

E R L 放射光源の現状と赤外利用の可能性

分子研研究会「赤外放射光の現状と将来計画」
2002年11月14日、岡崎コンファレンスセンター

日本原子力研究所、光量子科学研究センター

羽島良一

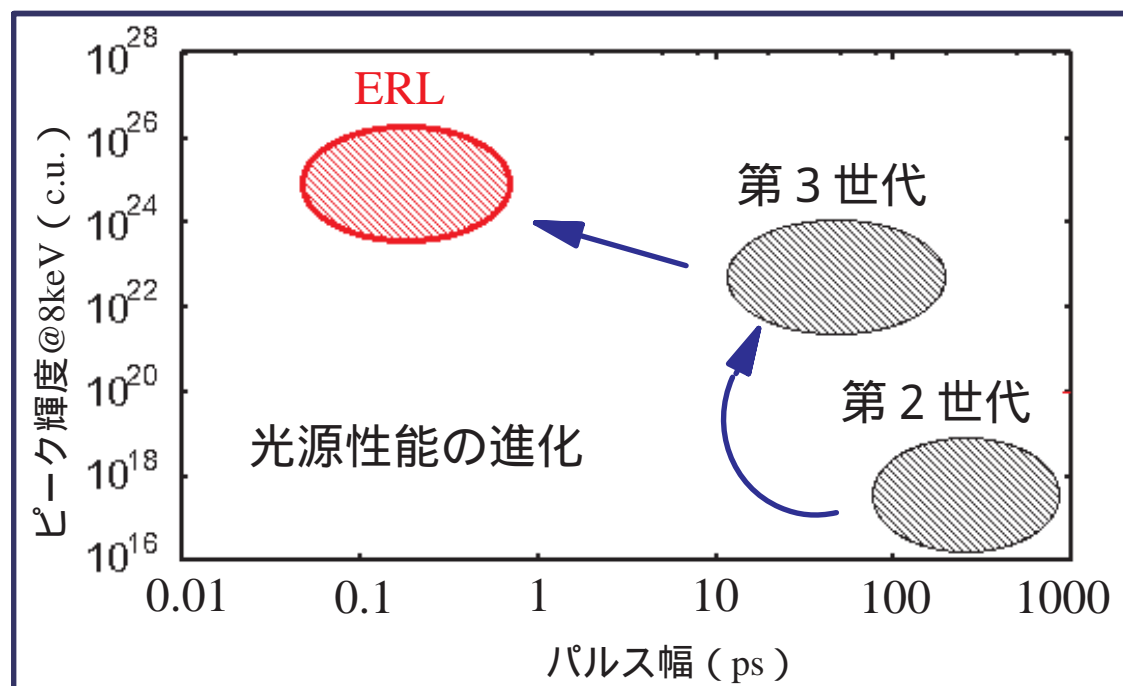
E R L 放射光源の原理と特徴

回折限界に迫る、サブピコ秒の放射光
第3世代放射光源と比べて、100～1000倍の輝度、100倍の縮重度

E R L 放射光源開発の現状と赤外利用の可能性

欧米で立ち上がる複数の建設計画
開発競争における課題と解決への道筋
赤外光源としての特徴

シンクロトロン放射光源の進化

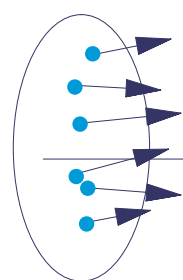


ERL放射光源

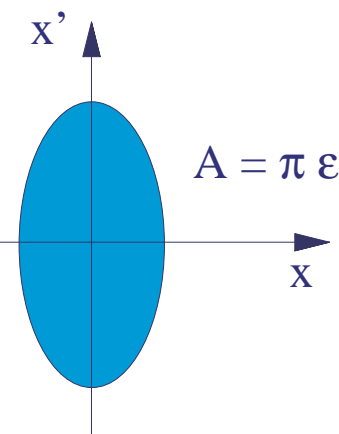
蓄積リングの限界を超える、高い輝度、短いパルス幅

蓄積リング放射光源の性能限界 (1)

電子ビームのエミッタンスが放射減衰と光子励起の平衡で決まる。
(リングの設計で決まる下限がある)



エミッタンス (ϵ) = 電子の横方向の運動のバラツキ



放射光の広がり = 電子の広がり + 光自身の広がり

$$\epsilon_{\text{xray}}^2 = \epsilon_{\text{elec}}^2 + \epsilon_{\text{ph}}^2$$

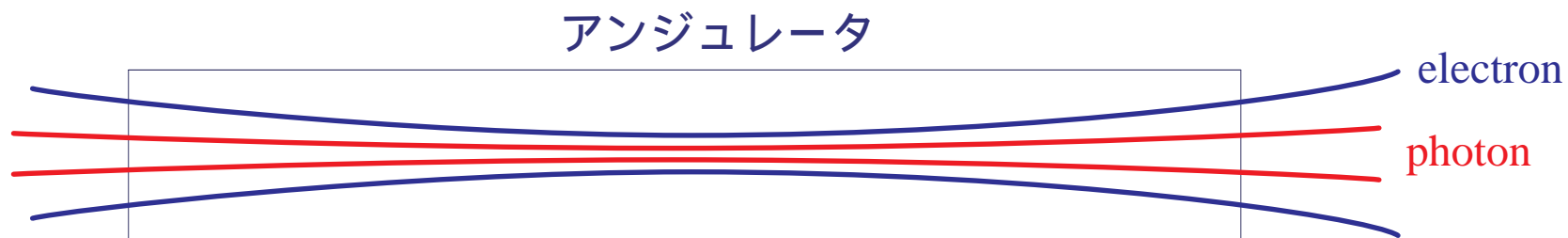
SPring-8 では、 $\epsilon_x \sim 5\text{nm}$, $\epsilon_y \sim 5\text{pm}$

Heisenberg の不確定性原理
で決まる最小値 (単一横モード)

$$\epsilon_{\text{ph}} = \lambda / 4 \pi = 8\text{pm for } 1$$

電子の広がりが圧倒的に大きい \implies 横方向のコヒーレンスが悪い

蓄積リング放射光源の性能限界 (2)



$\epsilon_x \gg \epsilon_{ph}$ ----- 電子の方が早く発散する

アンジュレータ周期 (N) を増やしても輝度の向上は N^2 にならない。

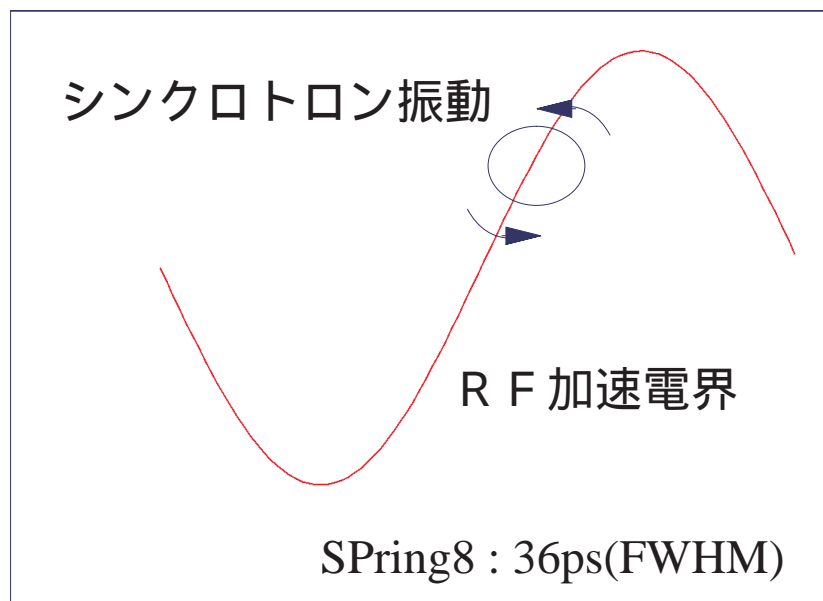
SPring-8 アンジュレータの例

平均ブリリアンス

4.5m = 2.4cm x	187 周期	→	5.0×10^{20}
25m = 3.2cm x	781 周期	→	2.2×10^{21}
	4.2 倍		4.4 倍

蓄積リング放射光源の性能限界 (3)

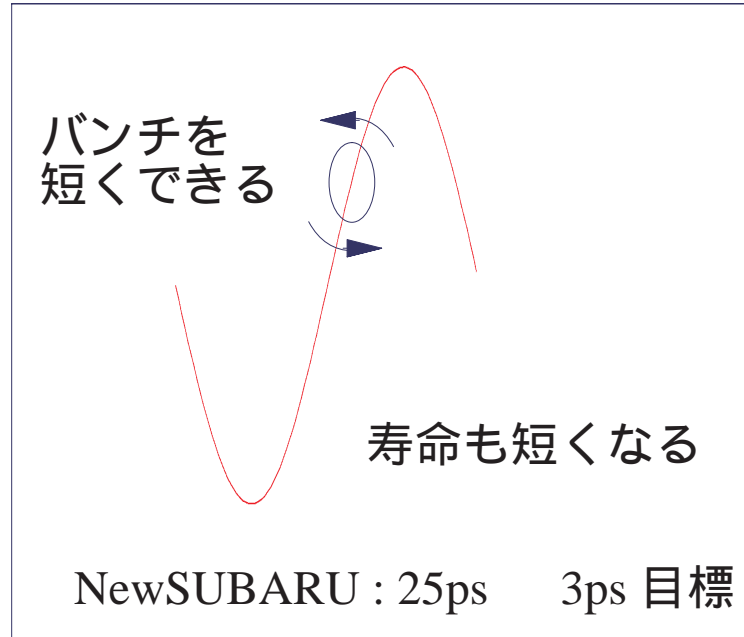
電子バンチの長さはシンクロトロン振動の平衡状態で決まる。



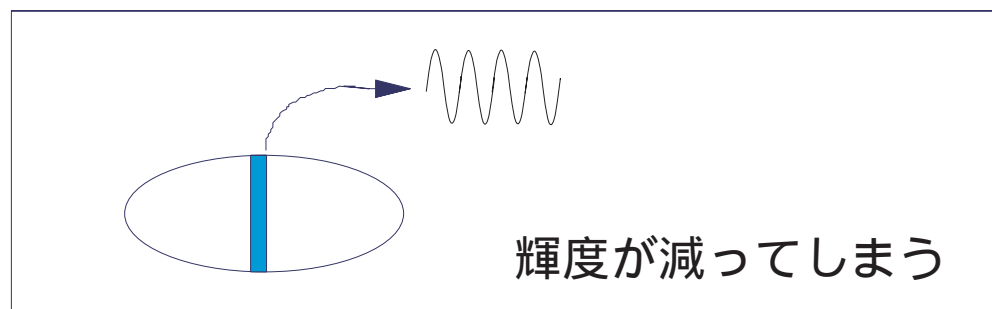
RF 電界を大きく



モーメントム
コンパクション
を小さく

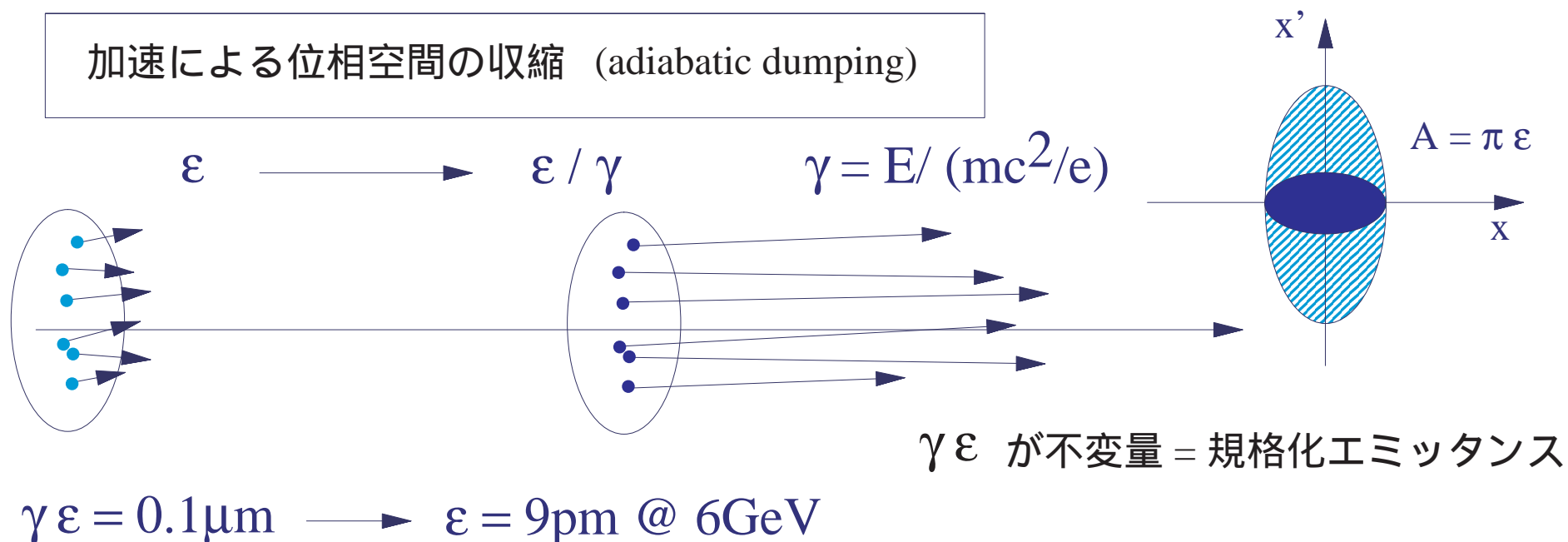


フェムト秒レーザーでバンチをスライス
LBL/ALS



蓄積リングの限界を超えるリニアック光源

加速による位相空間の収縮 (adiabatic dumping)



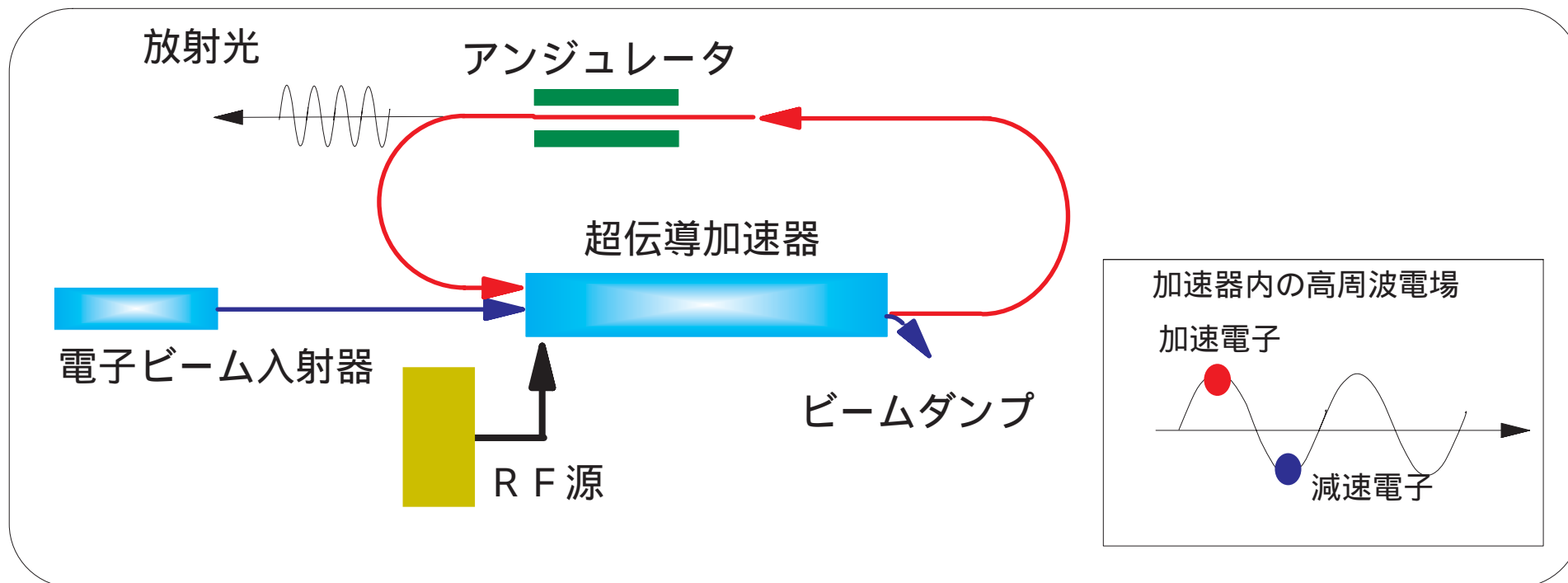
電子の時間、空間分布を自由に変えられる (tailored source)

100fs ~ 10ps

真円 ~ 偏平

連続バンチ列 ~ 単バンチ

エネルギー回収型リニアックの原理



超伝導加速器（熱損失が無い） + エネルギー回収

小さな R F パワーで電子加速が行なえる。

high-power の電子ビームが連続生成できる。

E R L 放射光源の構成



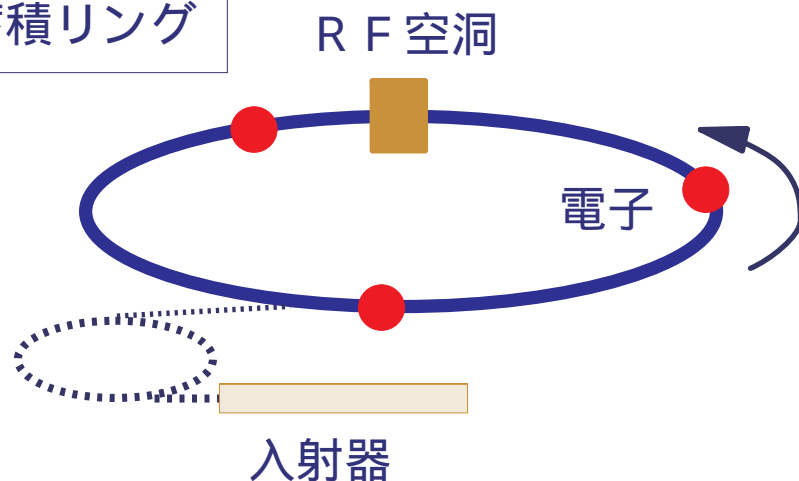
入射器 : 低エミッタンスの電子バンチを生成。光陰極電子銃。 photo-cathode gun
 予備的な加速を行なう 5 ~ 10MeV

超伝導リニアック : 放射光発生に必要なエネルギーまで加速。
 エネルギー回収を効率良く行なう。

周回軌道 : 偏向磁石、挿入光源を備える。(蓄積リング光源と同様)

蓄積リングとERL放射光源の比較

蓄積リング



電子は多数回繰り返し周回する。

電子は周回毎に放射によって
~ 0.1%のエネルギーを失う。

失ったエネルギーは、RF空洞で補給。

SPring-8 : 8GeV x 100mA
RF 1MW x 3 = 3MW

電子は1回のみ周回だが、エネルギーは循環。

放射による電子エネルギー損失は、
RF源から補給、または、
入射とダンプのエネルギー差となる。

Cornell/Phase-II :
5GeV x 100mA
RF -- 4.7kW x 240 = 1.1MW
(入射器は含まず)

ERL



ERL放射光源からの放射光 --- 回折限界に迫るエミッタンス

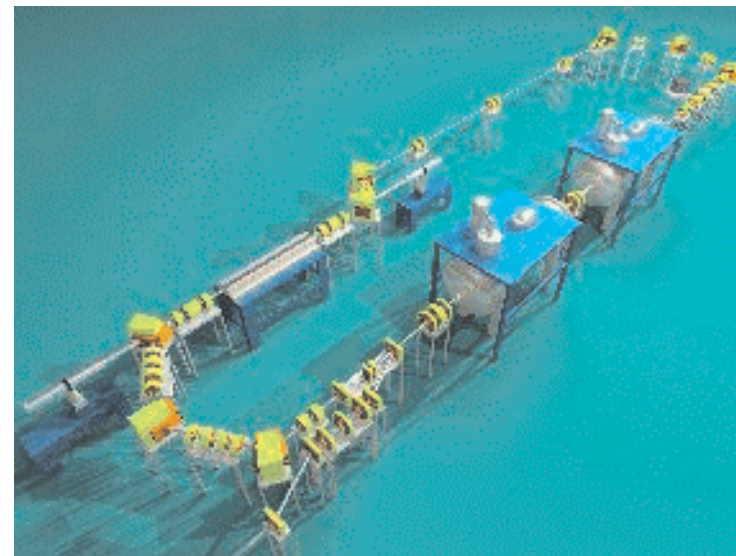
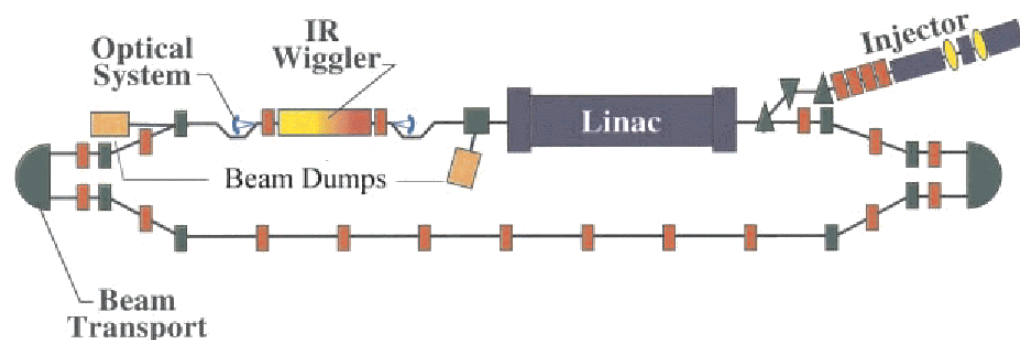
横方向の特性（光源サイズ等）と平均ブリリアンスの比較

		25m ERL undulator 5.3 GeV		SPring8 8 GeV	ESRF 6 GeV	LCLS XFEL 15 GeV
Operation / Undulator length		100 mA	10 mA	25 m	5 m	100 m
Source size (μm)	horizontal	103	24.5	890	879	78
	vertical	103	24.5	22.8	13.9	78
Source div. (μrad)	horizontal	9.1	6.2	37.4	26.8	1
	vertical	9.1	6.2	4.3	10.4	1
Beam size (μm) @50m	horizontal	467	311	2071	1603	93
	vertical	467	311	216	520	93
Average brilliance (p/s/0.1%bw/mm ² /mrad ²)		1.3×10^{22}	5.2×10^{22}	2.2×10^{21}	3.1×10^{20}	4.2×10^{22}
% beam coherence		0.52	20	0.14	0.14	100

Q.Shen et al., Proc. SPIE, vol.4501 (2001).

世界の現状 --- 稼働中の E R L 装置

TJNAF/IR-demo と JAERI-ERL



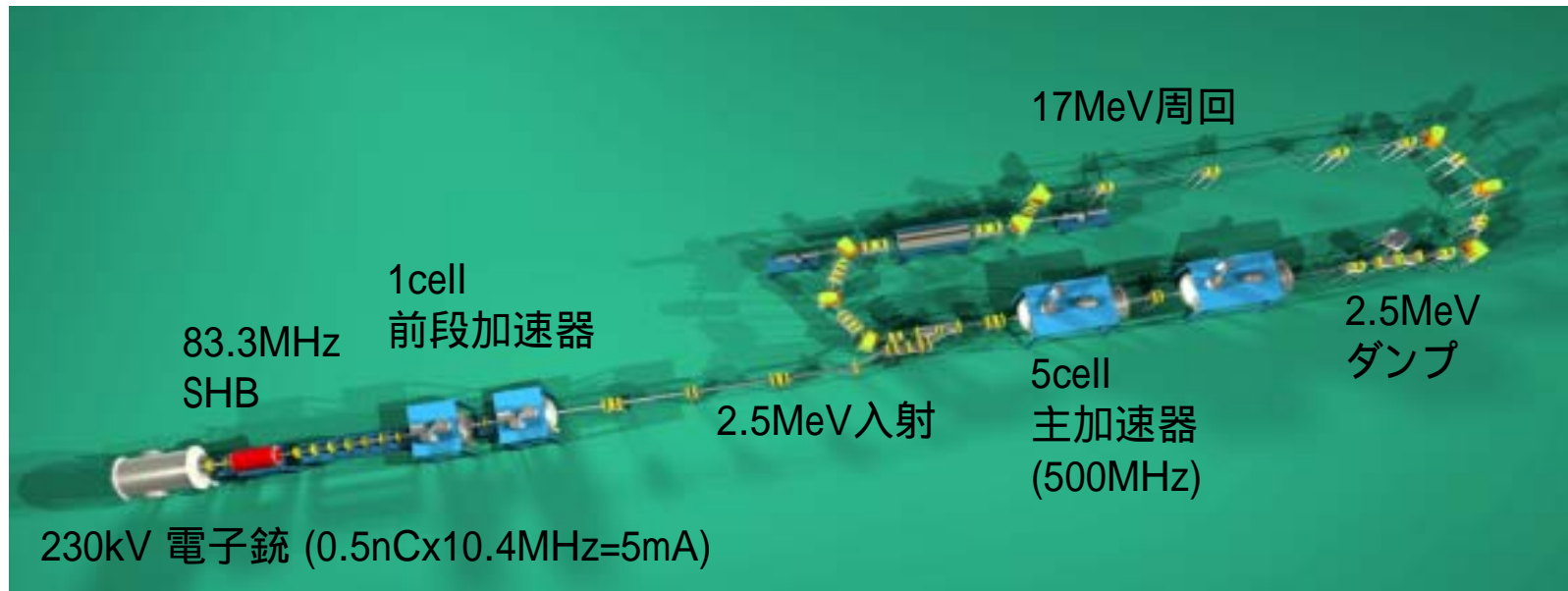
IR-demo : 10MeV (入射) + 32MeV (主加速器) , $60\text{pC} \times 18.7\text{MHz} \times (1\sim4) = 1.2\sim4.8\text{mA}$

JAERI : 2MeV (入射) + 15MeV (主加速器) , $500\text{pC} \times 10.4\text{MHz} \times (1\sim8) = 5\sim40\text{mA}$

いづれも high-power FEL 用であるが、装置の構成、ビームダイナミクスは E R L 放射光源と共通。

HOM不安定性、周回中のエミッタンス増大などの基礎研究が期待できる。

原研FELにおけるエネルギー回収型リニアックの開発



計画中の E R L 装置

提案されている E R L 放射光源

USA

Cornell/TJNAF proto-type の建設予算を NSF に申請中

BNL NSLS(第二世代光源)の upgrade として ERL を提案

LBL フェムト秒 X 線パルスに特化した装置

ヨーロッパ

Daresbury DIAMOND, ESRF を補完する 600MeV ERL 光源

Erlangen ERL に upgrade 可能な synchrotron 光源

BESSY UV SASE-FEL の 第二期計画として ERL

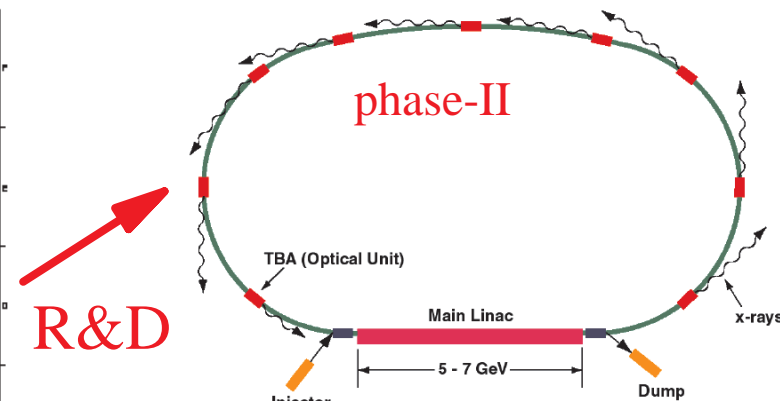
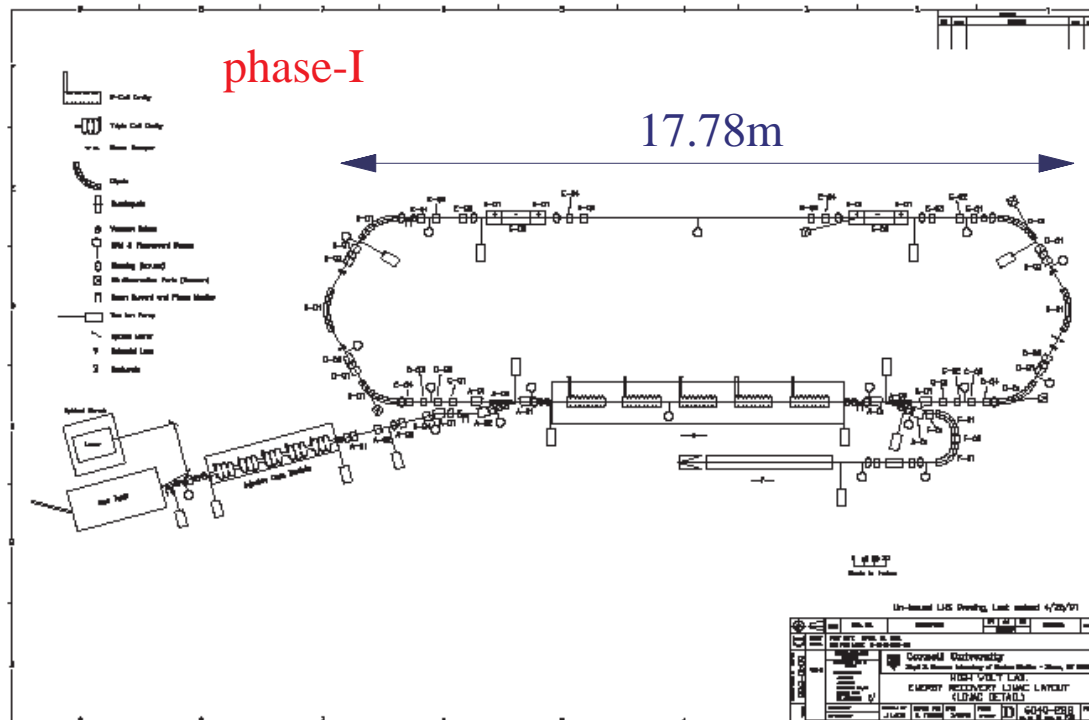
その他

BINP MARS 計画

日本 KEK、原研でそれぞれ検討中

世界の現状 --- 提案, 計画中の E R L 装置

Cornell/TJNAF



5MeV (入射) 100MeV (周回),
 3.2ps(linac) 0.1-1ps (周回)
 $77\text{pC} \times 1.3\text{GHz} = 100\text{mA}$, $\epsilon_n < 2\text{mm-mrad}$
 DC-photocathode (GaAs)
 TESLA cavity

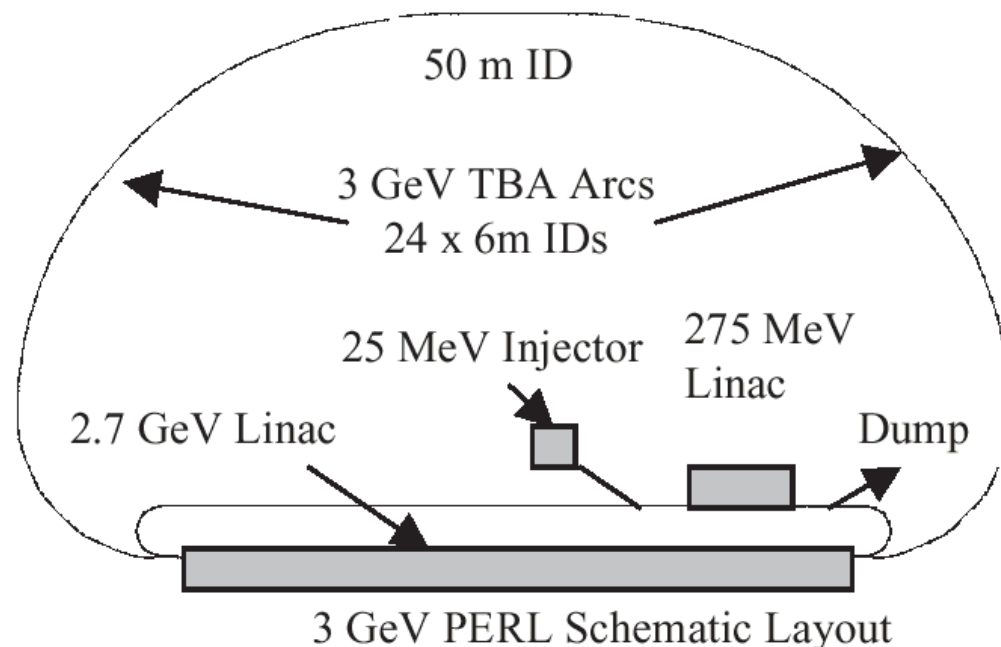
既存の建屋に設置

2000/8 Machine physics workshop
 2000/11 White paper
 2000/12 Science workshop
 2001/7 Phase-I proposal report

<http://erl.chess.cornell.edu/>

世界の現状 --- 提案, 計画中の E R L 装置

BNL



NSLS の upgrade として計画

~100fs の放射光発生

2001/1 PERL photocathode gun Workshop

2001/4 internal review

所内予算で設計作業中

PERL = Photoinjected Energy Recovery Linac

2-loops : 25MeV 300MeV 3-6GeV

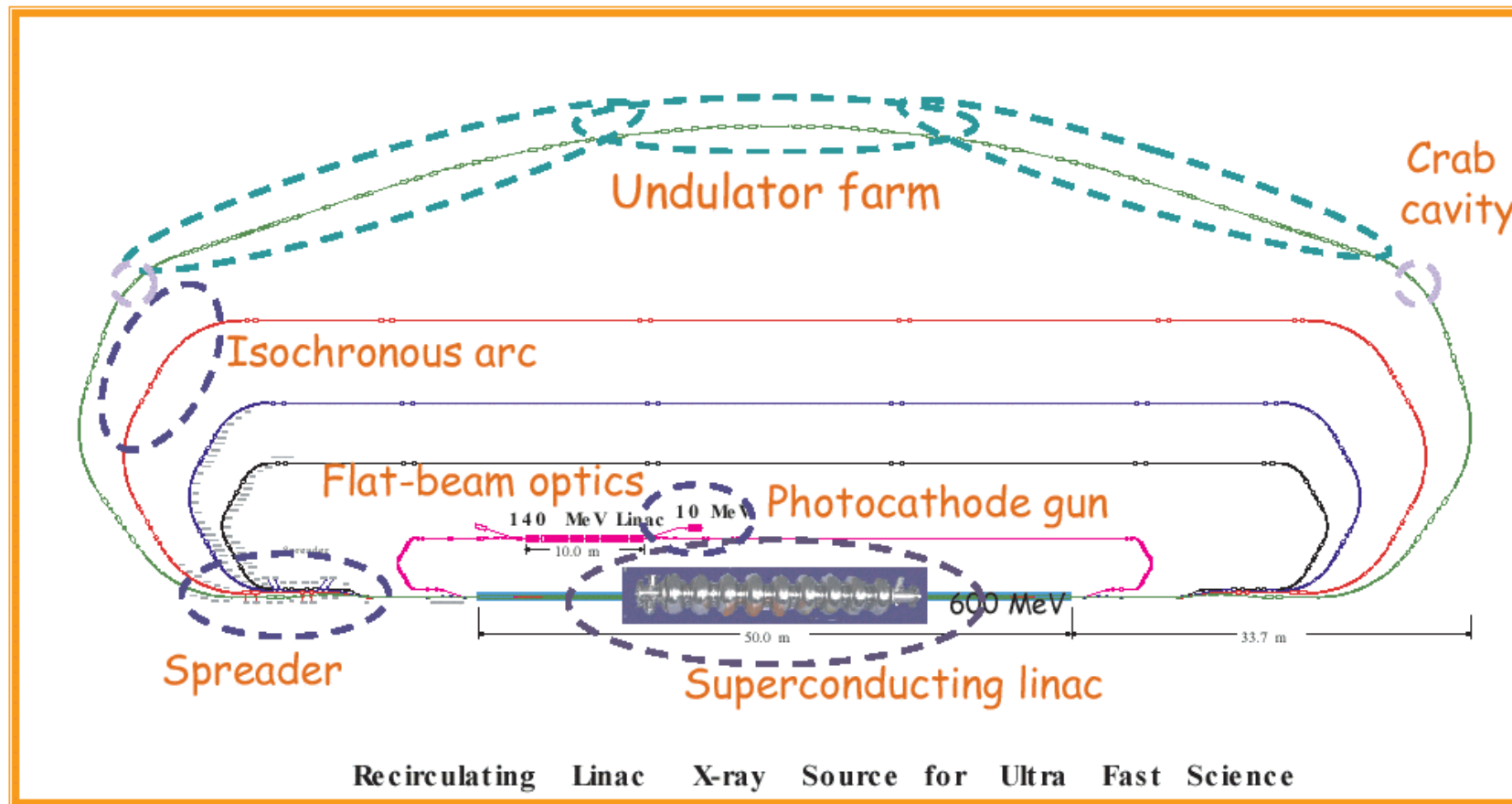
200mA = 150pC x 1.3GHz, または, 450pC x 433MHz

photocathode RF-gun + TESLA cavity

<http://nslsweb.nsls.bnl.gov/nsls/org/PERL/>

世界の現状 --- 提案, 計画中の E R L 装置

LBL



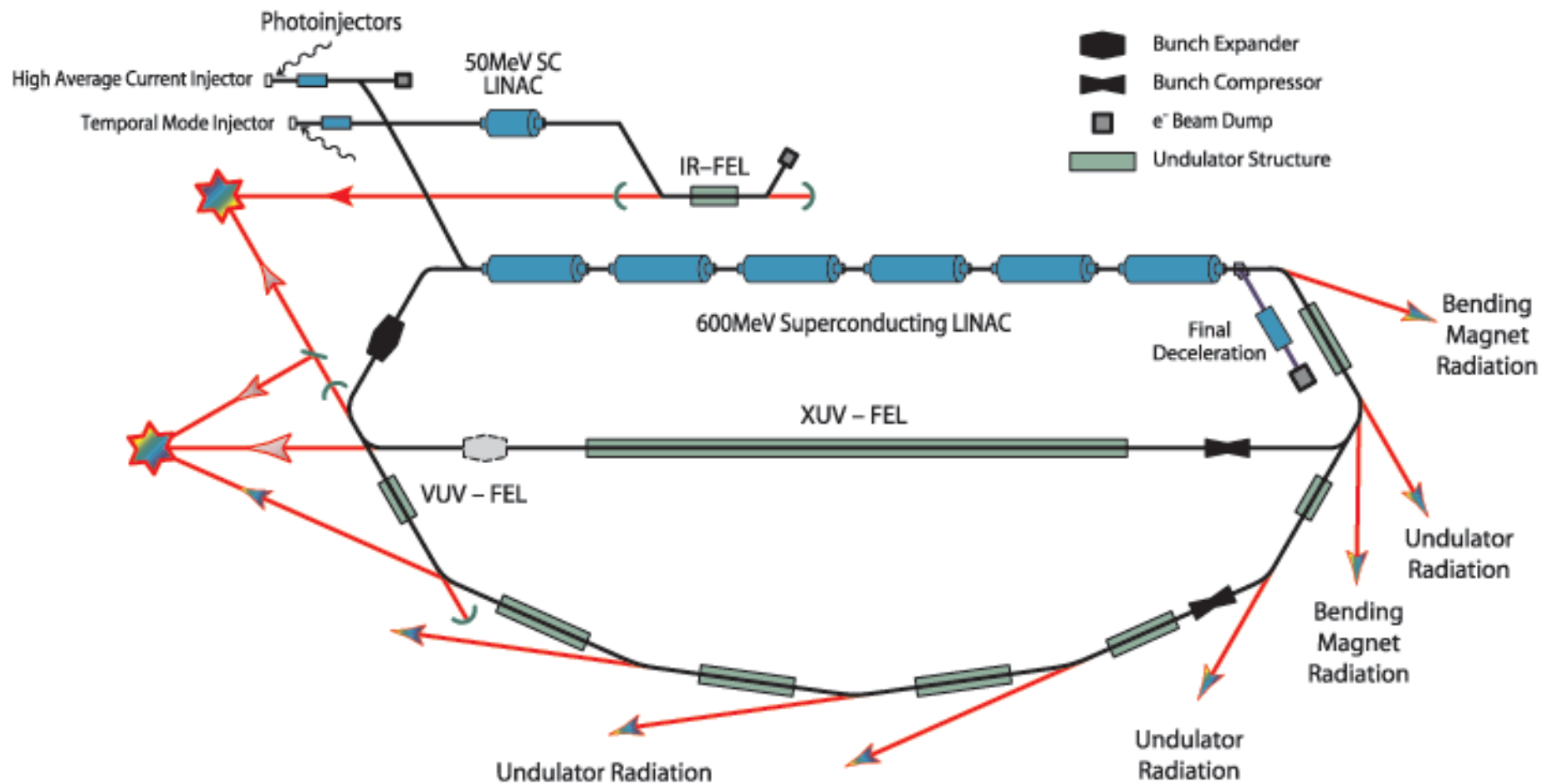
2.5GeV, 600MeV x 5-loops

1nC x 1-10kHz = 1-10 μ A

A.A.Zholents et al., SRI 2001.

世界の現状 --- 提案, 計画中の E R L 装置

Daresbury / 4GLS

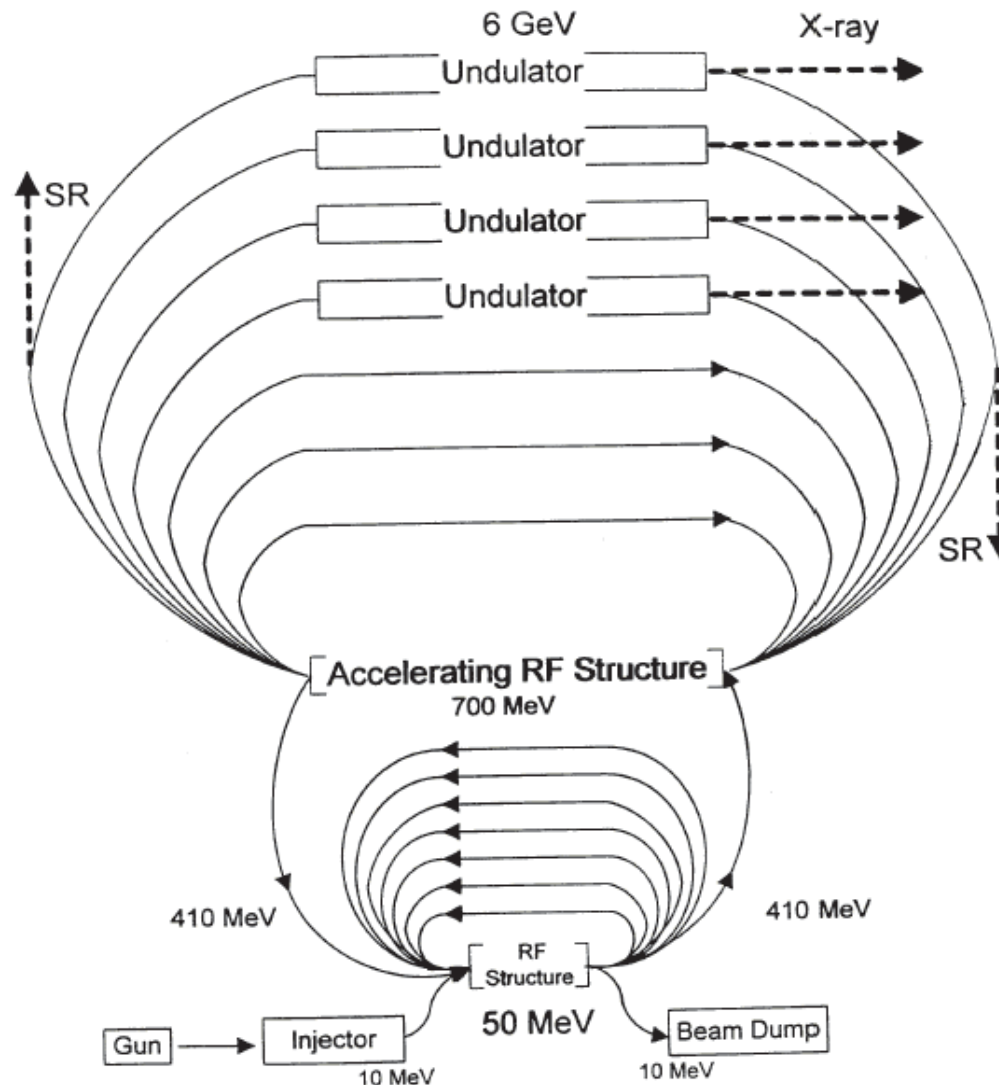


2002/5 Science Review を通過

<http://www.4gls.ac.uk/>

世界の現状 --- 提案, 計画中の E R L 装置

BINP



Scheme of MARS.

ERL 放射光源としては
最初に提案された装置。

BINP にて 100MeV 装置開発中

D.A.Kayran et al., APAC-1998.
G.Kulipanov et al., SRI-2001.

ERLの開発課題 ---- 低エミッタンス電子銃

要求

$\gamma \epsilon = 1 \mu\text{m} @ 77\text{pC}$

平均電流 = 10 ~ 100mA

実績

$\gamma \epsilon = 1.4 \mu\text{m} @ 100\text{pC}$

DC gun (TJNAF)

5mA (TJNAF / IR-demo)

$\gamma \epsilon = 0.8 \mu\text{m} @ 500\text{pC}$

RF gun (BNL)

課題

エミッタンス保存の検証、カソード寿命 (DC gun)

CW運転可能な熱設計、ドライブレザー (RF gun)

エミッタンスの下限は ?

関連研究

X FEL、リニアコライダー (偏極電子源)

ERLの開発課題 ---- 大電流加速可能な超伝導空洞

	加速電界	HOM 取り出し	入力カップラー (入射器)
要求	15 ~ 20MV/m	160W / m	100kW
実績	TESLA 25MV/m	2W / m	CEBAF 6kW

HOM 不安定性の解析と検証 (TJNAF) ----- 数百 mA まで OK

課題 HOM 取り出しの機構 ハイパワー・カップラーの開発

関連研究 ハイパワー・カップラー・ワークショップ (HPC-2002, Oct.31, 2002)
 TESLA, CEBAF upgrade, SNS など、超伝導リニアックプロジェクト

ERLの開発課題 ---- 安定性の確保

ERLの周回軌道は"平衡軌道"ではない。



フィードバック制御が必要

軌道（光源位置）の安定性、タイミングジッターは大丈夫？

CEBAF（超伝導リニアック）の軌道位置測定

長時間の安定度 $< 10 \mu\text{m}$ （測定限界以下）

JAERI-FEL（超伝導リニアック）のタイミングジッター

FEL detuning curve から換算 $< 100\text{fs}$ （RF=500MHz、5ps バンチ）

E R L 放射光源の赤外利用

蓄積リング光源と同様の利用が可能であり、さらに、
以下の点から蓄積リングを超える特性が期待できる

ラティスの対称性は必須でない

赤外利用に特化した偏向部の設置

曲率半径、磁石ギャップを自由に設定

柔軟なパルス構造が可能

0.1ps ~ 10ps シングルショット ~ 1.3GHz

pump & probe 実験に有利

非Gaussianバンチ

コヒーレント成分の強調が可能？

cf. G.L.Carr et al., NIM A463, 387 (2001).

まとめ

ERL放射光源への期待

蓄積リングの限界を超える性能

世界中で多数の光源が提案

利用研究の展望

ERL放射光源の開発

問題点の抽出と解決への道筋

ほぼ完了

R&D 予算の獲得、既存 ERL の活用

進行中

新しいアイデアの創出、他の加速器プロジェクトとの連携

赤外光源としての利用

蓄積リングにないユニークな特徴を有し、新たな展開が期待できる