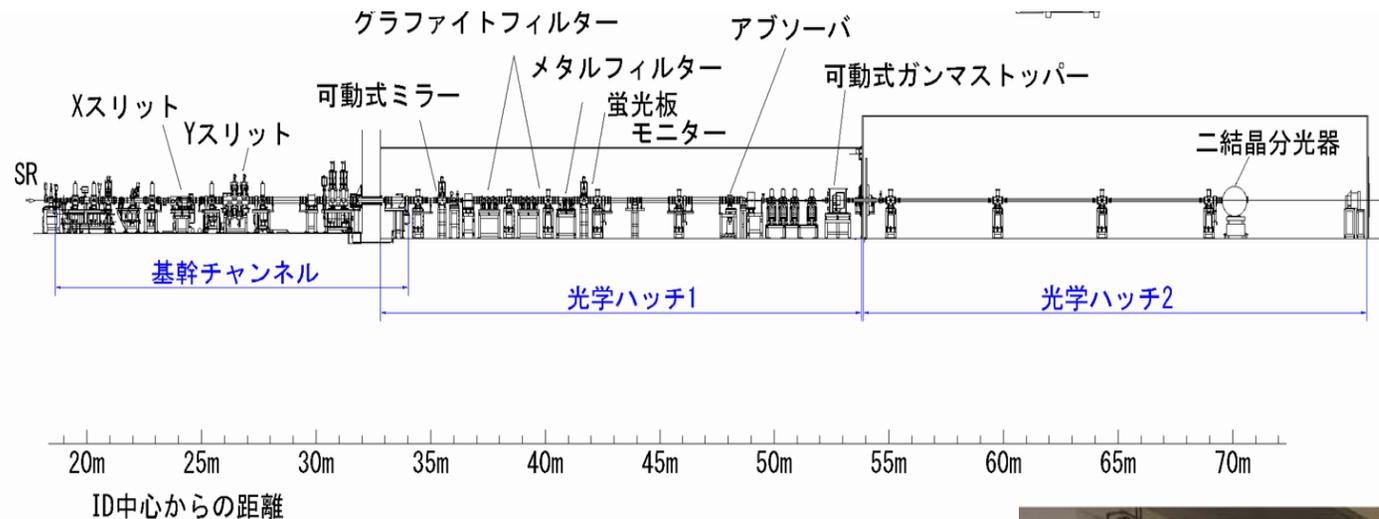
偏向電磁石光源
 $E_c = 28.9$ keV

MeVガンマ線生成試験

(高野、他)

加速器診断II(BL05SS)

建設中



エッジ放射光の利用

コヒーレント放射

短バンチ長測定、バンチ内微細時間構造測定の研究

マルチポールウィグラーの利用

照射実験、高熱負荷機器試験、放射線損傷試験

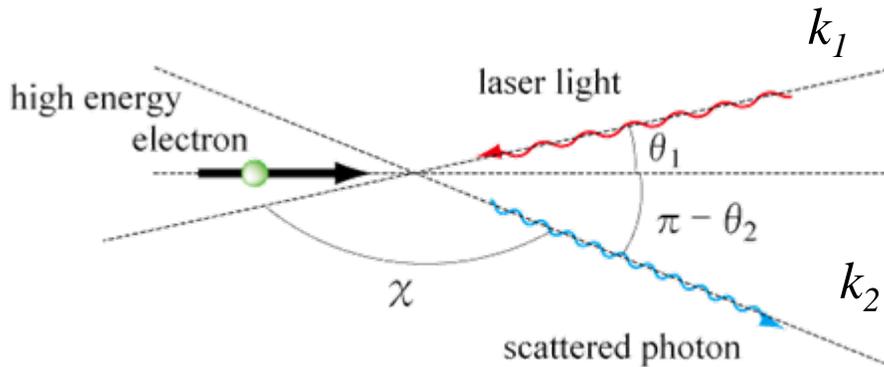
大強度MeVガンマ線の生成、利用

光源の開発

ビーム診断用光源 など



遠赤外レーザーコンプトンによるMeV γ 線の生成



$$k_2 = \frac{1 + \beta \cos \theta_1}{1 + \beta \cos \theta_2 + \frac{k_1}{E_e} (1 - \cos \chi)}$$

$$\beta = v_e / c$$

$$\frac{1}{\sigma_0} \frac{d\sigma}{(k_2 / E_e)} = \frac{3}{8\lambda} \left[\frac{\lambda^2 (1-x)^2}{1 + \lambda(1-x)} + (1+x^2) \right] \quad \begin{aligned} x &= \cos \theta_0 \\ \lambda &= 2\gamma k_1 / m_e c^2 \end{aligned}$$

8GeV電子とのコンプトン散乱で、10 MeV 領域の γ 線を生成

→ 波長100mm の遠赤外レーザーが必要(CH₃OHレーザー118 μ m)

コンプトン散乱 γ 線源 (他施設)

HI γ S (Duke) 10^7 photons/sec

TERAS (産総研) 10^3 photons/sec

NewSUBARU (兵庫県立大) 10^5 photons/sec

SPring-8でのMeV γ 線生成の特徴

角度発散の小さいMeV γ 線の生成

ローレンツファクター $\gamma = 15650$ → 生成 γ 線の拡がりは $1/\gamma \approx 0.06$ mrad

蓄積リングの運転に影響しない

蓄積リングのMomentum acceptance $\pm 2.5\%$ (± 200 MeV)であるので、コンプトン散乱により蓄積電子が失われることはない。放射光ユーザーとの共存。

レーザーパワーの増強により大強度MeV γ 線生成の可能性

フォトン数の多い遠赤外レーザー光

→ ハイパワー化により大強度 γ 線生成の可能性

その他の発振線によるコンプトン γ 線の生成

$57\mu\text{m}$ (1.6W)、 $48\mu\text{m}$ (0.8W) → 20MeV γ 線の生成

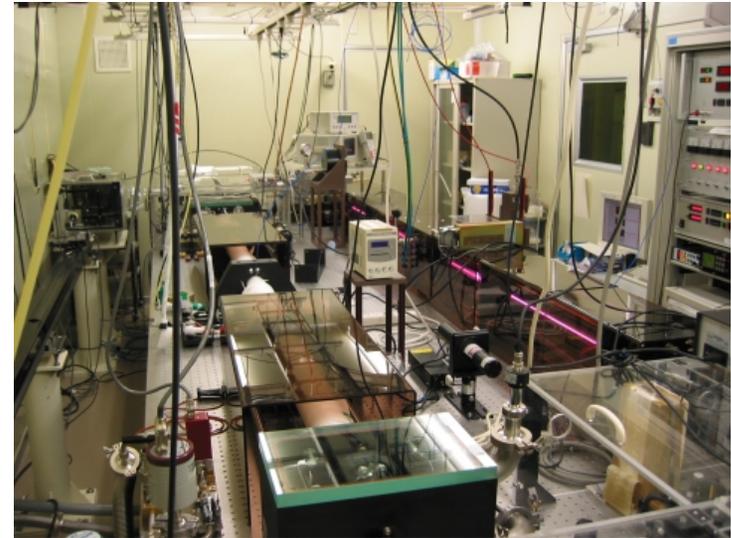
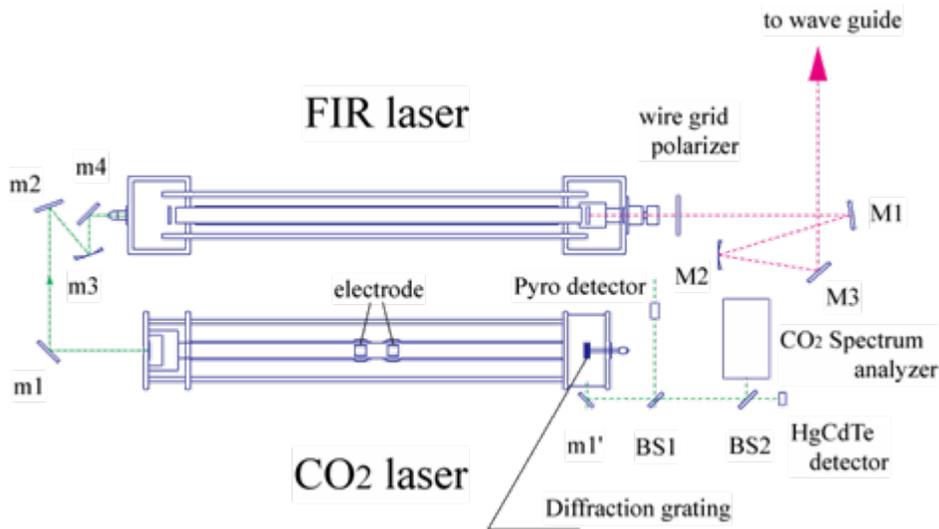
cf. 遠赤外FEL

欠点

遠赤外レーザー光の大きい角度発散

→ 集光が難しく、長距離伝送には工夫が必要

遠赤外レーザーシステム



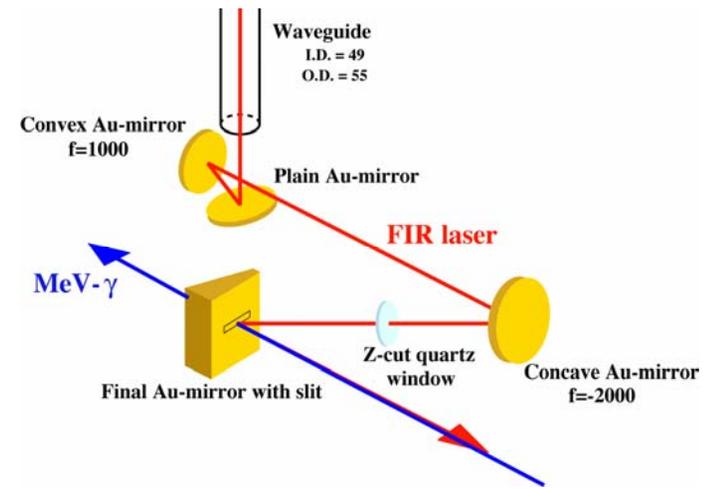
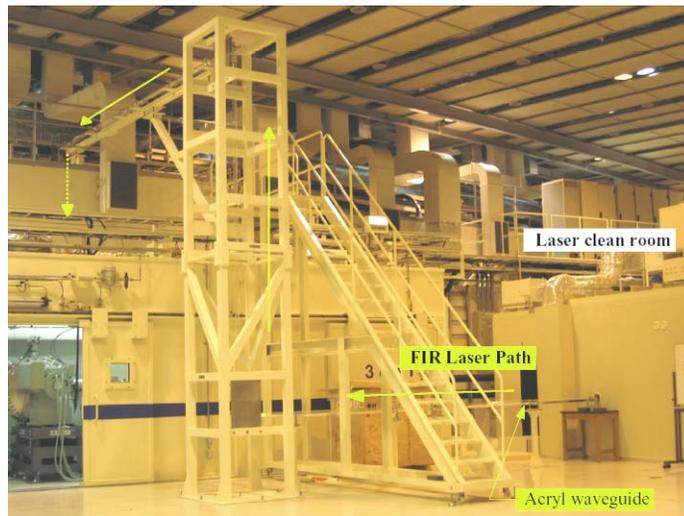
CO₂ laser

Resonator length : 3m
 Max. Power @ 9P(36) lasing line : 234.5W(CW)

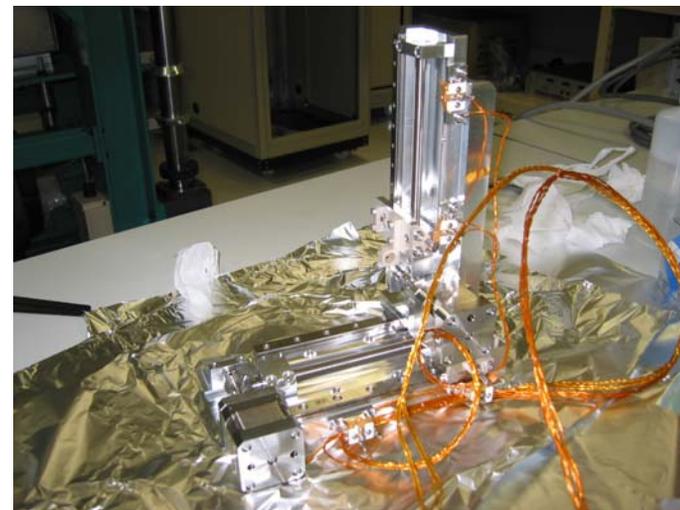
FIR laser

Resonator length : 3m
 Laser action medium : CH₃OH vapor
 Max. Power @ 119μm : 1.6W
 Power at Normal operation : ~ 1W

導波管とミラーシステムによるレーザー伝送系

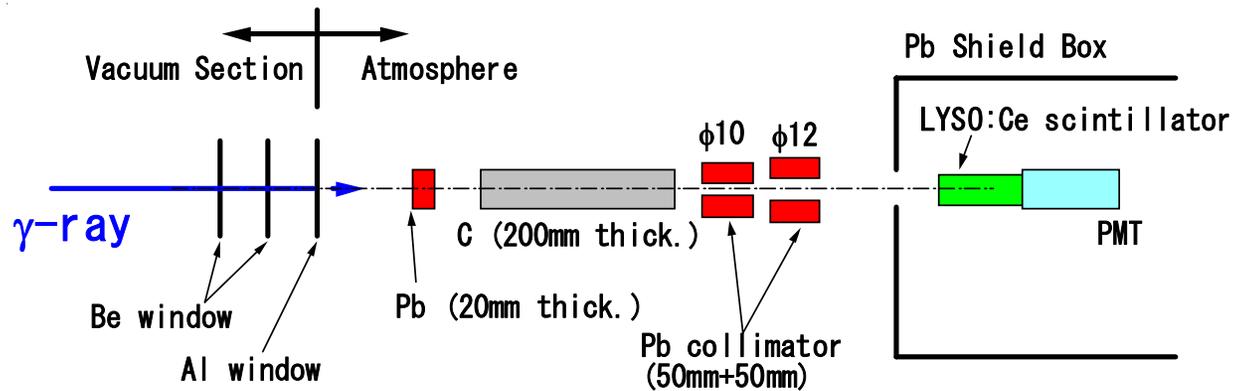


レーザーは真空中の最終ミラーから
ビームライン中を約20mを通過して、電
子ビームに到達する。
導波管による遠赤外レーザーの輸送
効率 η は0.77
石英の真空窓によるレーザー透過率
は0.66



レーザープロファイルモニター
ミラーから3 m の位置に設置

γ線計測システム



検出器 : LYSO シンチレータ
結晶サイズ : 50 mmφ × 90 mm

特徴 : 減衰時間 42 ns
 密度 7.2 g/cm³
 実効的 Z 65
 発光量 GSO の 2-3 倍

測定結果

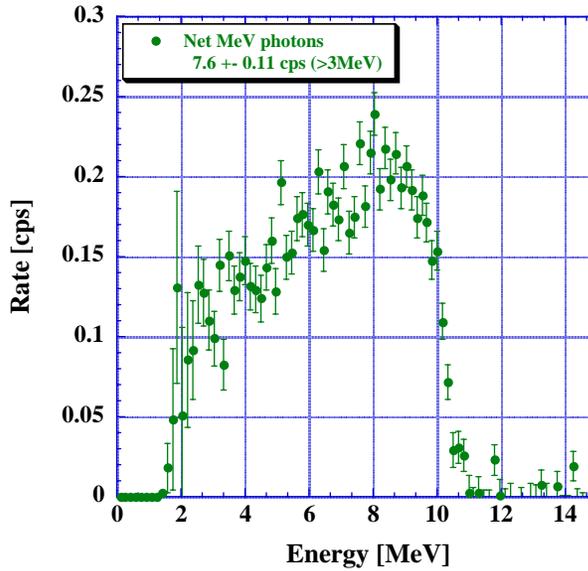
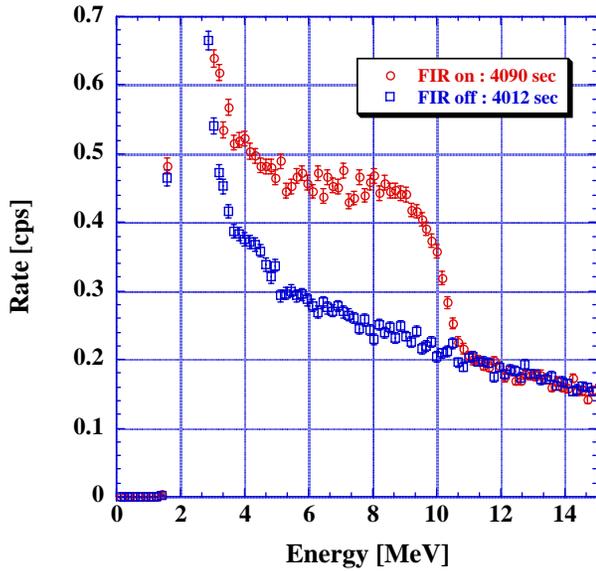
測定時間

FIR on : 4901 sec.

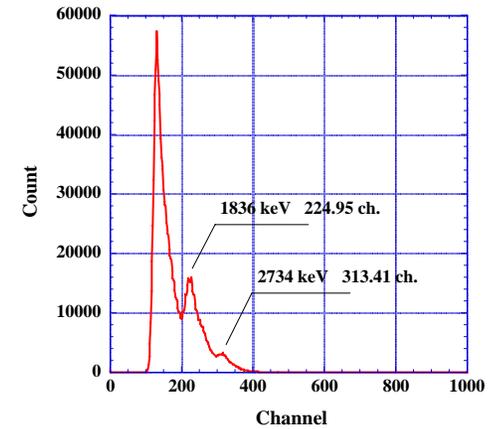
FIR off : 4012 sec.

FIRレーザー出力 1.01W

Net counts : 8.23 ± 0.13 cps (>2 MeV)



エネルギー校正 : Y⁸⁸



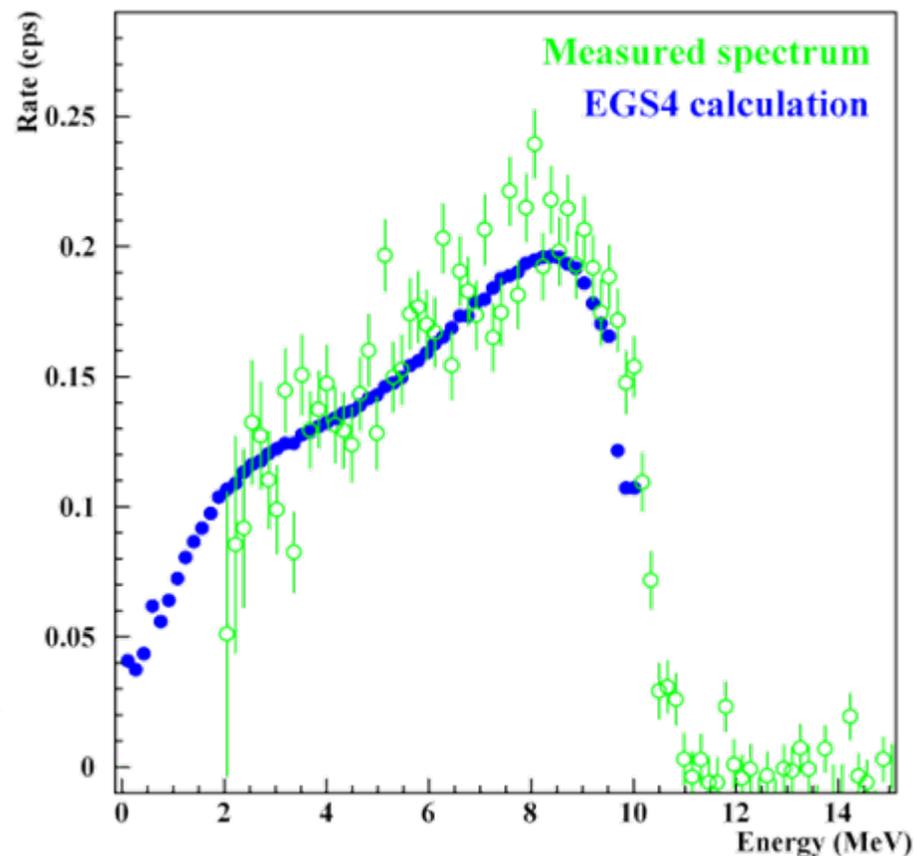
EGS4シミュレーションとの比較

- ・シミュレーションで考慮した物質
LYSO
鉛、カーボンのアブソーバー
鉛コリメーター
- ・光源点でのガンマ線の広がり
水平方向：ビームラインの開口角
垂直方向： $\pm 1/g$ rad.
- ・2 MeV 以上のトータルカウントを
再現するように入力スペクトル強度を
探した

レーザーパワーから期待される生成量

相互作用領域でのレーザーパワー密度、
導波管の輸送効率、石英窓の透過率等
を考慮して計算

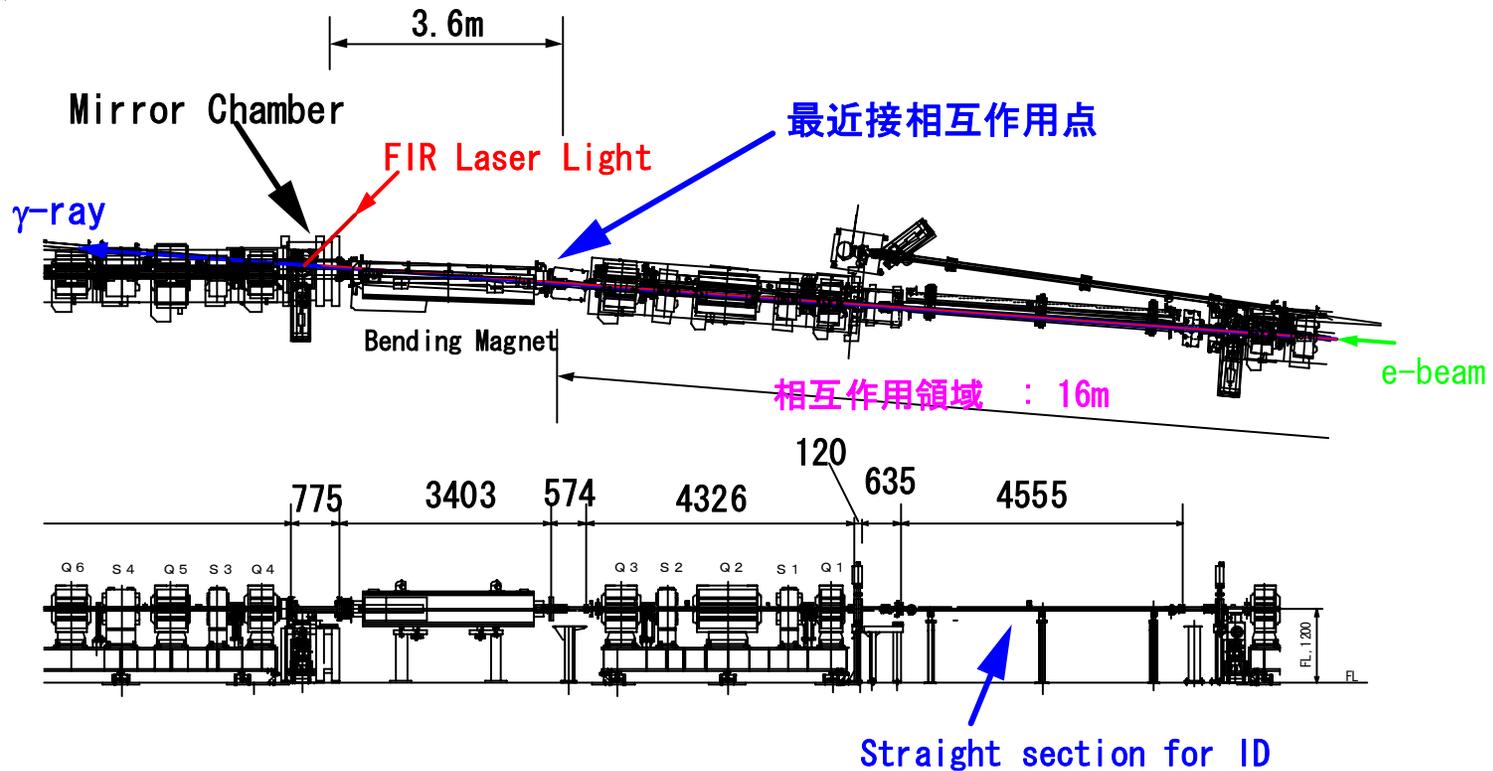
1.8×10^3 photons/sec



シミュレーションの結果、光源点での
ガンマ線の生成レートは
 1.3×10^3 photons/sec

BL05SS での将来計画

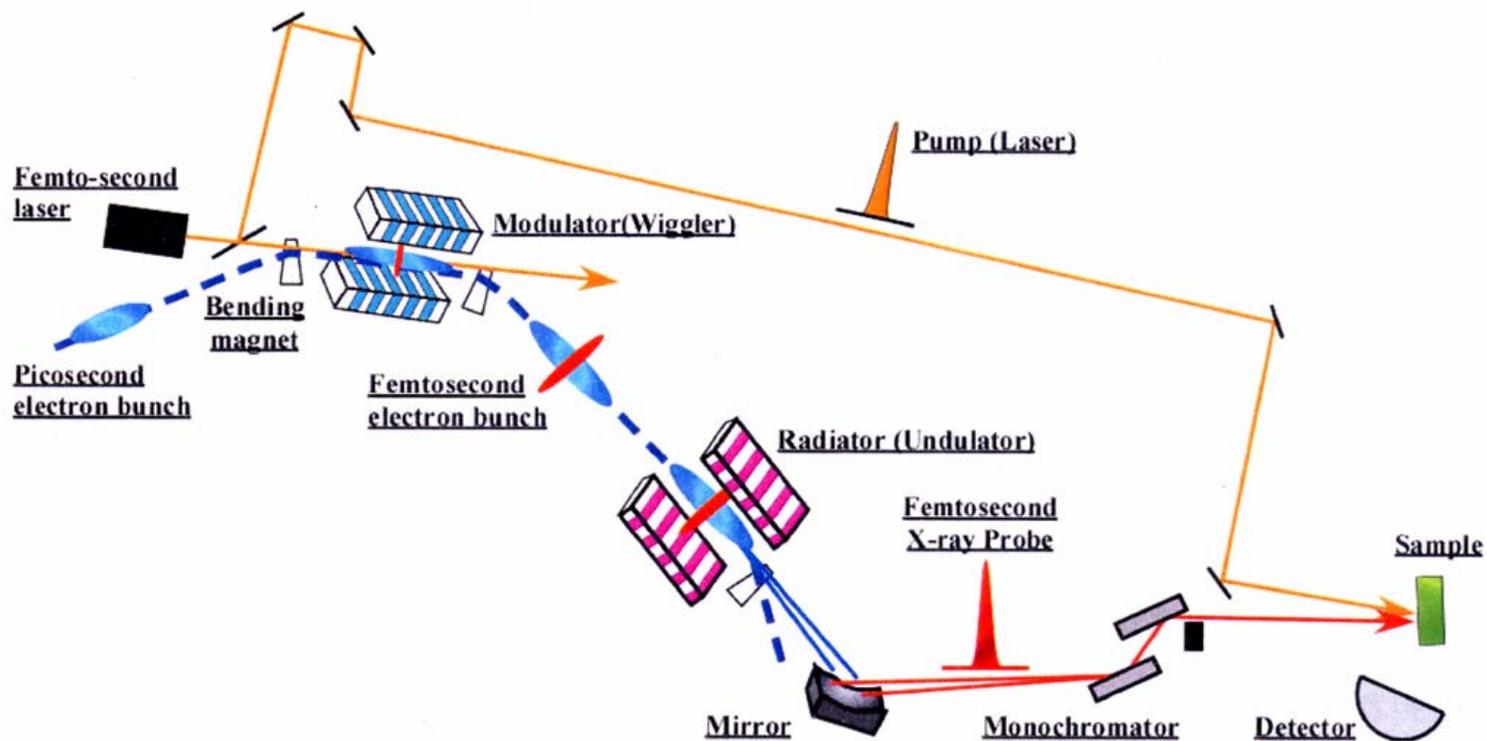
- 長い直線部を相互作用領域として利用可能
- レーザーの輸送効率の向上：レーザーは相互作用領域の近くで入射
- 放射光のバックグラウンドが少ない



10⁵ photons/sec以上が期待できる

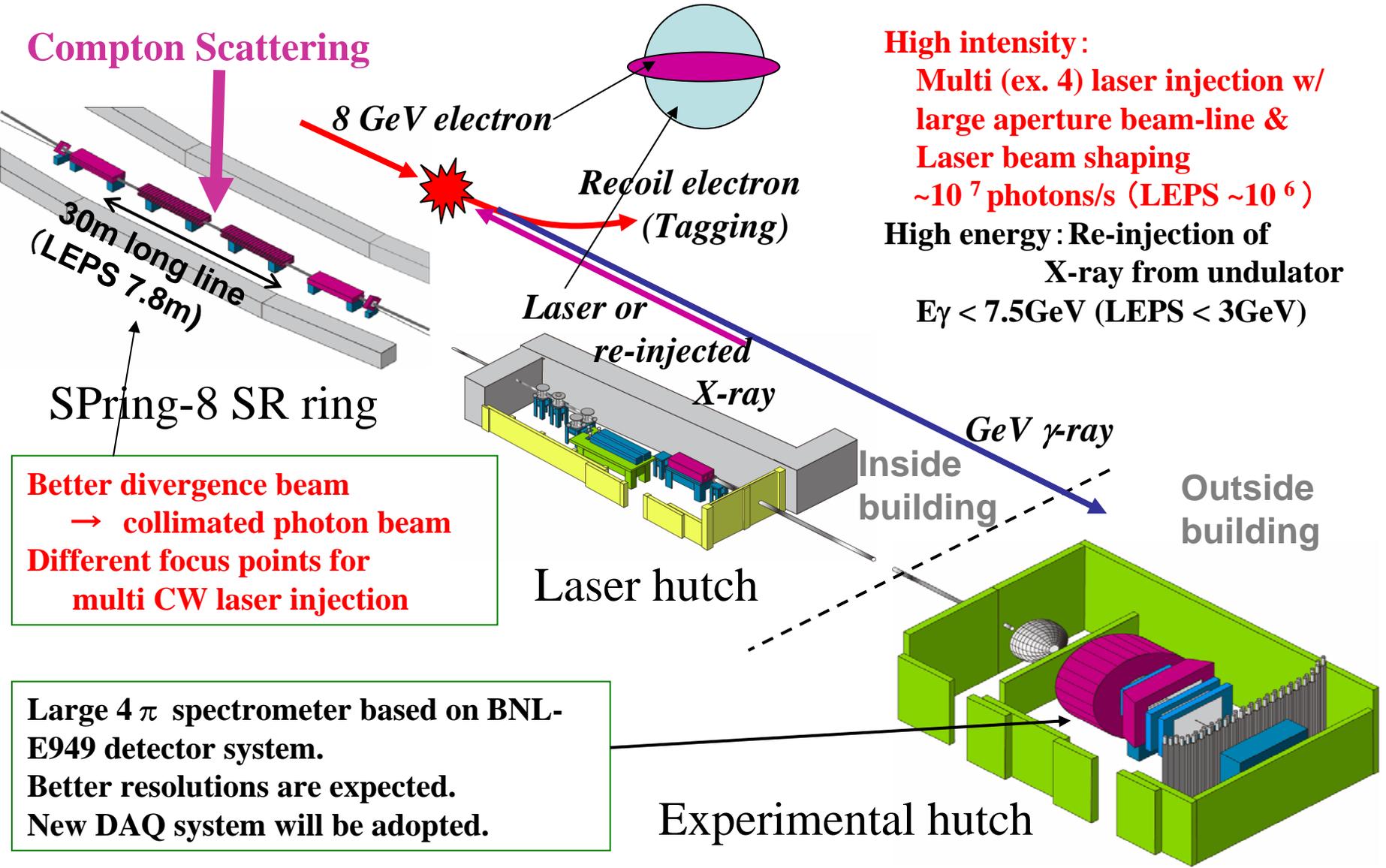
レーザースライシングによる短パルス光の生成

加速器診断 IIを用いた試験を計画(東京大学物性研との共同研究)



LEPS2 計画

Compton Scattering

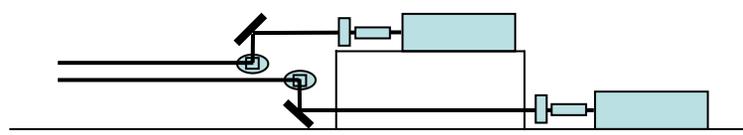
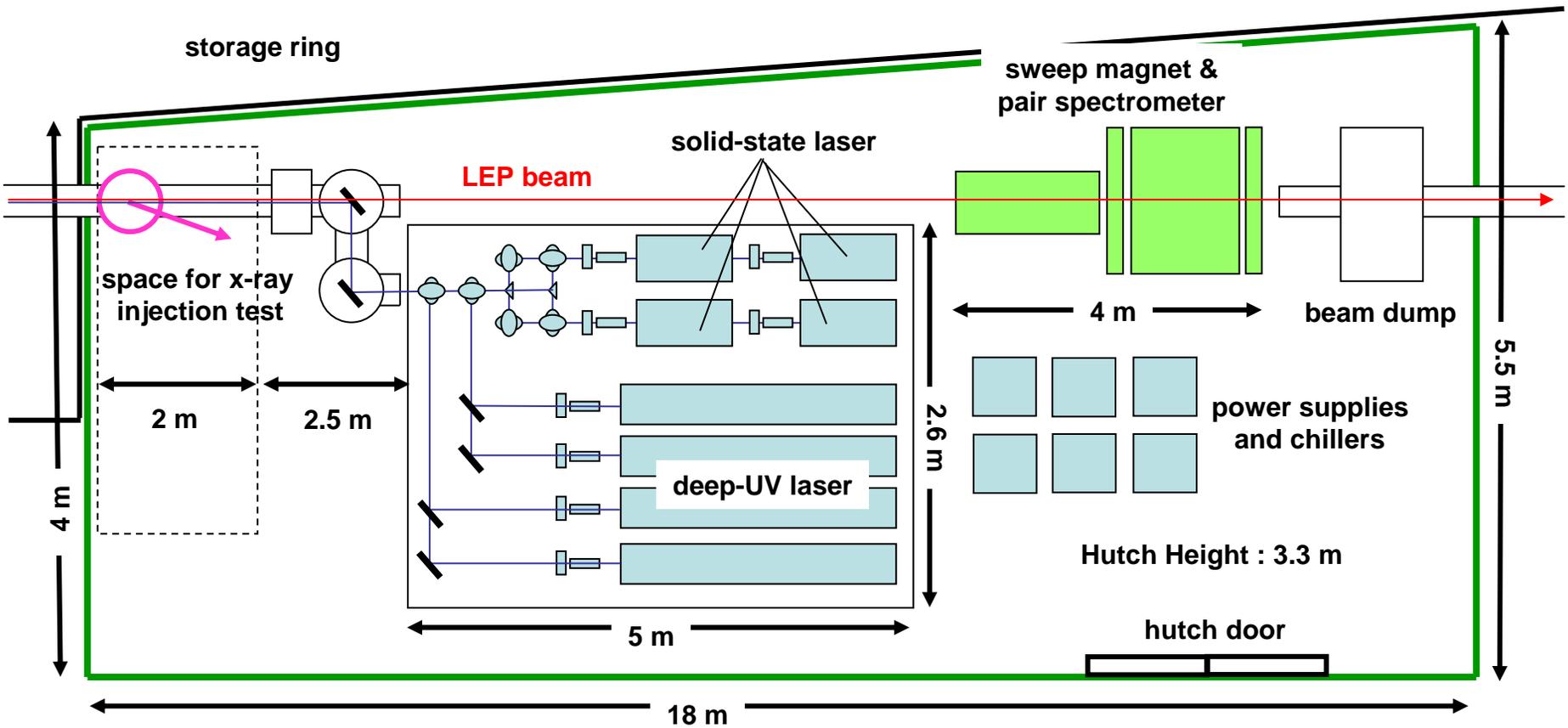


High intensity:
Multi (ex. 4) laser injection w/ large aperture beam-line & Laser beam shaping
 $\sim 10^7$ photons/s (LEPS $\sim 10^6$)

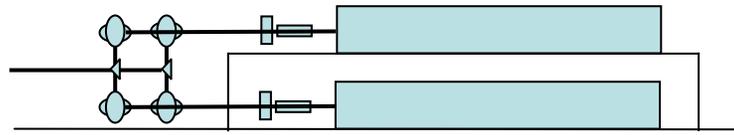
High energy: Re-injection of X-ray from undulator
 $E_\gamma < 7.5\text{GeV}$ (LEPS $< 3\text{GeV}$)

Better divergence beam
→ collimated photon beam
Different focus points for multi CW laser injection

Large 4π spectrometer based on BNL-E949 detector system.
Better resolutions are expected.
New DAQ system will be adopted.



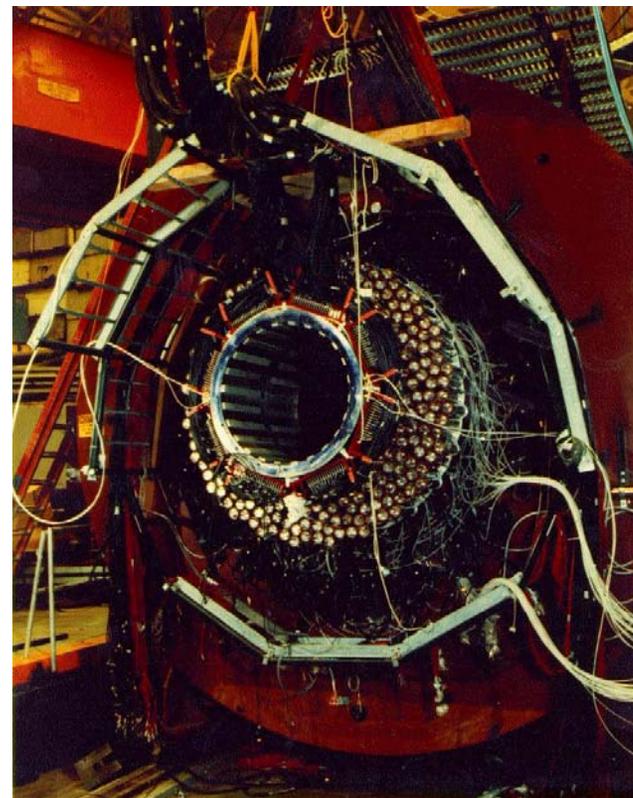
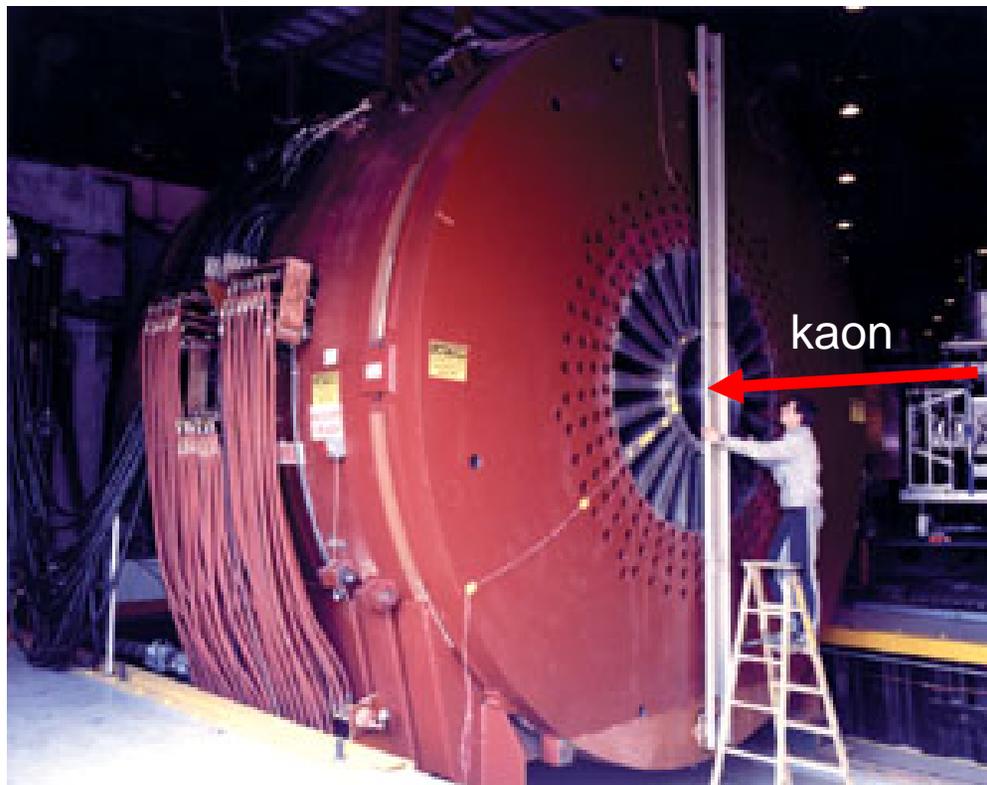
side view of solid state lasers



side view of deep-UV lasers

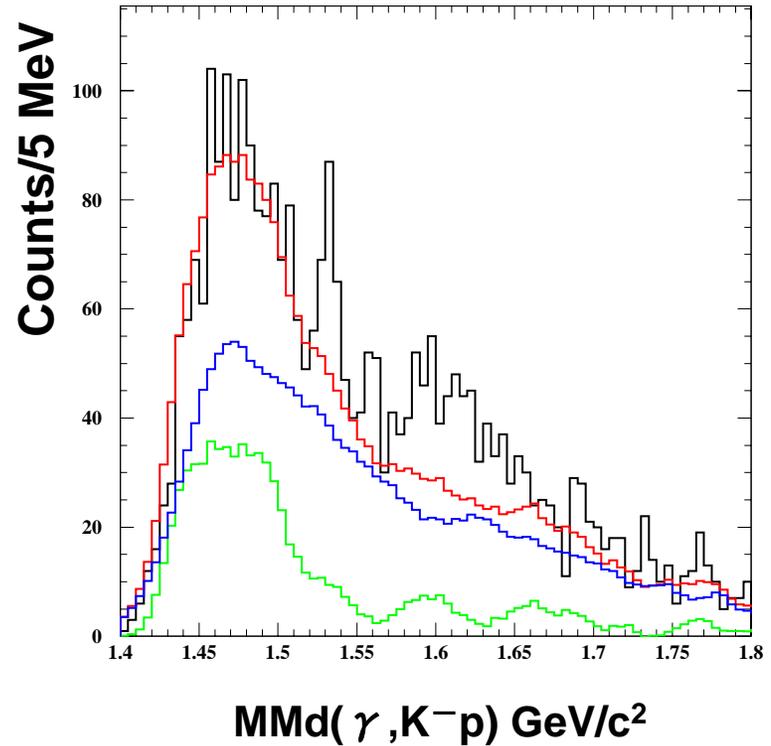
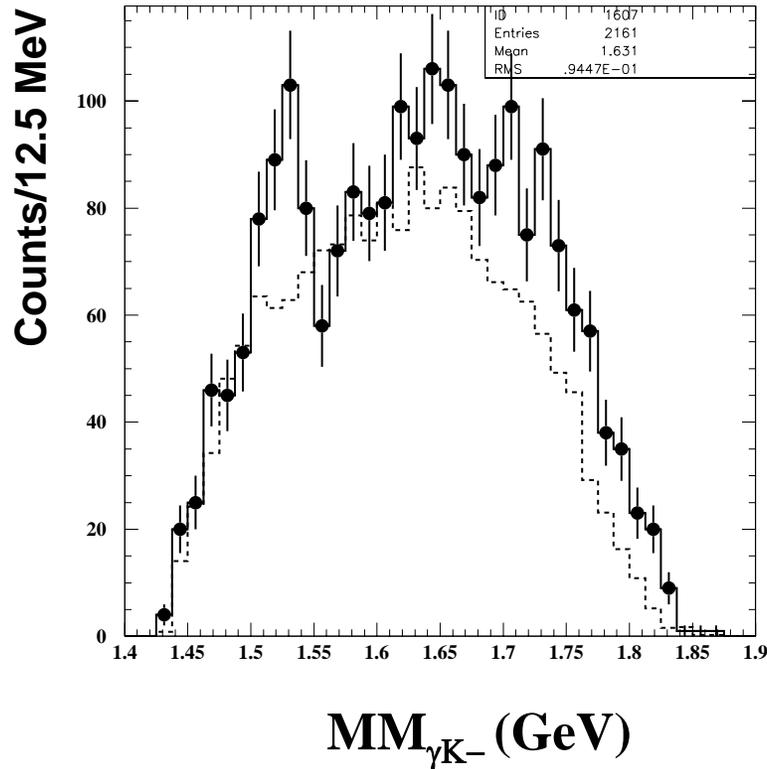
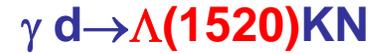
BNL-E949 Detector

(As a general-purpose detector with large solid angle)



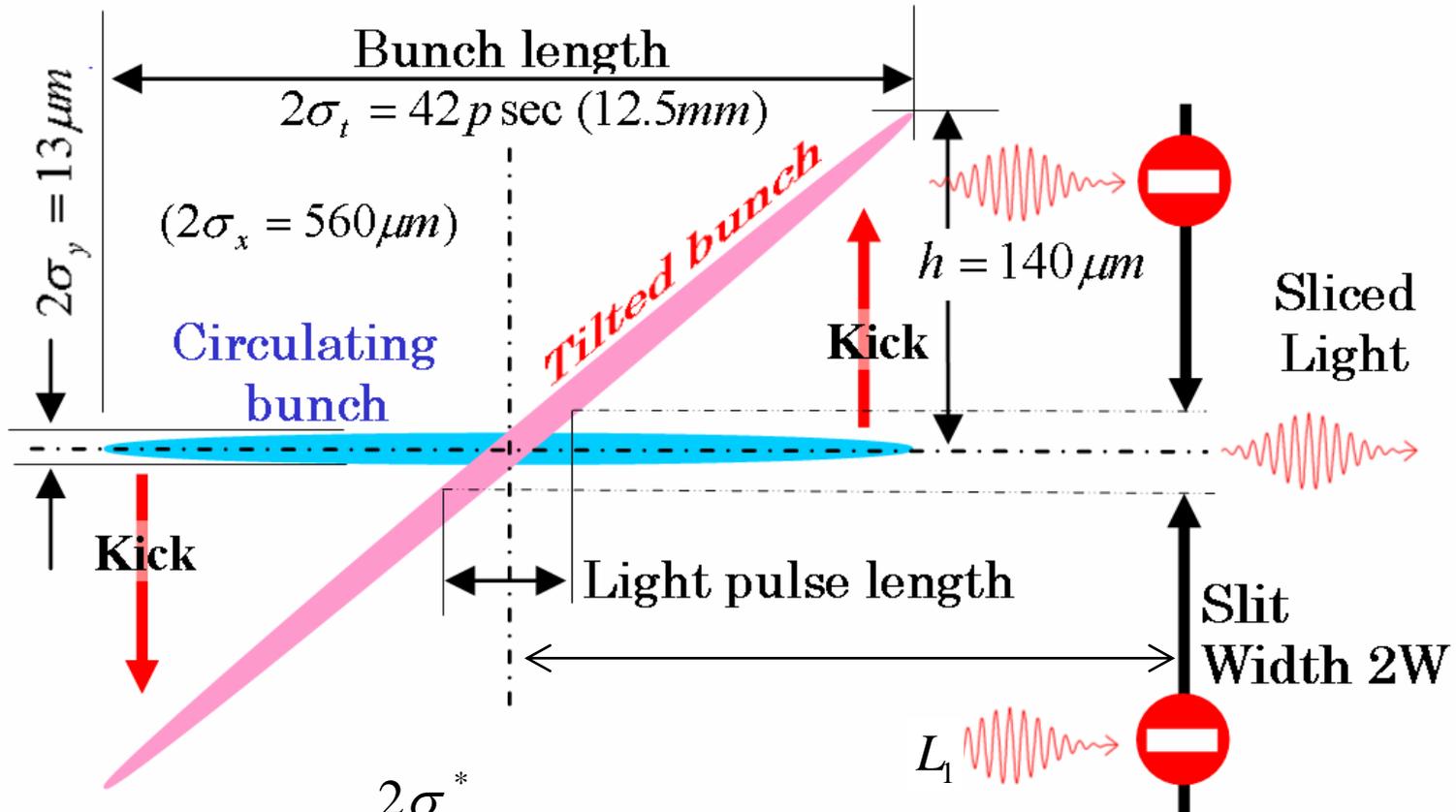
Cylindrical detector for the measurement of decay from kaon at rest
1.0 T magnet, Bore size : 2.96-m diameter \times 2.22-m length
1.1 MW, 4400 A

Pentaquark Θ^+ at LEPS



In the both reactions, K^+ exchange is possible and should be dominant. \rightarrow require good forward acceptance.

短パルス放射光の生成

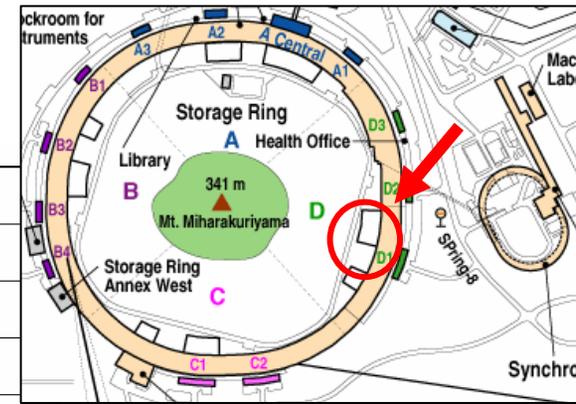
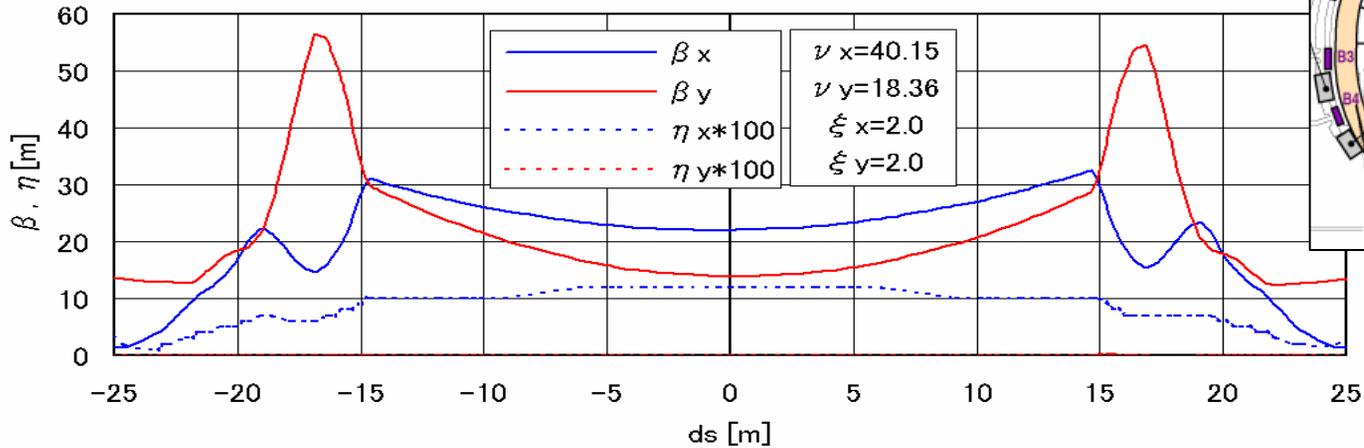


$$2\sigma_{p0} \approx \frac{2\sigma_y^*}{\tan \theta_{\text{tilt}}} \quad (W \rightarrow 0)$$

$$= 1.9 \text{ psec} \quad (\text{for no diffraction})$$

$$\tan \theta_{\text{tilt}} = \frac{h}{\sigma_t} = 6.7 \mu\text{m/psec}$$

短パルス生成の概念設計



Superconducting Crab Cavities (4 Sets)

Mini-pole Undulator

$V_{\perp} = 1.67 MV$

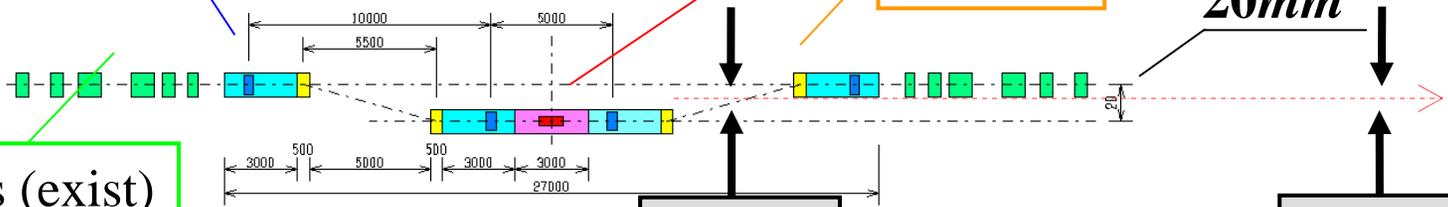
Steerers

$\lambda_u = 10 mm$

Gap = 5 mm

$N_u = 101$

Quads (exist)



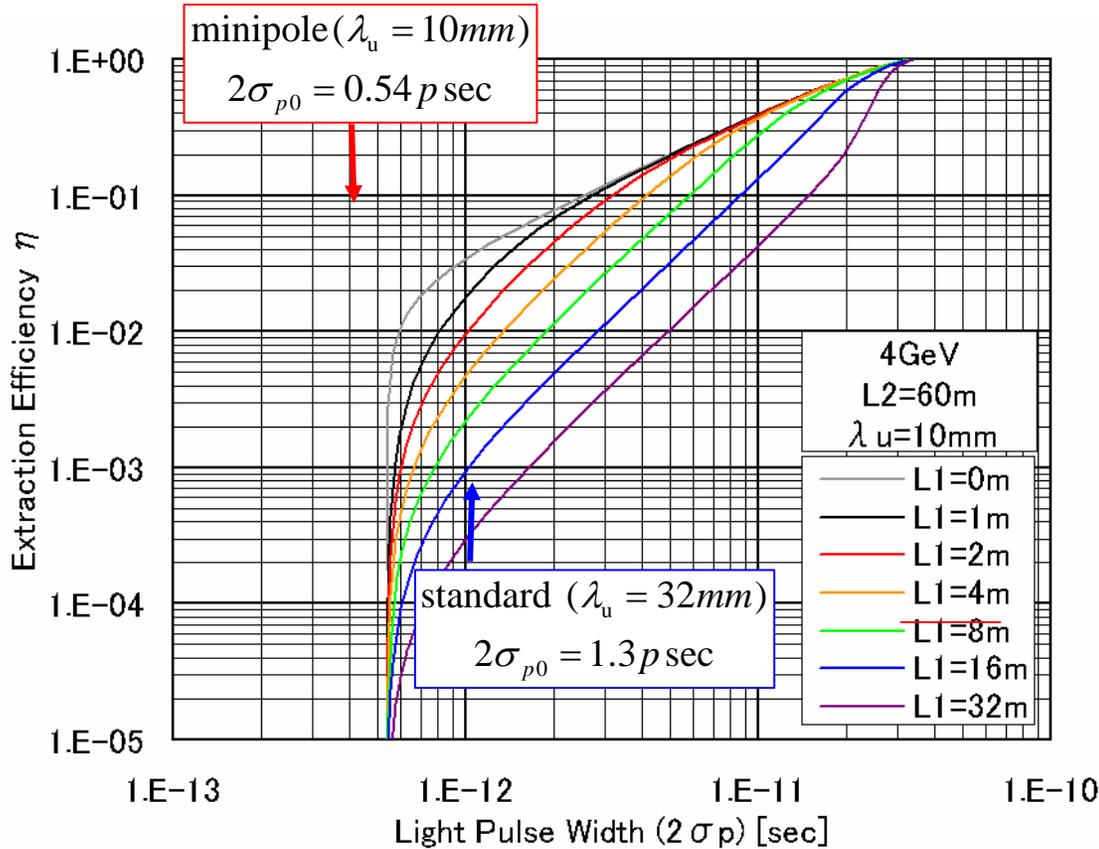
Slit #1

Slit #2

S
i
d
e

**Required
RF phase stability
14 mdeg (0.24mrad) !**

パルス幅と出射効率



$$\sigma_p^2 \approx \sigma_{p0}^2 + \frac{\pi}{3} \frac{h \Sigma'_y L_{12}}{\tan^2 \theta_{\text{tilt}}} \eta$$

$$\sigma_{p0} = \frac{\sigma_y^*}{\tan \theta_{\text{tilt}}}$$

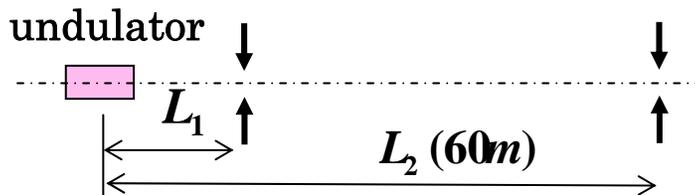
$$\frac{1}{L_{12}} = \frac{1}{L_1} - \frac{1}{L_2}$$

(for slit #1 width $\ll h$)

L_1, L_2 : Distance from emission point to the slit #1 and #2.

Σ'_y : Width of radiation

angular distribution.

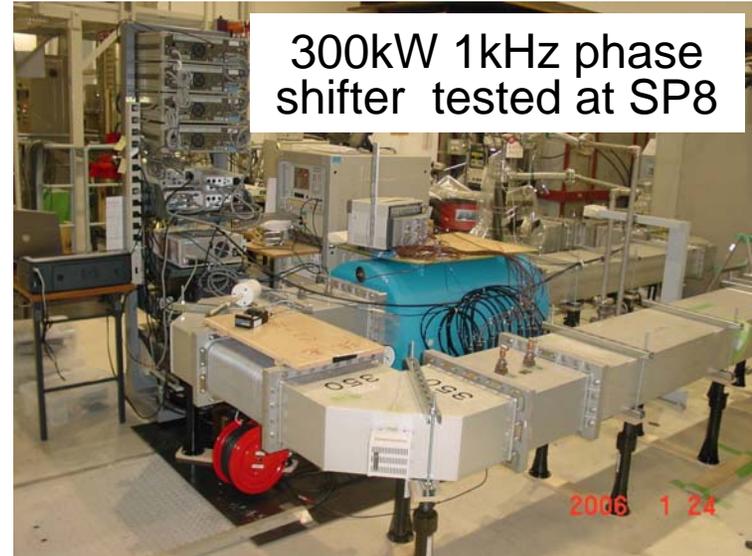


R&D

Vibration test of NL2 shield at KEK (by SP8)



300kW 1kHz phase shifter tested at SP8



Crab cavity installed to KEK-B (Jan. 2007)



Vibration test at KEK (by SP8)

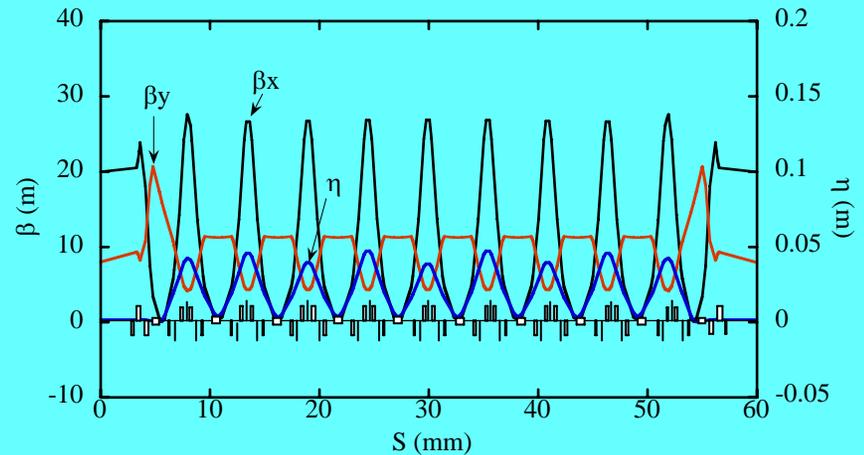
超低エミッタンスリング

数10pmオーダーのエミッタンスを持つ次世代リング

- ・SPring-8オリジナルラティスの1/100の超低エミッタンスリング
- ・1セルの長さが現在の蓄積リング1セルの長さの2倍。既存のビームラインがそのまま使える
- ・バンチ長は現在の1/2.5~1/5 ($V_{rf}=7\text{MV}\sim 28\text{MV}$)

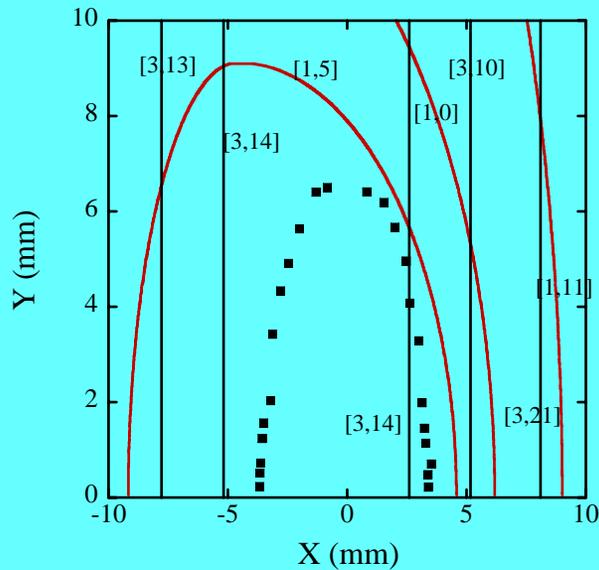
主なパラメータ

エネルギー	E	6 GeV
周長	L	1436 m
エミッタンス	ϵ_{x0}	83 pmrad
バンチ長	σ_s	5.4 pm ($V_{rf}=7\text{MV}$) 2.7 pm ($V_{rf}=28\text{mV}$)
セル数	N_c	24
セルあたり偏向電磁石の数	N_b	10

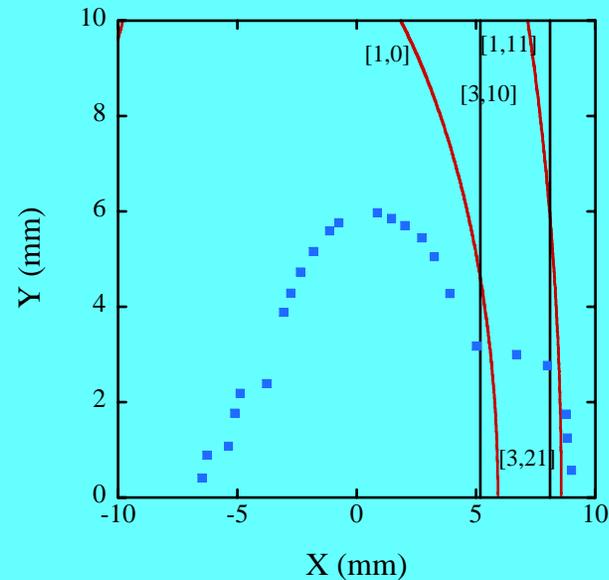


ダイナミックアパーチャの拡大

- ・大きなクロマティシティ、小さなディスパージョンのため、クロマティシティ補正のための六極電磁石が強くなる。そのためジオメトリックアベレイションが大きくなり、多くの共鳴を誘起し、ダイナミックアパーチャが小さくなる。
- ・ハーモニック六極により、共鳴を抑制し、5mm以上のアパーチャを確保



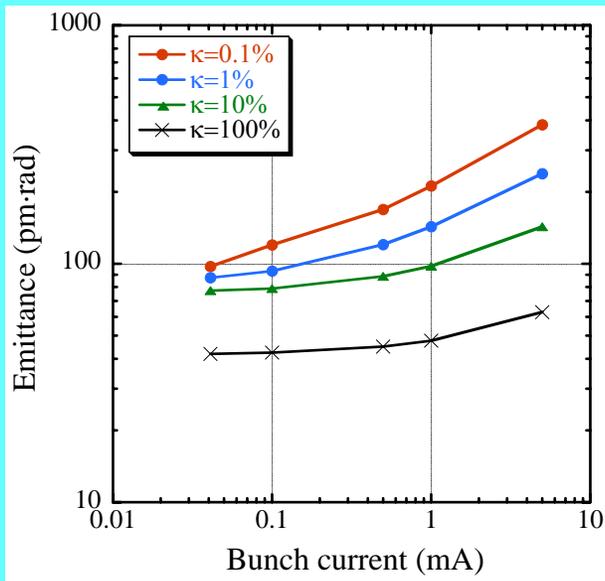
拡大前



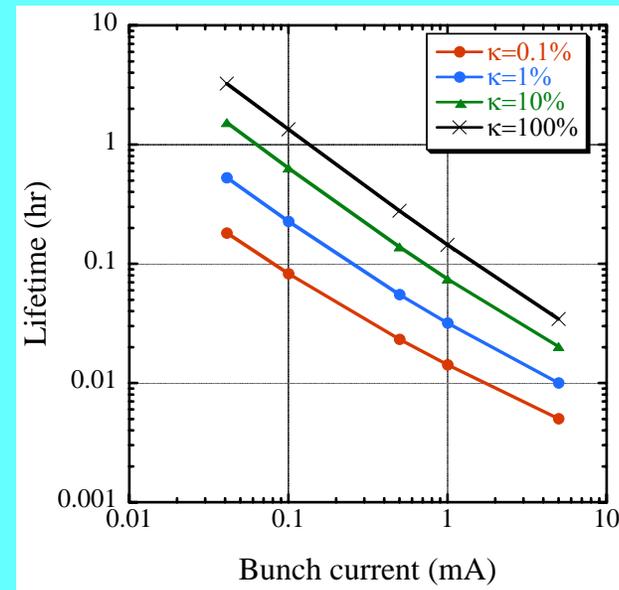
拡大後

バンチ電流とエミッタンス、ライフ

- ・ ビームサイズが小さいため、バンチ内の電子散乱によりエミッタンスが大きくなる可能性が大きい。そこでエミッタンスの増加を計算。カップリングが0.1%の時、エミッタンスは100 pmを超えてしまうが、フルカップリングの場合、バンチ電流が1 mAまで40 pm台のエミッタンスのみである。
- ・ 同じ理由でタウシェックライフタイムも小さいことが予想されるため、ライフを計算。トップアップをやれば十分ビーム電流を確保可能。



バンチ電流とエミッタンス



バンチ電流とタウシェックライフタイム

ラティスの変更による低エミッタンス化

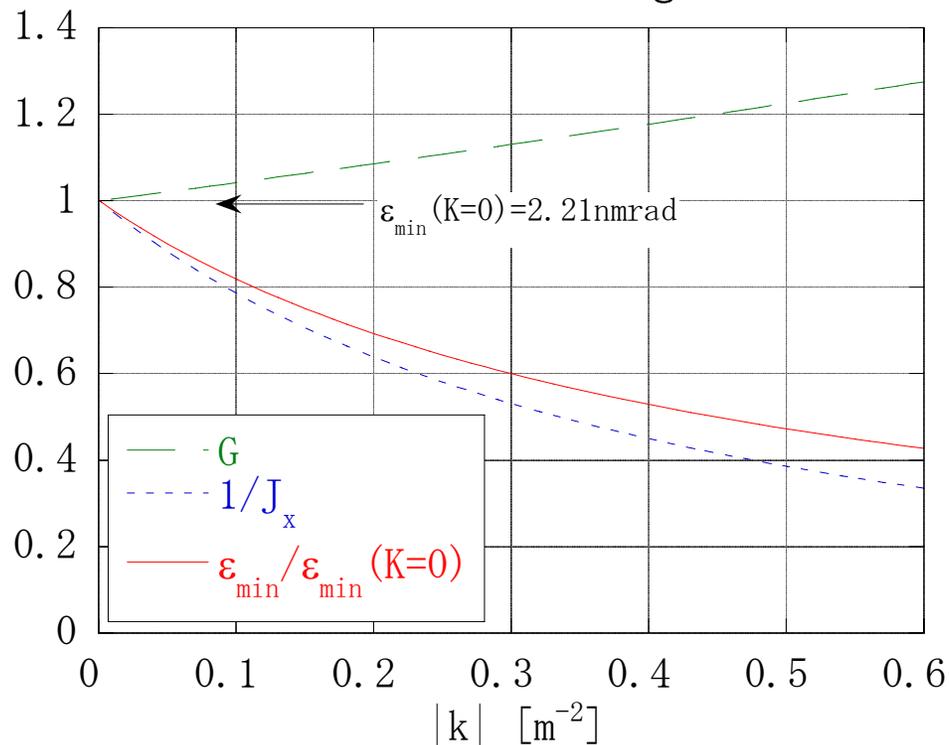
Combined Magnet によるエミッタンス低減

原理:

偏向電磁石に defocusing Q として作用する field gradient を持たせて、電子ビームが外側を通るほど弱い磁場を感じるようにする。このとき、中心エネルギーよりも高いエネルギーを持つ電子は、偏向電磁石を通過する際に、より外側の軌道を通るため、放射によるエネルギーロス相対的に小さくなる。反対にエネルギーの低い電子は、より内側の軌道を通るから、より多くのエネルギーを失う。その結果、電子ビームのエネルギー拡がり、field gradient が無い場合に比べて大きくなる。このようにして縦方向の damping が弱くなり、エネルギー拡がりが増えた分、**横方向の damping が強くなってエミッタンスが小さくなる**。縦方向の damping を弱くする (J_s を小さくする) と横方向の damping が強くなる (J_x が大きくなる) ことは、Robinson の Damping Criterion $J_x + J_y + J_s = 4$ の示すところである。

最小エミッタンス ϵ_{\min} の計算 (DBA, Combined B)

Minimum Emittance for DBA Lattice with Combined Magnet



$k = -0.4 \sim -0.5 \text{ m}^{-2}$ 程度の defocusing Q を加え、オプティクスを調整できれば、エミッタンスは約半分にはなると思われる。 $\sim 1 \text{ nm} \cdot \text{rad}$

その他

- ・ 低エネルギー運転（4GeV） エミッタンス： $< 1\text{nm}\cdot\text{rad}$
- ・ 蓄積電流の増加（100mA→200mA）
 - アブソーバの交換などが必要
 - 加速器診断（BL38B2, BL05SS）では200mAの放射光出射が可能
- ・ 老朽化対策、電源等の更新は今後の大きな課題
- ・ XFELとの統合化
 - XFEL放射光の入射によるコンプトン8GeV γ 線の生成
 - 8GeV高品質電子ビームの入射によるERL放射光の生成

高エネルギー加速器奨励会諏訪賞



春日先生、加藤先生、ありがとうございました。

OB、OGの皆さん、ご出席ありがとうございました。

次は20周年でお会いしましょう！