

3GeV 蓄積リングと 3GeV ERL の比較

パラメータ

		ERL (丸ビーム)					20セル			16セル		
		高輝度 モード	高光束 モード	両立 モード	極端 パルス モード	XFEL-0	H	H	V	H	H	V
エネルギー	E [GeV]	3										
平均電流	I [mA]	10	100	100	0.077	0.02	0	500		0	500	
平均バンチ 電荷	q _b [pC]	7.7	77	77	77	20	-	982.69		-	997.07	
バンチ 繰り返し	f _{rep} [GHz]	1.3	1.3	1.3	0.001	0.001	0.508			0.501		
規格化 エミッタンス	ε _n [mmrad]	0.1	1	0.1	1~10	0.2	0.79	1.61	0.04	2.04	2.42	0.04
3GeVでの エミッタンス	ε _n [pmrad]	17	170	17	200~2000	15	145	296	8	374	444	8
エネルギー 拡がり	σ _E /E [×10 ⁻⁴]	2	2	2		0.5	6.6	8		7.7	8.2	
バンチ長	σ _t [ps]	2.00	2.00	2.00	0.10	1.00	11.34	13.68		13.01	13.68	
バンチ長	σ _t [mm]	0.60	0.60	0.60	0.03	0.30	3.40	4.10		3.90	4.10	

現光源の延長としての「基盤的汎用光源」として重要なこと

- 多数ユーザーが同時に、安定な高輝度、高光束光を利用できること。
- ビームエネルギーが同じなら、挿入光源から出てくる光のエネルギーに差はない。
 - 3GeV なので真空封止短周期の限界が 10~20keV。
- エミッタンス → どれだけ絞れるかに効く
- 平均電流値 → 発生する総光子数に効く
- 「絞った上で試料上にどれだけ光子が来るか」の指標として、エミッタンスと蓄積電流値の比の積を考えてみる。
- 現実には、電子ビームサイズは分散関数とエネルギー拡がりの寄与があり、光のコヒーレント比には、光の固有エミッタンスの寄与がある。(エネルギー拡がりはファクターでリングが悪く、蓄積リング現在案には分散関数が残っていてビームサイズにそれなりに寄与している。挿入光源の輝度も悪化する。)

蓄積電流とエミッタンスだけの比を取って比較

		ERLがどれだけ優れているか											
		高輝度モード				高光束モード				両立モード			
		H	V	HV積	全体	H	V	HV積	全体	H	V	HV積	全体
平均電流比 (ERL/リング)		0.02				0.2				0.20			
エミッタンス比 (リング/ERL)	20セル	17.41	0.47	8.19	0.164	1.741	0.047	0.082	0.016	17.41	0.47	8.19	1.64
	20セル IBS完全抑制	8.53	0.47	4.01	0.080	0.853	0.047	0.040	0.008	8.53	0.47	4.01	0.80
	16セル	26.12	0.47	12.29	0.246	2.612	0.047	0.123	0.025	26.12	0.47	12.29	2.46
	16セル IBS完全抑制	22.00	0.47	10.35	0.207	2.200	0.047	0.104	0.021	22.00	0.47	10.35	2.07

- 高輝度モード、高光束モード共に蓄積リングの方が優れている。
- 両立モードの時はERLが優れているが、20セルでIBS完全抑制すると、リングが逆転する。
- (現実にはIDパラメータ、エネルギー拡がり、分散関数、波長によって光の固有エミッタンスの影響がある。
細かい値には特に意味は無い)

ここで言いたいこと

- ERLは両立モード(最善のケース)の実現が必須。
- ERLとHMBA蓄積リングを比べると、コヒーレンスユーザーに対して、せいぜいファクター程度、下手するとコンパラ、現実にはいい勝負。
- 絞らないユーザーにとってはERLはかなり不利。

どうしてコヒーレンスが「せいぜいファクターかコンパラ」になってしまったか？

- 蓄積リング型光源の新ラティスタイプ (HMBA) の開発
 - DBA、TBA の場合、周長 1km でも数 nrad、カップリング 1% で垂直数十 pmrad が限界だった。
 - ところが、HMBA の登場で周長 500m で 300pmrad、垂直数 pmrad が可能になった。
 - DBA、TBA だと ERL の方が 100 倍有利 → HMBA でコンパラになってしまった。

ERL の輝度 Undulator spectrum at VUV-SX region (Ultimate mode)

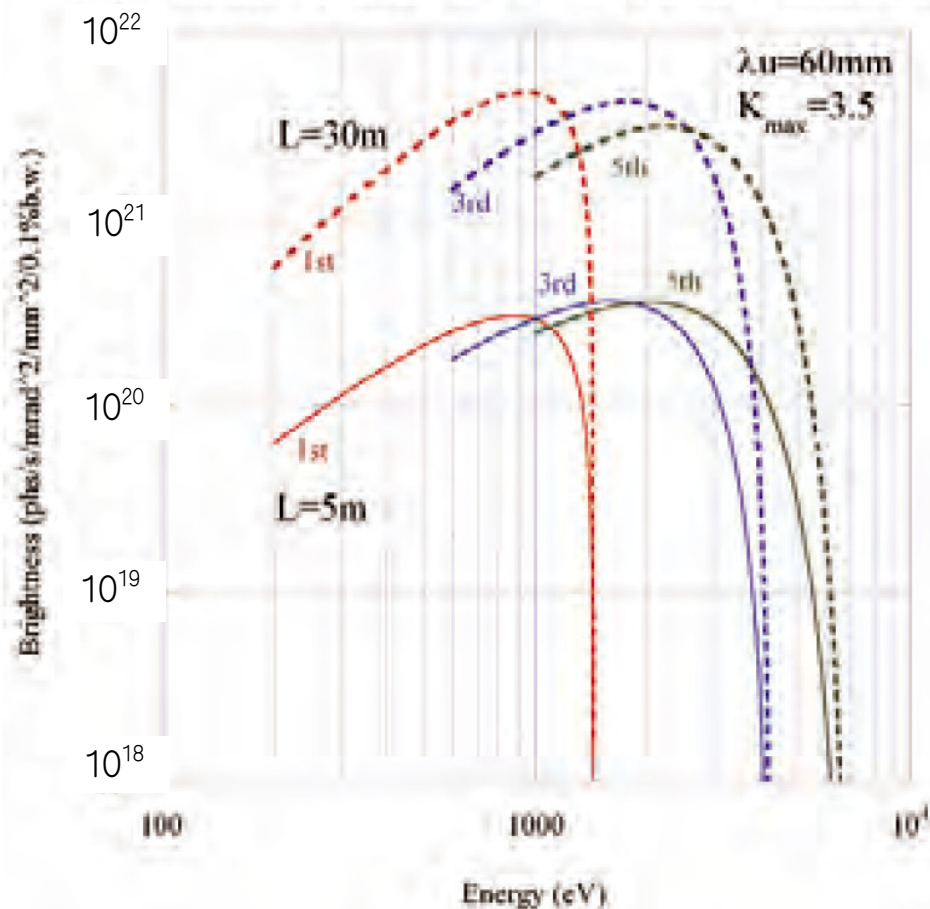


Figure 5-38
The undulator spectrum for the VUV-SX source.

Undulator spectrum at X-ray region (Ultimate mode)

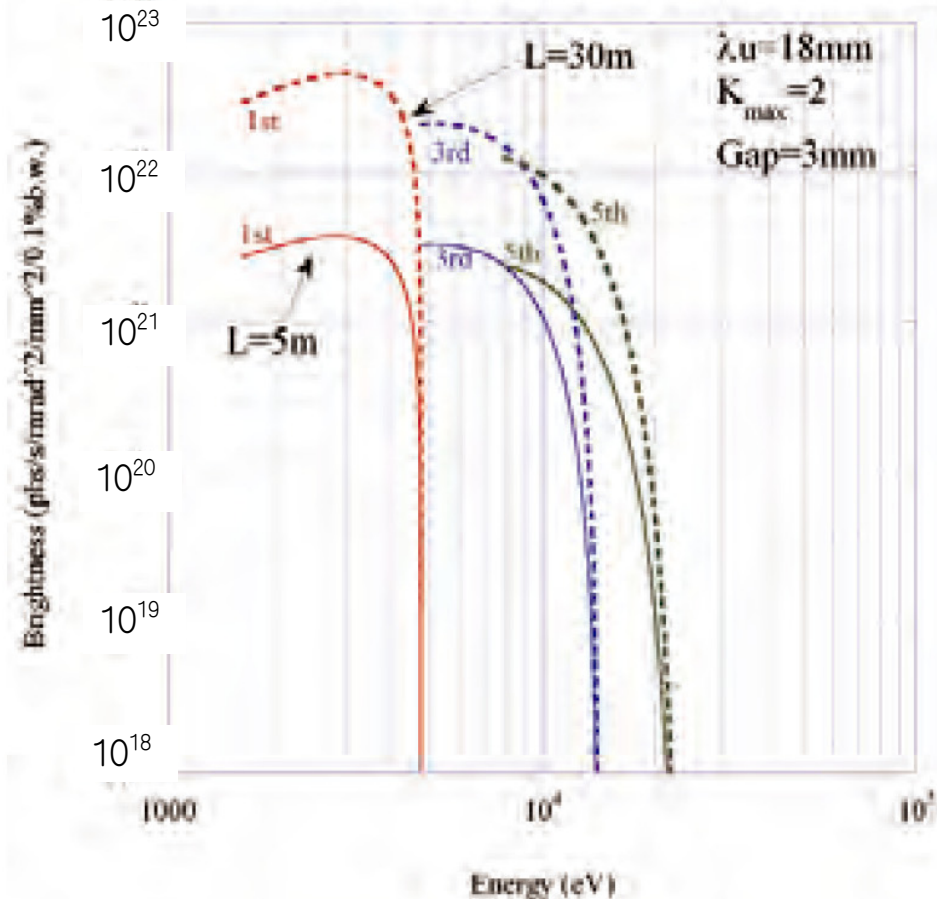
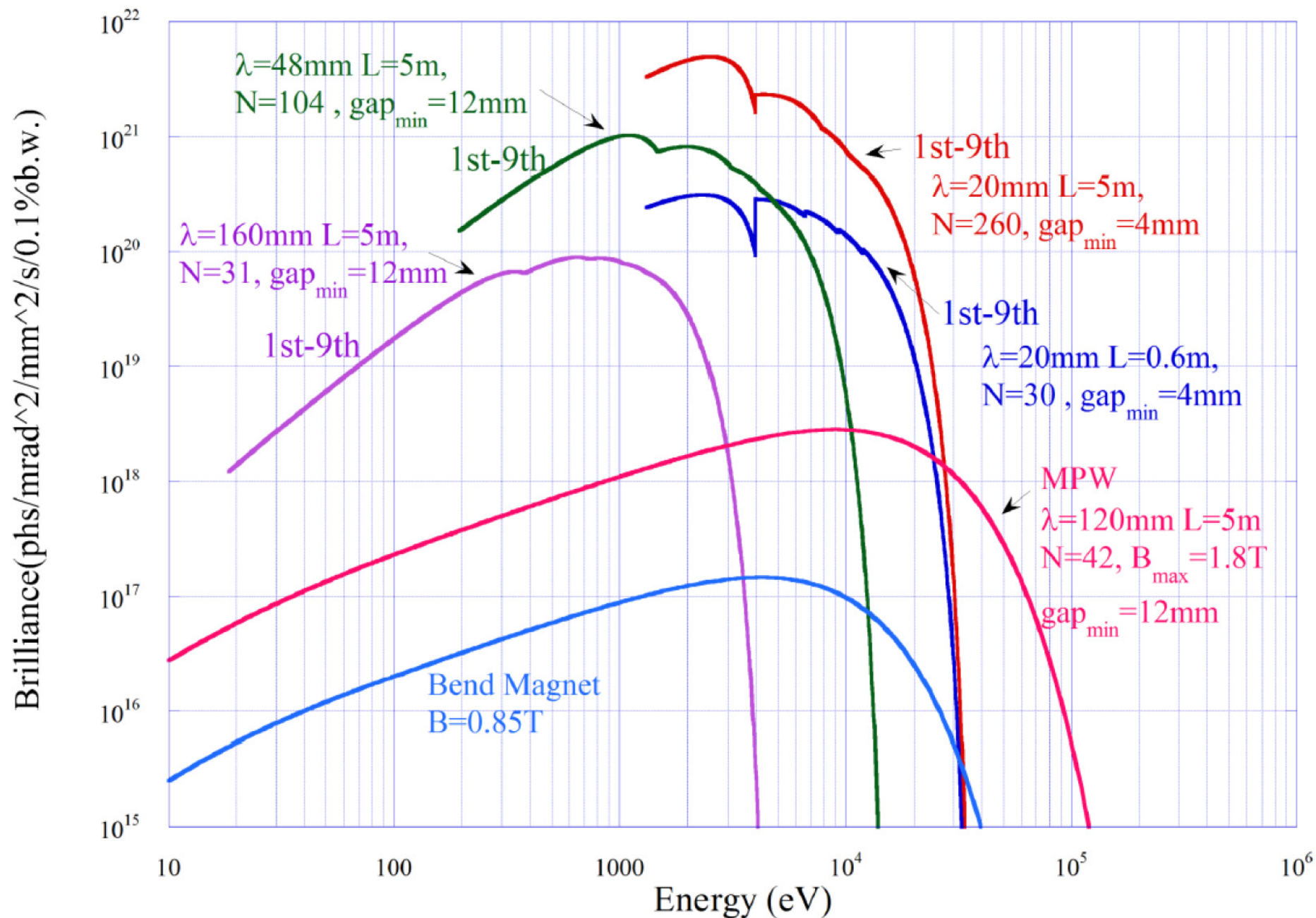


Figure 5-39
The SGU spectrum for the X-ray source.

5m 挿入光源の輝度 : 100eV~数 keV で $10^{20} \sim 10^{21}$ 、数 keV~10keV で $10^{21} \sim 10^{22}$

蓄積リングの輝度

[16 cell] $\epsilon_x = 418 \text{ pmrad}$, $\epsilon_y = 8 \text{ pmrad}$



基盤的汎用光源としての ERL に有利な点は非常に少ない。

基盤的汎用光源としてのパラメータでは……

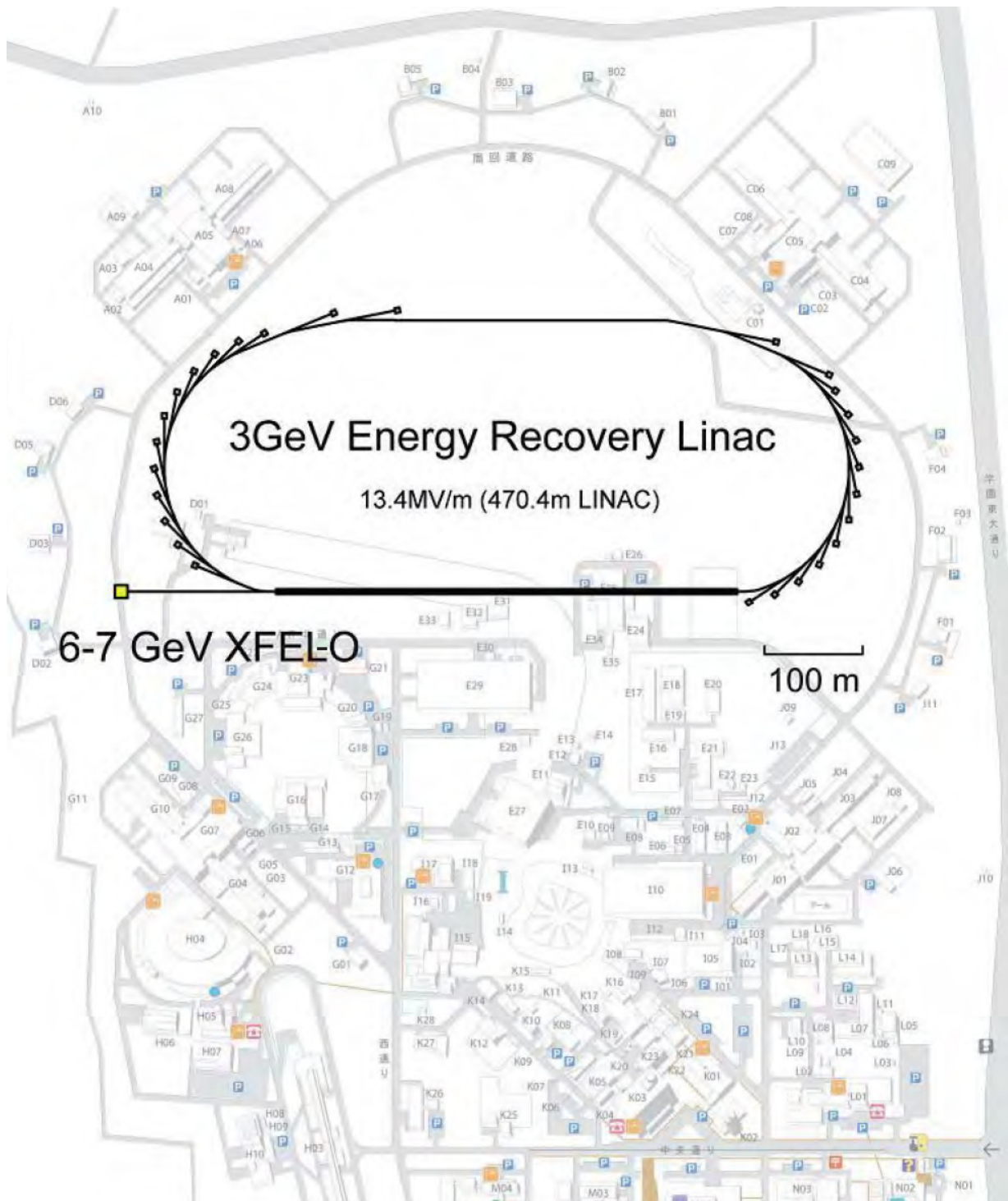
- 低エミッタンスでコヒーレンスを稼ぐ方式において、HMBA方式のラティスが開発され、蓄積リングが ERL にほぼ追いついた。
- ERL はコヒーレンスユーザーに対してせいぜいファクターかコンパラ、誤差や安定度、到達度を含めるといい勝負にしかならない。確実に有利と言い切れない状況になった。
- 電流値で光子数を稼ぐ方式では ERL はさらに不利、絞らないユーザーにとっては悪化。

ERL が未だに有利な点

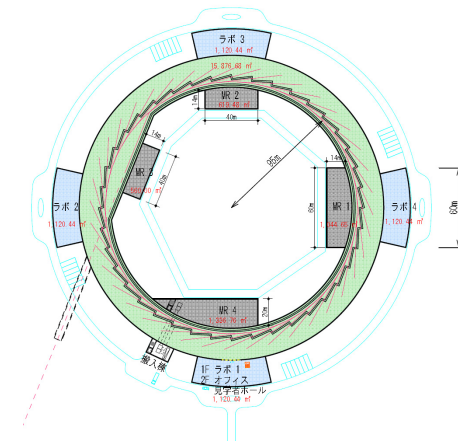
- 短パルスができる。(ただし短パルスという意味ではそれに特化した FEL がある。)
- 入射部で 1pmrad、0.1pmrad できるかも知れない。部品の交換で圧倒的性能向上の余地がある。

ERL の技術的難しさ

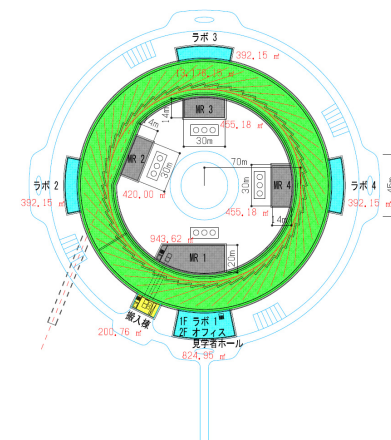
- いうまでもなし……技術的な難しさ (主要な開発項目のリストとその難易度表参照)、建設コスト、運転コスト、ビームの安定性、トラブルの頻度、安全性 (特に放射線に関して) ……大半の項目で蓄積リング型の方が難しさがかなり小さい。
- 大電流運転など、現状の困難の何割かは、基盤的汎用光源としての運転を可能にしなければいけないという制約条件による。少数ユーザーの為に先端的な光源 (CW-XFEL) とすれば、一気に困難さが減少。



ほぼ同じ縮尺の 600m 案



ほぼ同じ縮尺の 440m 案



ERL の BL のイメージ？



現在の蓄積リングは

- VSX：全部剥き出し。
- X：検出器等はハッチ内、途中は空中。

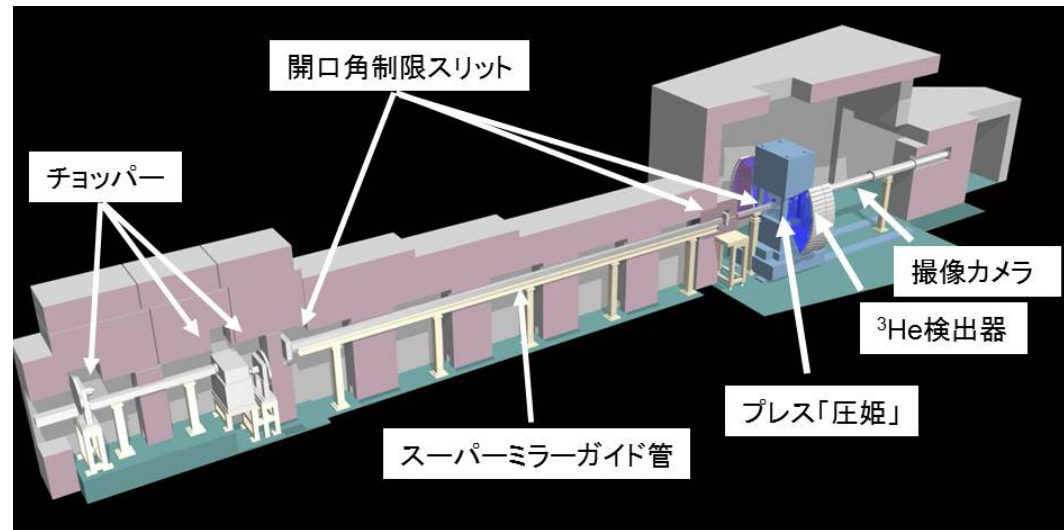


放射線安全上の懸念

- 現状と同様の BL 建設の為に、電子軌道の接線上から大幅にずらして BL 建設が必要？
- 電子ビームロスの直撃を受ける可能性が残ると、BL 全て遮蔽しなければいけなくなる？



きちんと遮蔽された BL 例 (J-PARC WEB より)



PLANETの全体像

(参考文献) 服部ら、波紋20, 39-44 (2010).

大強度型中性子小中角散乱装置「大観」/BL15

「せいぜいファクターかコンパラ」でなくなる為に……

- 常電導の FEL のパラメータの立ち位置はどのあたりなのか？（SACLA のパラメータをあたってみる）
 - 0.15nC、0.5 π mmrad、平均電流～数 nA
 - エネルギー < 20 keV（基本波）
 - 光子数 $2 \times 10^{11} \sim 5 \times 10^{11}$ photons/pulse @ 10 keV（20keV は 2 桁落程度。）
 - 60Hz → $1 \times 10^{13} \sim 3 \times 10^{13}$ 個/秒
- PF や新リングで、17ms 間に来る全光子がまとめて、6～30fs パルス幅の 1 パルスで毎秒来る。
 - 挿入光源 90m だが、平均電流は nA の領域で 500mA と同じ光子数発生。
 - 全コヒーレントだが、ショット毎にエネルギーと強度はばらつく。
 - 試料上に届く「平均光子数」はほぼ同じと考えられるが、蓄積リングと同じ使い方は不可能だろう。
 - コヒーレンスをエミッタンスで、光子数を電流と挿入光源長で稼ぐのをやめる。
- 繰り返し 60Hz を kHz、MHz、GHz にしたかったら、超伝導空洞を使うしかない。
 - 繰り返し周波数分だけ、光子数も増える。
 - 60kHz にすれば 1000 倍、60MHz にすれば 100 万倍、1.3GHz なら 2200 万倍に増える。
 - そこに向けて舵を切った方が良い。