

フォトカソードRF/DC電子銃と周辺技術の現状

～ 加速器とレーザー科学の融合領域における将来計画について ～

全日本フォトカソード電子銃用光源レーザー開発共同チーム
代表： 富沢 宏光 (財)高輝度光科学研究センター 加速器部門

0. フォトカソード電子銃と加速器将来計画
- Ⅰ. フォトカソード
- Ⅱ. レーザ光源
- Ⅲ. 同期
- Ⅳ. 加速管の選択

0. フォトカソード電子銃と加速器将来計画

熱カソードに代わり、高ピーク電流で極低エミッタンスのビーム生成の可能性を持っている。

以下に挙げる[高輝度・高品質光源のための加速器将来計画](#)を中心として高品質レーザー光源は必須：

- リニアコライダー
- X-FEL (SASE)
- ERL ([3つのモード](#)：高ピーク電流、超短パルス、極低エミッタンス)
- レーザー加速
- ps, fsポンププローブ
- 逆コンプトン散乱

世界中で、光電面開発、励起用レーザー、それに適したフォトカソード電子銃が開発または検討されている

1. フォトカソード

低繰返しと安定度なら金属カソード
高繰返しとハイチャージなら半導体

フォトカソード開発における 欧米のプロジェクトの進展状況

ヨーロッパ:

CERNを中心としたPHIN
(PHoto INjector) 計画
URL <http://www.infn.it/phin/>

X-FEL, ERL, リニアコライダー用
一桁高いビーム電流、一桁低い
ミックスを狙う。

- ・ Cs₂Te QE>3%以上40日以上
- ・ Cs₂Te 超伝導RF-Gun動作
- ・ Sb系の検討

2004~2007年8億円
86人(延べ人数)

アメリカ:

米国7つの国研による開発計画
(準備中)

X-FEL, ERL, リニアコライダー用
0.1mm・mradの超低ミックスを狙う。
→光電子放射の理論的検討

- ・ Sb系の検討

11億円/年 5~10年を予定

日本の戦略は？

フォトカソード開発&表面分析フローチャート



A-1. 金属カソードの仕事関数について

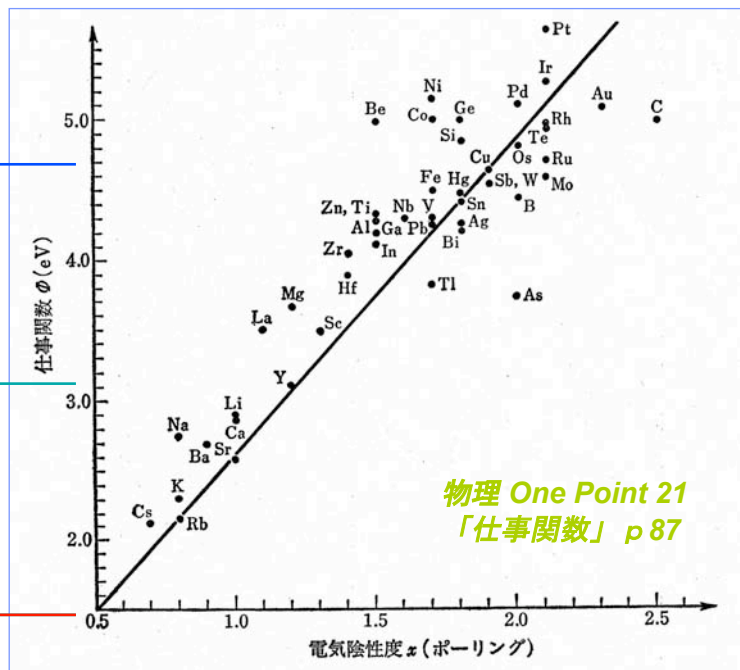
~ 仕事関数は電気陰性度と比例関係 ~

Cu: 4.48, 4.69, 4.94
fcc (110) (100) (111)
仕事関数は面方位による

263 nm

400 nm

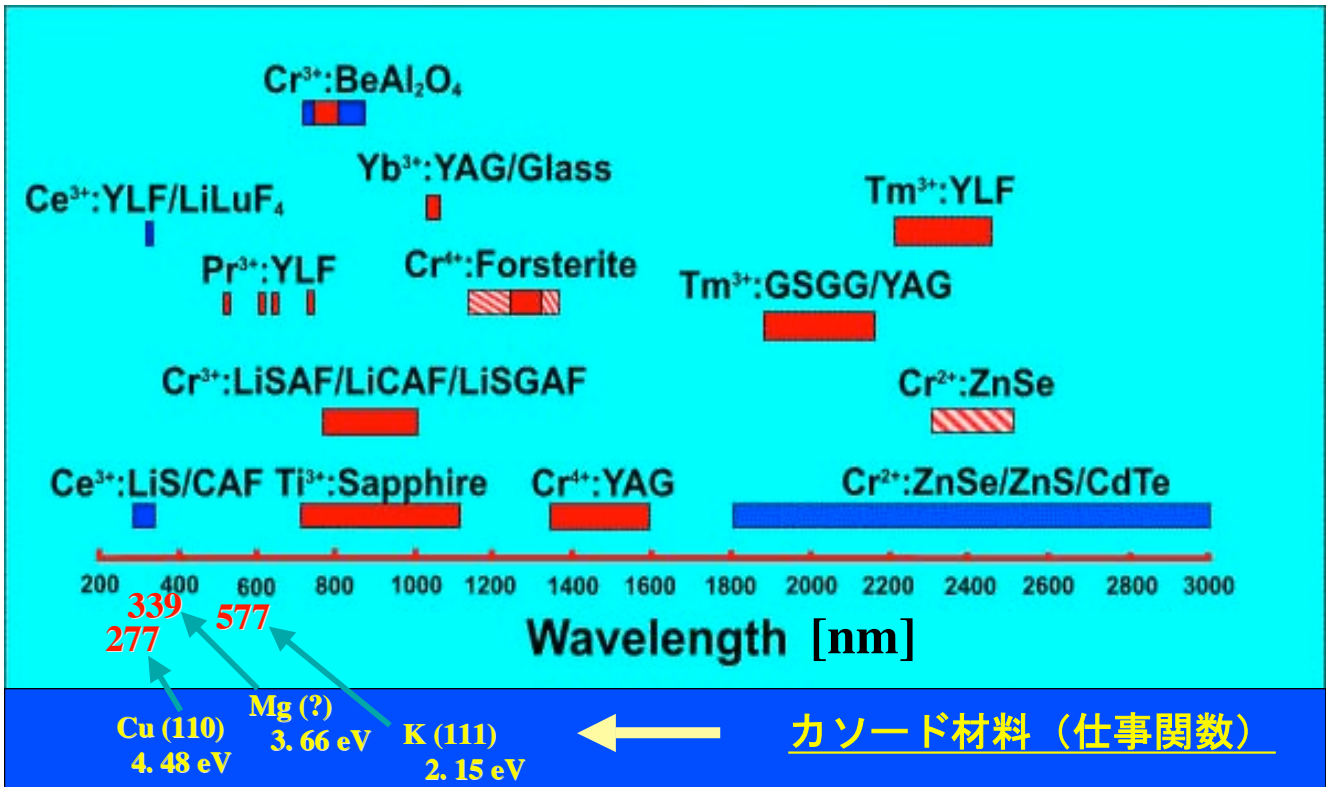
800 nm



$$\text{仕事関数} = 2.27 \times (\text{ポーリングの電気陰性度}) + 0.34 \text{ eV}$$

A-2. 金属カソードの仕事関数とレーザ波長域の比較

～ 各レーザ結晶の基本波のみを示すが、これらの高調波もまた有力な光源となる。
BBO結晶で倍波変換の場合は205 nm、和混合の場合は186 nmまで可能。～



A-3. 表面処理による金属カソードのQEの相違

～ 量子効率 は表面トリートメントによって数桁も変わる～

量子効率：

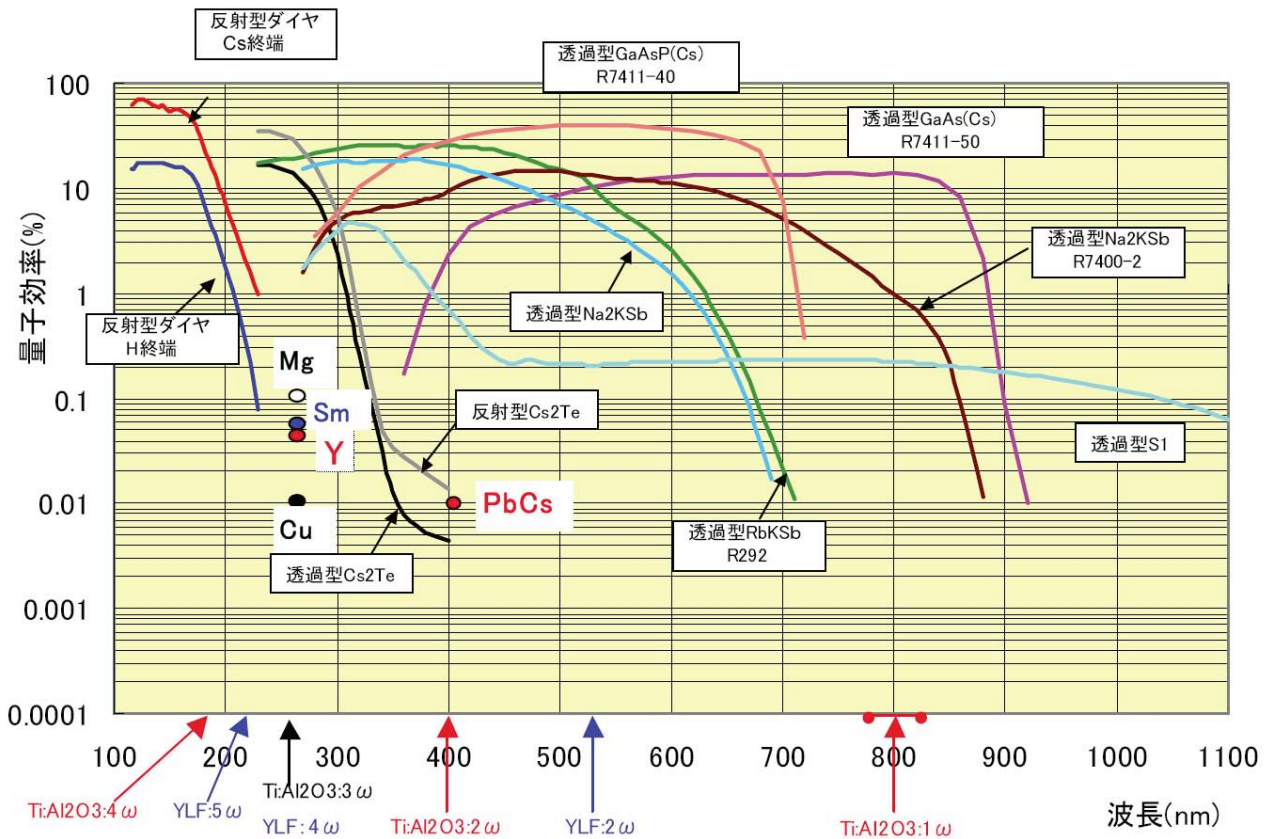
Table 3
Quantum efficiency of different cathodes [%]

λ_L [nm]:	193	213	266	308	355	ref.
Metallic cathodes						
Al		8.4×10^{-2}	3.2×10^{-3}		3.4×10^{-5}	[38]
Ag ^a			2.0×10^{-3}			[40]
Au		4.0×10^{-2}	1.3×10^{-3}			[38]
Au ^a			1.7×10^{-3}			[40]
Cu		2.0×10^{-2}	2.2×10^{-4}	1.6×10^{-5}	8.0×10^{-7}	[38]
Cu ^b		4.2×10^{-2}	1.4×10^{-2}			[38]
Cu ^a			6.2×10^{-2}			[40]
Mg ^a			2.5×10^{-3}			[40]
Ni ^a			1.2×10^{-3}			[40]
Pd ^a			1.6×10^{-4}			[38]
St. steel		9.0×10^{-3}				[38]
Sm				1.6×10^{-4}		[38]
Sm ^a			7.2×10^{-2}			[40]
Ta ^a			1.0×10^{-3}			[40]
Tb ^a			2.3×10^{-2}			[40]
Y			2.7×10^{-4}	1.1×10^{-4}		[38]
Y ^b			1.8×10^{-2}			[38]
Y ^a			5.0×10^{-2}			[40]
WK ⁺ ^b				1.2×10^{-3}		[38]
WBaO			3.5×10^{-2}	1.4×10^{-2}	2.3×10^{-3}	[39]
Zn ^a			1.4×10^{-3}			[40]
Zr ^a			1.0×10^{-3}			[40]
λ_L [nm]:	193	213	266	355	532	ref.
Alkali cathodes						
Cs ₂ Sb		3.5	2	1.8	0.38	[38]
CsK ₂ Sb					6	[11]
K ₂ Sb		1.4	1.6	0.76	2.3×10^{-2}	[38]
Na ₂ KSb		7.7	6.1	3.5	2.0×10^{-2}	[38]
CsI	9.6	6.8	0.71	1.9×10^{-4}		[38]
CsI+Ge		0.73	0.13	2.0×10^{-2}		[38]
Cs ₂ Te		6.0	5.7	2.0×10^{-2}		[38]

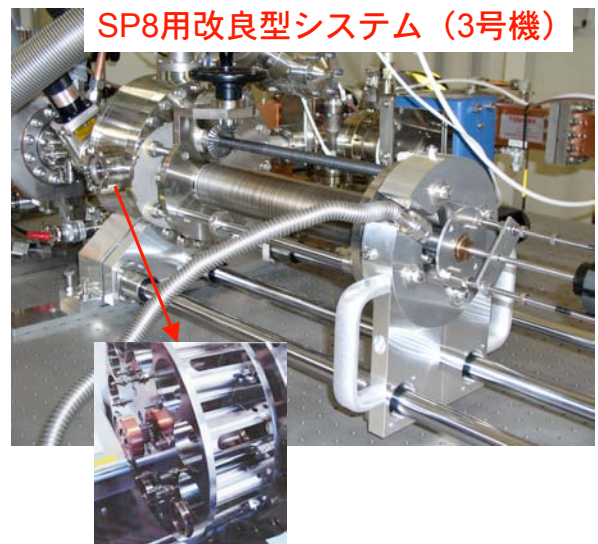
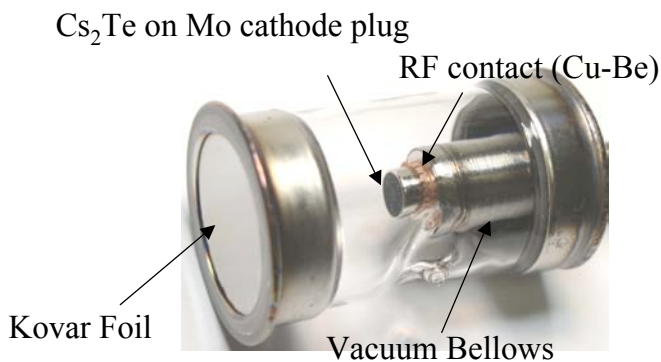
^a After laser activation at 2–5 mJ/cm² during 5–10 min.
^b Ionised controlled etching (ICE) cleaning process under vacuum.

C. Travier et al.
Nucl. Instr. And
Meth. In Phys. Res.
A340 (1994) 26-39

B-1. 加速器用半導体カソード候補のQE曲線



B-2-1. カートリッジ管及び交換システム



カートリッジ管収納用
リポルバー (12本内蔵可能)

- **カソード製膜用装置が不要 (産業用途)**
 - ・ ユーザーが製膜技術を習得する必要がない
 - ・ カソード交換時間が短い (5分程度)
 - ・ 安定なQEが得られる
 - ・ ロードロック方式に比べ、小型・コストが安い
- **様々なカソードの研究に適している (研究用途)**
 - ・ 光電面種類
 - ・ 各方式 (反射型・透過型)

B-2-2. 反射型カソードに対する透過型の有用性

反射型と透過型によりカソードへのレーザー照射の方式が異なる。そのため、斜め入射と直入射の選択に伴う光学系の作動距離の限界に関する問題と一部重なる。

長所：

- ・ 原理的に低エミッタンス化に有利（空間電荷効果が支配的でない時）
- ・ ファイバーが使用可能
 - 小型化・アライメント簡素化に有利
 - 低エミッタンス化で有利 3次元レーザーパルス形状整形可能
（光ファイバーバンドルで整形した場合）

短所：

- 技術的課題が多い
 - ・ 製造工程がまだ十分に確立していない
（透過型ダイヤ、透過型Cs₂Te等）
 - ・ 高電界印加にはメタルマスク構造が必要
（エミッタンス劣化、メタルマスクの透過率のためQE減少）
 - ・ 透明基板が必要（帯電による光電面薄膜のダメージの問題）

B-3-1. Cs₂Teカソードについて

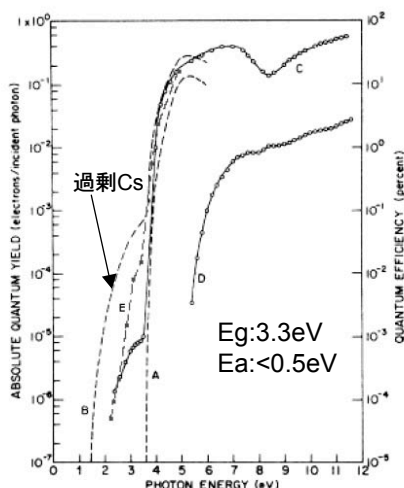


Figure 3: Spectral distribution of the quantum efficiency of Cs₂Te cathodes. Curve A and B are QE curves respectively without and with excess Cs (Taft and Apker). Curve C Curve D is the QE of evaporated Te before reaction with Cs. Curve E is data from Los Alamos [44].

Laboratory	Te	Cs deposition stopped	T sub (°C)	P max (Torr)	QE	λ	Operational lifetime
SEL	120 nm	50% of maximum QE	150	10 ⁻⁷	~12-17%	270-250	
INF	10 nm (1nm/min)	70-80 min (max QE) (1nm/min)	120	10 ⁻⁹	8-13%	254	~ months
Fermi	10 nm (1nm/min)	60-120 min (1nm/min)	120	1-4·10 ⁻⁹	12%	254	~ months
LANL	10-30 nm	80-90% of max QE	100-110	few 10 ⁻⁹	15-18%	251	> 100 h
CERN	10 nm	15 nm (max QE) (80 min)	110		4-7%; 16%; 12%; 4-8%; 16-21%	262	1-2 weeks 11 h; few minutes
UT-LF	25-30 min	2-15 min (max QE)	120	low 10 ⁻⁸		254	

Table 1: Preparation conditions of several laboratories

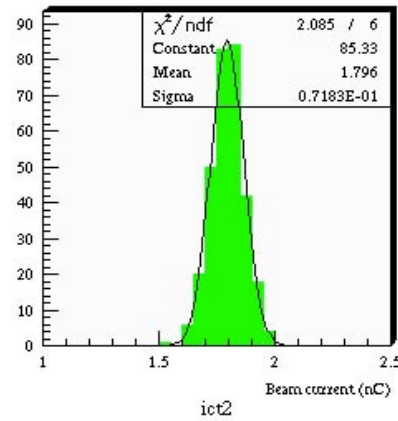
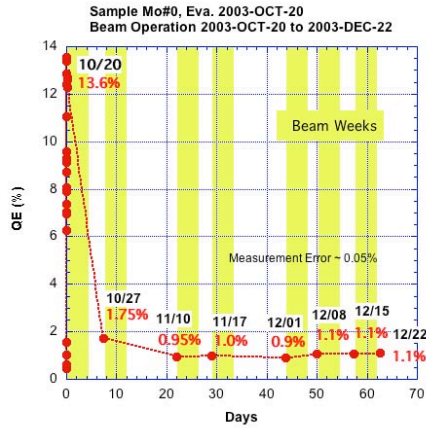
Cesium-Telluride and Magnesium for high quality photocathodes
Preparation and diagnostics R.A.Loch(Univ of Twente) Master Thesis June2005

Cs₂Teカソード

- ① 励起波長：266nm(YAG:4ω)、263nm(Ti:Al₂O₃:3ω)
- ② QE：活性化直後は十数%。超高真空(10⁻⁷Pa台)でQE1%以上の寿命が1ヶ月以上が得られているところもある（これは製膜工程に依存するようで、上記データではCs蒸着速度が小さく、長い時間をかけて活性化の方がQEは低くなるが開放系寿命が長いと報告）
- ③ 感度劣化の原因は表面上に付着しているCsの酸化の可能性がある。特にO₂,CO₂の残留ガス分圧により感度が劣化する。真空度は全圧で10⁻⁷Pa以上が必要。

B-3-2. Cs₂Teカソード (ロードロック方式) + RF-GUNについて (KEK ATF)

QEの
時間変化



電荷密度の
時間変動

励起波長:266nm

QE: 蒸着直後10%超、急激に減少するが、以後1%程度を月二週間の運転で二ヶ月以上維持。

連続運転時間: 二ヶ月までの実績。安定後はQEの時間による減少はみられず。

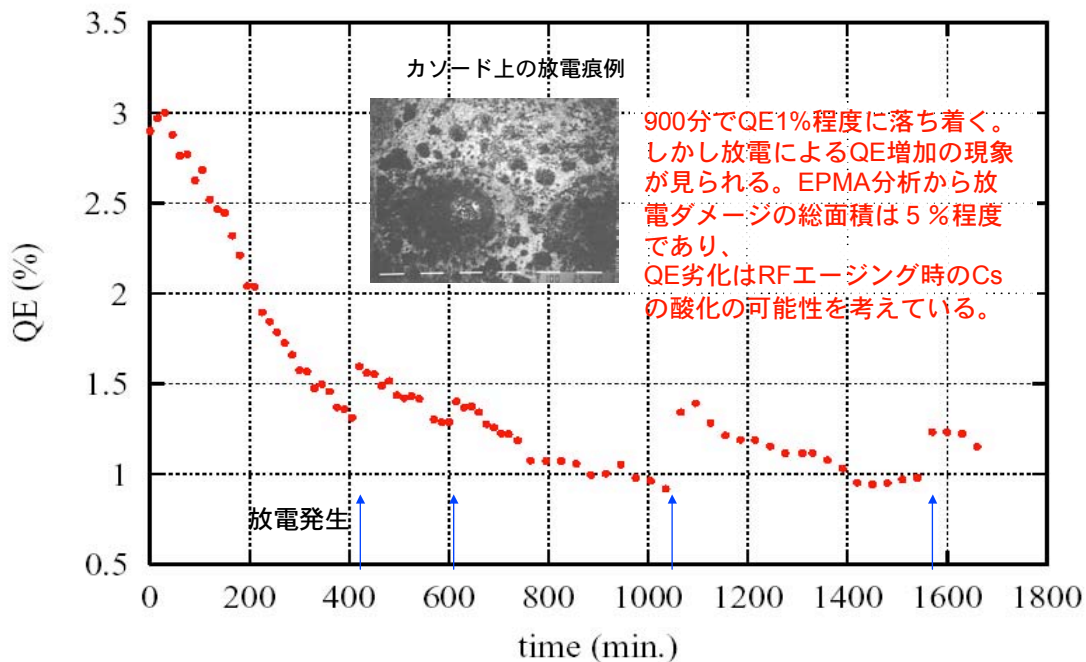
電荷密度: $0.1-2.0 \times 10^{10}$ electrons/bunch

パルスあたりバンチ数: 1-20

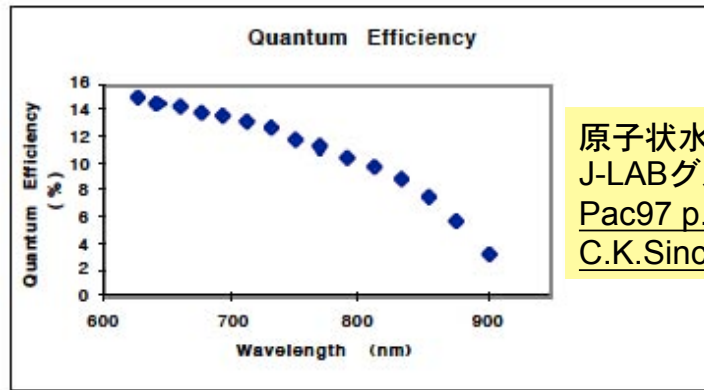
パルス毎の電荷密度変動: 3~5%

B-3-3. Cs₂Teカソード (カートリッジ方式) + RF-GUNについて (SPring-8)

(初期QE8.3%、真空度 1.6×10^{-7} Pa、加速電界90MV/m、266nm励起 エネルギー120nJ)



B-4-1. GaAsカソードについて



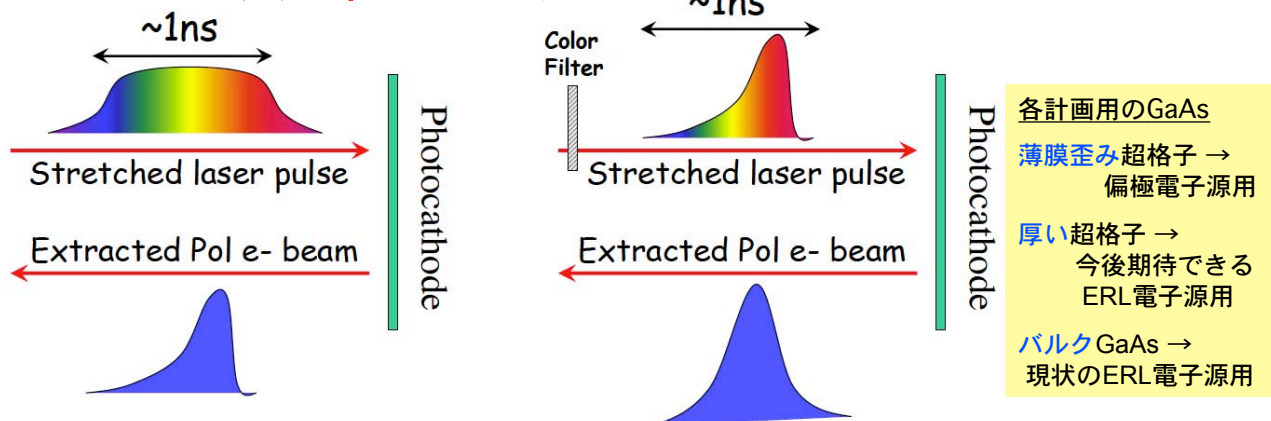
原子状水素を用いた清浄化
J-LABグループのデータ
Pac97 p. 2894-2866
C.K.Sinclair et.al.

Figure 2. Quantum Efficiency versus wavelength for an NEA GaAs photocathode prepared after atomic hydrogen cleaning.

NEA GaAsカソード（以下、明記しない場合はBulk-GaAs。）：

- ① 時間応答: 10~20ps (レーザーパルス幅はこの応答速度より短くてもいい。応答によるパルス形状の歪み補正を必要とする場合でもDC-GUNでは問題なし。)
- ② 励起波長: Bulk-GaAsのバンドギャップは860nm付近。カソードから引出された電子のエネルギー分布を抑えるにはバンドギャップ近傍の波長の方が有利。
- ③ QE: 波長780nm、活性化直後でのQE5%。10mA超の大電流モードでは極高真空(-10乗Pa台)でも10時間程度で半減。
- ④ 連続運転時間: QE1%まで降下する時間の間連続運転が可能とする。
- ⑤ GaAs/GaAsP超格子の励起波長: 780nm (偏極用 (Pol>80%)、QE : 0.5~1%)

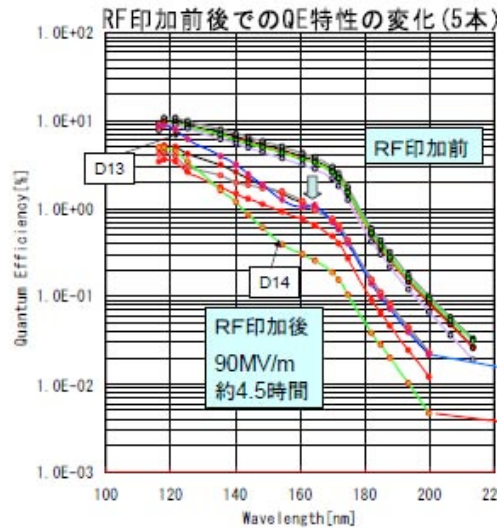
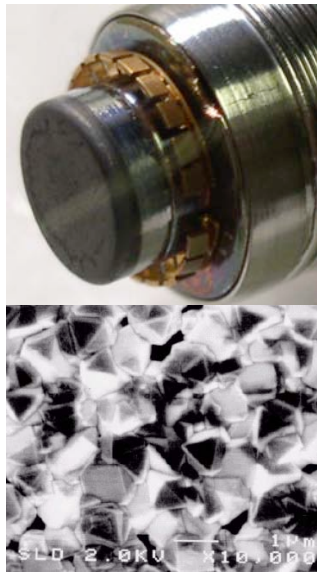
B-4-2. GaAsカソード+DC-GUNについて



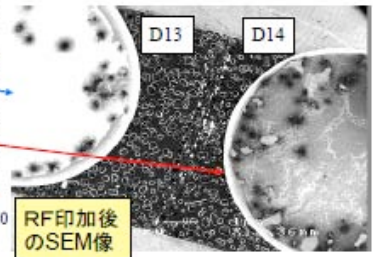
GaAs/GaAsP超格子カソード+DC-GUN：

- ① 加速電圧: 200kV (180-250 kV)
- ② バンチ長: 0.7ns~2.0ns (後段のSHBでCaptureする効率を高めるため、0.7 nsを候補とする。)
- ③ ビーム径(Photocathode上) : $\phi 16\sim 18$ mm
- ④ 繰返し : ~ 3 MHz (337 ns間隔)
- ⑤ 波長 : 780 nm \pm 20 nm (単色が望ましい)
- ⑥ Intensity Jitter (rms) : 2%以下
- ⑦ Photocathode QE : 0.1% (現実的に、余裕をもって設計すると) ← 薄膜であるため量子効率が小さい
- ⑧ Bunch charge: ~ 6 nC (3.2 nC以上 ; バンチャーでの損失の考慮による)
→ laser bunch energy: $> 10 \mu\text{J}/\text{bunch}$ (6.4 nC, 780 nm, QE 0.1%) lossを含めて $> 20 \mu\text{J}/\text{bunch}$
- ⑨ 規格化エミッタンス: rms $\sim 10\text{--}15$ pi.mm.mrad
- ⑩ GaAsの応答性: 5 ps幅のパルス励起でビームは100 ps程度のテイルを引く。5 ps以下は意味なし。
※ 応答性は膜厚による。GaAs/GaAsP歪み超格子などの偏極電子源では、電子取り出し層が100-200nm程度の薄膜であるため、電子取り出し層が数 μm であるBulk-GaAsよりもテイル効果は小さいと考えられる。尚、ERL用の超格子は、これまでの偏極電子源カソードよりも厚い、数 μm の超格子がよい。

B-5. ダイヤモンドカソードについて (浜ホト/SPring-8)



高電界印加中に水素終端(推測)が放電でダメージを受け、QEが一桁前後劣化することが分かった。



RF印加後のSEM像

ダイヤモンドカソード:

- ① 時間応答: 未知数 (まだ10ps程度の実績がない)
- ② 励起波長: 理想的には120nm前後 現状では197nm (Ti:Al₂O₃ 4 ω) が現実的
- ③ QE: 反射型Cs終端70%、H終端17%@120nm 透過型はまだ開発途上
- ④ 高電界に対する耐性: 放電による終端の破壊の問題がある (上記データ参照)
- ⑤ ビーム質: 未知数 (多結晶ダイヤの場合、表面の凹凸がエミッタンスに影響する可能性がある。この点では単結晶の方が有利か)

各々のカソードの性能 (1)

		$E_a + E_g$ (eV)	(nm)	Advantages	Disadvantages	Ref
Alkali-halide	CsI	6.4	209	Air transportable	209nm is impractical satellite bunches and saturation in RF gun	[1]
	CsI-Ge	5.0	248			
Alkali-antimonide	Cs ₃ Sb	2.0	620	<u>Work in visible range</u>	<u>Very sensitive to contamination, short lifetime</u>	[1]
	K ₃ Sb	2.3	539			[1]
	Na ₂ K ₃ Sb	2.0	620			[1]
	K ₂ CsSb					[2]
Alkali-telluride	Cs ₂ Te	3.5	354	a reliable photocathode material		[1]
				<u>Good QE and life time</u> . Stand high field up to 120MV/m	Need UHV	[4]
				A Resistance to laser damage: at least 6 W/cm ² @ 262 nm		[7]
	Rb ₂ Te	4.1	302	Rejuvenation partially The dark current@20MV/m is negligible	Need uv laser	[1][13] [2]
	RbCsTe	-		Rejuvenated partly, by heating and ion bombardment etching		[1][6]
K ₂ Te	-					
Negative Electron Affinity	GaAs (Cs)			<u>polarized electron source</u>	response time is as long as ns	
	(111) Diamond		<210nm	Long life time and fast response	A poor response because of NEA	[2]

Table1: Properties of semi-conductor photocathodes.

各々のカソードの性能（2）

Material	sub	QE @ λ	Life time	Field (MV/m)	working vacuum (mbar)	Dark current	average current density	Response time	damage by Laser	Laboratory	Ref.	
CsI-Ge		0.73%@213nm 0.13%@266nm	> One year	70						CERN	[1]	
		2%@209nm	> 150 h					(>ps)			[2]	
Cs ₃ Sb		2.0%@266nm 0.38%@532nm	very short (from 1 to few hours)							CERN	[1]	
		4%@527nm	<4 hours	>20	10 ⁻¹⁰ ~10 ⁻⁹			~ps			[2]	
K ₃ Sb		1.6%@266nm 0.023%@532nm								CERN	[1]	
		1~3%@262nm	robust								[6]	
K ₂ CsSb		8%@527nm	<4 hours	>20	10 ⁻¹⁰ ~10 ⁻⁹			~ps			[2]	
		1.2%@541nm	daily							Netherland FEL	[19]	
Cs ₂ Te		13%@266nm									[1]	
	Cu,Au	0.2-0.5 %		22		Very small				ELBE		
		16%@262nm	<u>~450 hrs</u> <u>QE>1.5%</u>	100							CTF2-2002	[2]
	Cu-Au	2~8%@262nm	Few week QE>1.5%	120	1~5×10 ⁻⁹						CERN-PHIN	[4]
	Cu		>300 hrs	100	7×10 ⁻⁹	Several mA						[5]
		10% at 262nm	drops during the first 50 hours with a ~40 hours, followed by a slower decrease with ~350 hours.	127	10 ⁻⁹			<2ps		CERN	[6]	

Jochen Teichert, CARE/JRA-PHIN 2004

各々のカソードの性能（3）

		> 1.5 %	QE > 1.5 % during 460 h @ 750 μA		1.4x10 ⁻⁹		21 mA/cm ²		6 W/cm ² @ 262 nm	CERN	[7]
	Mo	5.6%@262nm		35~40	10 ⁻¹⁰	16μA				DESY	[10] [21]
		0.2-0.5 %		22		Very small				ELBE	
		8%@263nm	<u>More than one month QE>1%</u>		5×10 ⁻⁸					Fermi lab	[11]
	Mo	16~18% @ 251nm 8~12% @ 263nm	over 1% for 100h	20~25	10 ⁻¹⁰	<0.4mA/c m ²				LANL	[13]
		13%@266nm	>100 hrs	>20	10 ⁻¹⁰ ~10 ⁻⁹			<3ps			[2]
KCsTe	Same as Cs ₂ Te									CERN	[21]
GaAs (Cs)		3~5%@ HeNe		30		Larger than PEA cathodes				BINP, Russia	[9]
			20 hours of CW beam with an average current of 3.1mA, ~58 hrs	3.9 DC gun							[12]
		1.5~6%@750nm	short		10 ⁻¹¹			<ns			[2]
Material		QE @ λ	Life time	Field (MV/m)	working vacuum (mbar)	Dark current	average current density	Response time	damage by Laser	Laboratory	Ref.

Jochen Teichert, CARE/JRA-PHIN 2004

各々のカソードの性能（４）

	No.	Work function (eV)	l (nm)	Advantages	Disadvantages	
Nb		4.0	310	Nb cavity itself, direct and simple, and no contamination, robust cathode	QE is too low because of their high reflectivity and the shallow escape depth: even with special treatment (etching, laser conditioning)	[20]
Ca	20	2.9	427	<u>The most robust cathode, Air transportable</u>		[8]
Ba	56	2.5	496			[2]
Y	39	2.9	427			[2]
Sm	62	2.7	459			[2]
Mg	12	3.66	339			[2]
Cu	29	4.3	288			[2]

Table 2: Properties of metallic photocathodes.

	QE @ λ	Advantages	Disadvantages	
Trioxide cathode	0.1% @ 355nm	Air transportable Can be rejuvenated by heating to 700°C, the work function of Scandate dispenser is on the order of 2 eV	Long response time. Need slight heating to keep the QE from degrading too quickly	[2][21]
B-type thermionic dispenser	3.5×10^{-4} @ 266nm		Need slight heating to keep the QE from degrading too quickly,	
LaB ₆	0.1% @ 355nm ~ one day			

Table 3: Properties of thermionic electron emitters.

Jochen Teichert, CARE/JRA-PHIN 2004

各々のカソードの性能（５）

Cu	4x10 ⁻⁵ @248nm	Almost indefinite	75					ARGONNE	[8]
	1.4x10 ⁻⁴ @266nm		>10 ⁰	10 ⁻⁷		<ps			[2]
Mg	1.3x10 ⁻⁴ @248nm	>5000hours	75					BNL	[8]
	6x10 ⁻⁴ @266nm			10 ⁻⁷		<ps			[2]
	0.2 ~ 0.3% @266nm.		100	10 ⁻⁹	thermal emittance is 0.4 mm-mrad/mm			BNL	[22]
	1.3x10 ⁻⁴ @265nm				10 ⁻¹⁰			Univ. of Tokyo, Japan	[23]
Y	1x10 ⁻⁵ @248nm	long	75						[8]
	5x10 ⁻⁴ @266nm		~10 ⁰	<10 ⁻⁷		<ps			[2]
Ca	4x10 ⁻⁵ @248nm		75						[8]
Sm	7x10 ⁻⁴ @266nm	long	~10 ⁰	<10 ⁻⁷			<ps		[2]
Ba	0.1% @ 337nm			<10 ⁻⁷			<ps		[2]
Nb	10 ⁻⁴ @266nm							0.3 mJ/mm ² for 15ps, 266nm 3.5 mJ/mm ² for 20ns, 248nm	BNL [20]

Jochen Teichert, CARE/JRA-PHIN 2004

文献 (1)

1. http://ucq.home.cern.ch/ucq/cathodes_alcalines.htm#telluride
2. S.H. Kong, J.Kinross-Wright, D.C. Nguyen, R.L. Sheffield, Photocathode for free electron lasers, NIM A 358 (1995) 272
3. Eric Chevallay, Guy Suberluq, Heiko Trautner, Production of a high average current electron beam with Cs-Te photocathodes, CTF3 note 020 (tech.)
4. CERN Lab activities related to PHIN. <http://ucq.home.cern.ch/ucq/EU-PI/Presentation.pdf>
5. Photocathode performance – design requirements
http://ucq.home.cern.ch/ucq/Coferences/CTF3_col-meet-2003/CTF3_col_meet_Photoocat.pdf
6. E. Chevallay, J. Durand, S. Hutchins, G. Suberluq, PHOTO-CATHODES FOR THE CERN CLIC TEST FACILITY
7. Cathodes for CTF3/CLIC, From 1st Photoinjector Workshop in CERN
8. P.Schoessow, E.Chojnacki, G.Cox, et al., THE ARGONNE WAKEFIELD ACCELERATOR HIGH CURRENT PHOTOCATHODE GUN AND DRIVE LINAC, <http://epaper.kek.jp/p95/ARTICLES/WPB/WPB11.PDF>
9. A.V.Aleksandrov, E.S.Konstantinov, P.V.Logatchov, et al., HIGH POWER TEST OF GaAs PHOTOCATHODE IN RF GUN, <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/e98/PAPERS/TUP02J.PDF>
10. D. Sertore, S. Schreiber, K. Floettmann, et al. First operation of cesium telluride photocathodes in the TTF injector RF gun, NIM A 445 (2000) 422~426
11. A. Fry, E. Hahn, W. Hartung, y M. Kuchnir, EXPERIENCE AT FERMILAB WITH HIGH QUANTUM EFFICIENCY PHOTO-CATHODES FOR RF ELECTRON GUNS
12. T. Siggins, C. Sinclair, D. Bullard, et al., Performance of the Photocathode Gun for the TJNAF FEL, <http://www.fel.duke.edu/fel2000/program/book/node64.html>
13. S.H. Kong, D.C. Nguyen, Fabrication and characterization of cesium telluride photocathodes: A promising electron source for the Los Alamos Advanced FEL, NIM A 358 (1995) 276.
S.H. Kong, Performance of Cesium telluride photocathodes as an electron source for the Los Alamos Advanced FEL, NIM A 358 (1995) 284S
14. http://ucq.home.cern.ch/ucq/ctf2_cath_.htm
15. A. di Bona, S. Valeri, P. Michelato, FORMATION OF THE Cs₂Te PHOTOCATHODE: AUGER AND PHOTOEMISSION SPECTROSCOPY STUDY, A. Di Bona, F. Sabary, S. Valeri, P. Michelato, D. Sertore, G. Suberluq, Auger and x-ray photoemission spectroscopy study on Cs₂Te photocathodes", J. Appl. Phys., Vol. 80, No.5, (1996), 3024-3030

文献 (2)

16. E. Chevallay, S. Hutchins, P. Legros, G. Suberluq, H. Trautner, Production And Studies Of Photocathodes For High Intensity Electron Beams, CLIC Note 449, CERN/PS 2000-046 (PP)
17. J. Gubeli, R. Evans, A. Grippo, et al., Jefferson Lab IR demo FEL photocathode quantum efficiency scanner, NIM A 475 (2001) 554~558
18. K. Zhao et al., Researches on new photocathode for RF electron gun, NIM A 445 (2000) 394~398
19. Bart M. van Oerle, Gerard J, Ernst, On the use of CsK₂Sb photocathodes in RF linacs, NIM A 358(1995)287-290
20. Qiang Zhao, Triveni Srinivasan-Rao et al., TESTS OF NIOBIUM CATHODE FOR THE SUPERCONDUCTING RADIO FREQUENCY GUN, PAC2003
21. D. W. Feldman, P. G. O. Shea, M. Virgo, IREAP, et al., DEVELOPMENT OF DISPENSER PHOTOCATHODES FOR RF PHOTOINJECTORS, PAC 2003
22. X.J. Wang, M. Babzien, R. Malone and Z. Wu, Mg CATHODE AND ITS THERMAL EMITTANCE, LINAC 2002
23. H. Iijima, M. Uesaka, T. Ueda, et al., HIGH CHARGE MG PHOTOCATHODE RF GUN IN S-BAND LINAC AT UNIVERSITY OF TOKYO, EPAC 2002
24. Evgeny Podkletnov, Giovanni Modanese, Investigation of high voltage discharges in low pressure gases through large ceramic superconducting electrodes, <http://arxiv.org/abs/physics/0209051>, J. Low Temp. Phys. 132 (2003) 239-259

フォトカソードの性能 まとめ

高QEで6ヶ月以上使用できるのは、Cs₂Te (QE1%)
長期間安定駆動には金属カソード、特にCu (高QE化
には表面処理等必要) 両者ともRF電子銃で使用可。

Cs₂TeとCuは光源に紫外光266nm付近を要求。
200nm以下ではQEが高いが、レーザー光発振、
輸送が困難 (技術的開発要素が多い)。

GaAsは特に偏極電子生成に向いている。界面の状
態に非常に敏感ゆえに、 10^{-10} Paといった非常に高い
真空度が求められる。そのためRF電子銃ではなく、
DC電子銃で高真空を維持して使用する案が有力。

高QEカソードの場合は、その表面・界面の状態に起因
したQE安定度に問題がある。しかし、100Hz以下
のシングルバンチ運転であれば、長期間安定な金属カ
ソードがあるのでQE安定度に関する問題なし。

II. レーザ光源

長期安定度と

低エミッタンス実現のためのビーム整形

フォトカソード用レーザーの現状

光源となるレーザーパルスが長期間安定で高品質でなければ、カソード開発、加速器試験や応用実験が進まない。

- レーザの本質的な安定化や3Dパルス形状最適化に関する研究は、レーザー業界でも最先端であり高度な技術開発が必須。一つの研究機関では人材（質×数）と予算の面からも困難である。

↓ 2000年位から安定化技術は確立。整形技術は2005年にほぼ確立。

- レーザ光源の高度化技術の共通部分は協力して開発していく。

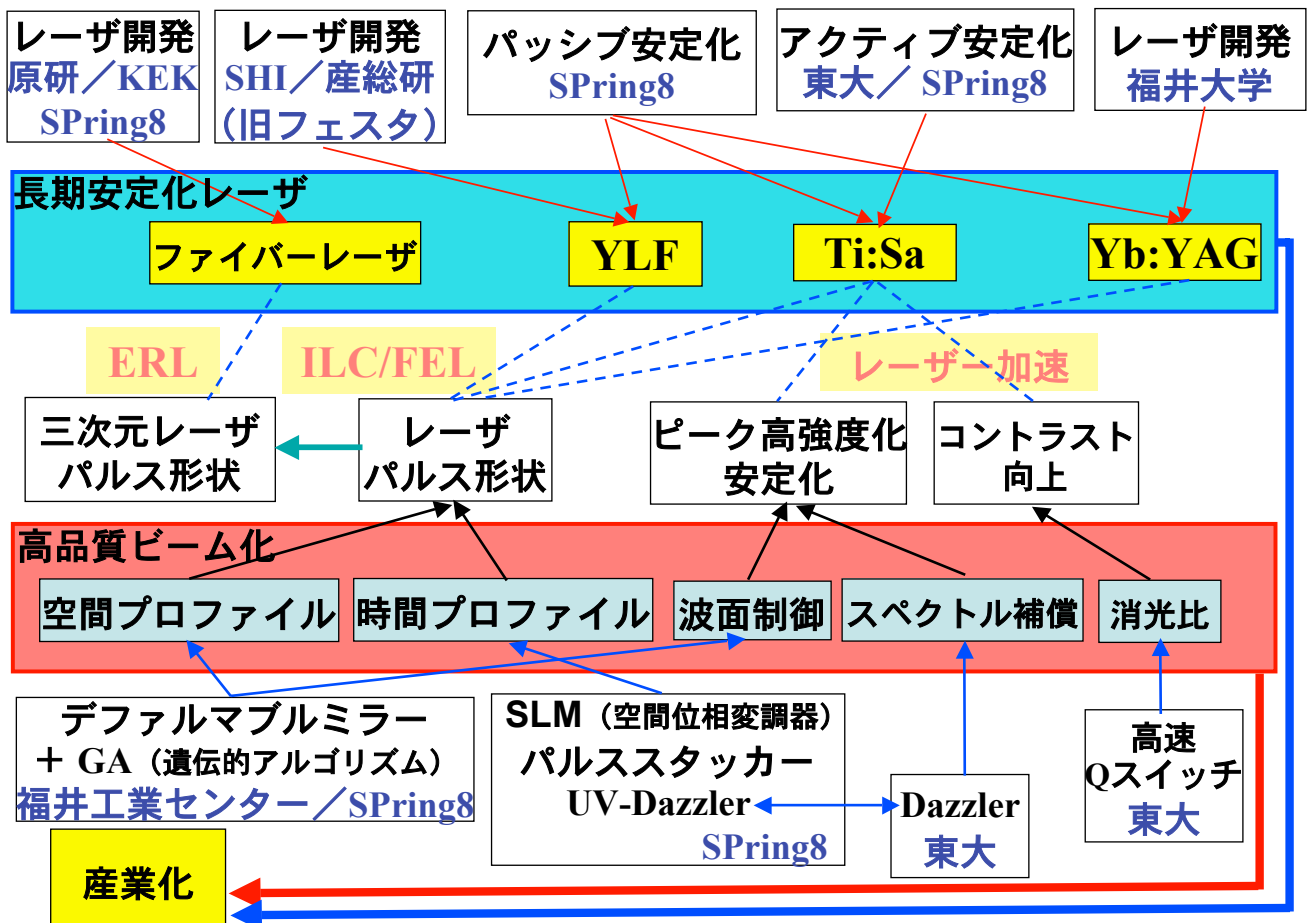
（科研費での共同申請・住み分けなど）

（欧米ではすでに行われている。）

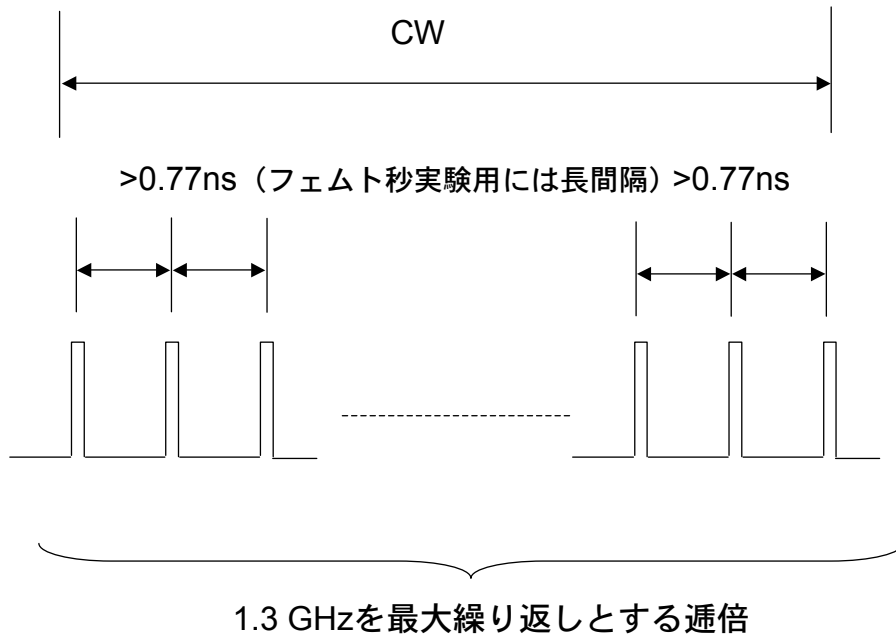
↓

- フォトカソードRF電子銃+ハイパワーレーザーの業界の活性化
レーザーパルス整形技術は加工業界とも関連し、裾野の広い産業に貢献。

レーザーコンポーネント開発フローチャート



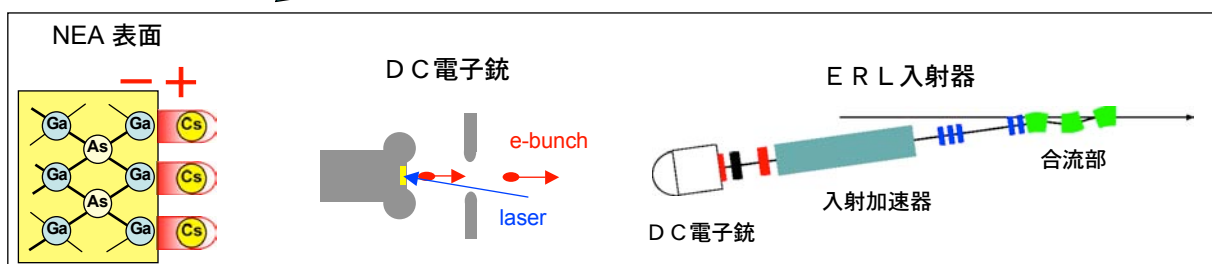
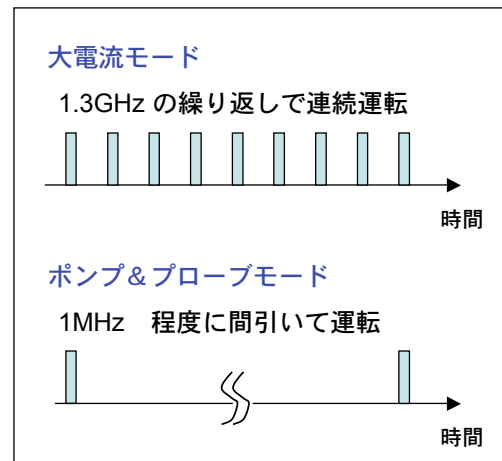
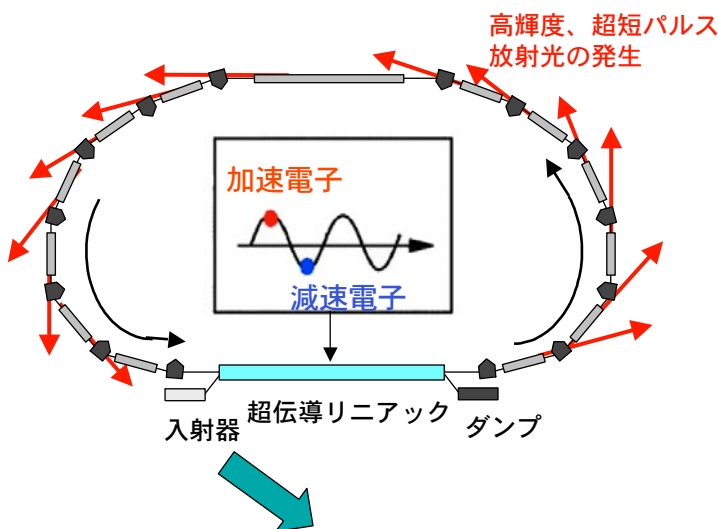
A. General Driven Laser for ERL



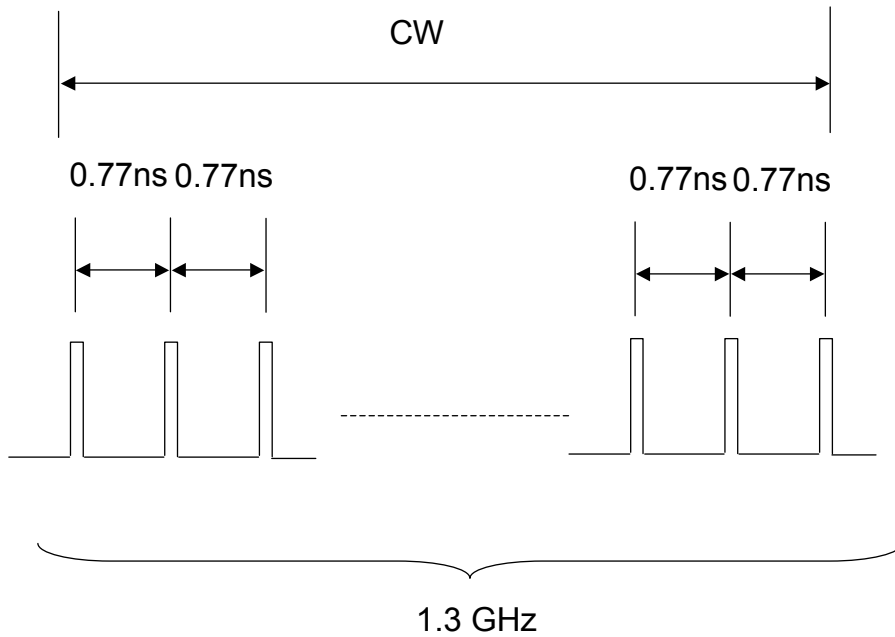
スペック (Micro bunch Charge: 0.077~1 nC) :

- ①個々のパルスの幅: 5ps~20ps (電子の拡散を考えると5ps以下は意味なし)
- ②個々のパルスのエネルギー: 最大30 nJ (平均出力の最大: 20 W)
- ③波長: 780~860nm (NEA GaAs, QE5%以上)
- ④上記パルス繰り返し: CW

A-1. ERLによる次世代放射光源の概要



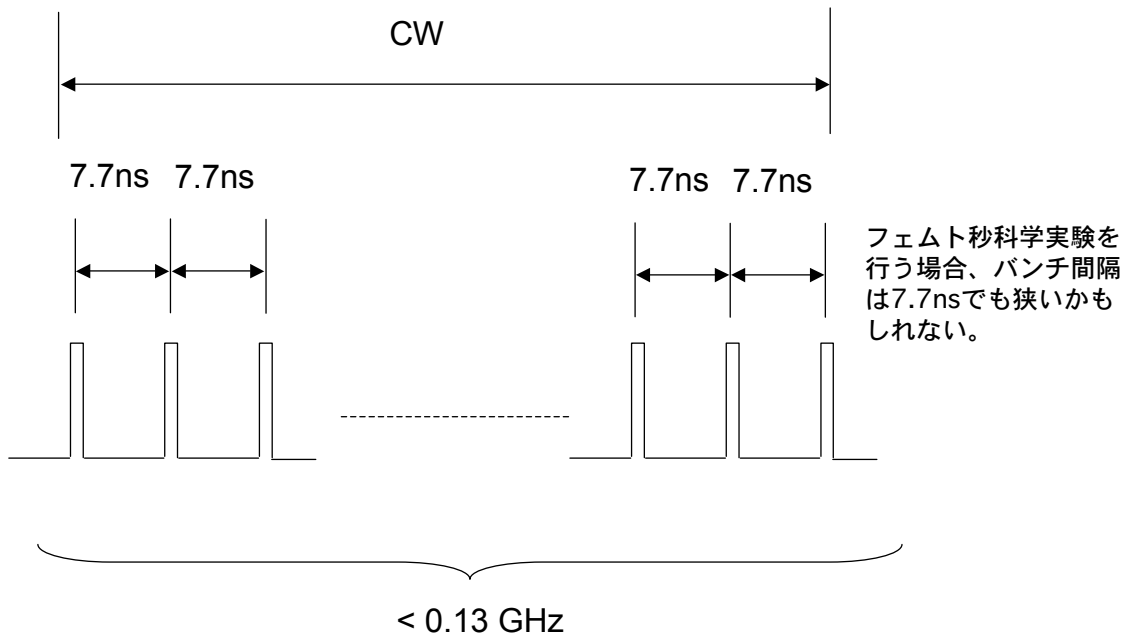
A-2-1. Driven Laser for ERL (100 mA mode)



スペック (Micro bunch Charge: 77 pC) :

- ①個々のパルスの幅: 10~20ps以下であればよい
- ②個々のパルスのエネルギー: 12 nJ (平均出力: 15.6 W)
- ③波長: 780nm (NEA GaAs、QEが5%から1%まで降下するまで)
- ④上記パルス繰り返し: CW

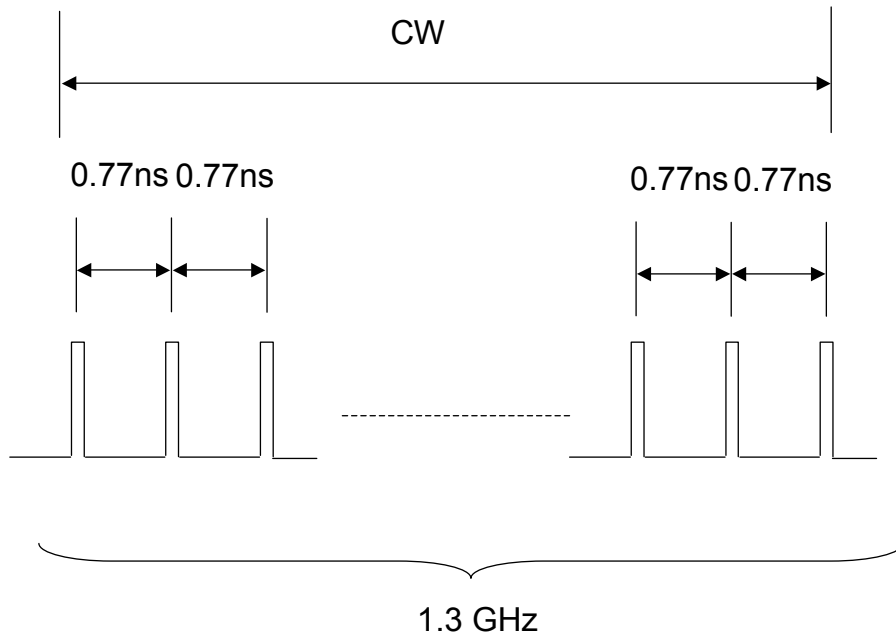
A-2-2. Driven Laser for ERL (100 fs mode)



スペック (Micro bunch Charge: 1 nC) :

- ①個々のパルスの幅: < 10ps
- ②個々のパルスのエネルギー: 155 nJ (平均出力: < 20 W)
- ③波長: 780nm (NEA GaAs、QEが5%から1%まで降下するまで)
- ④上記パルス繰り返し: CW

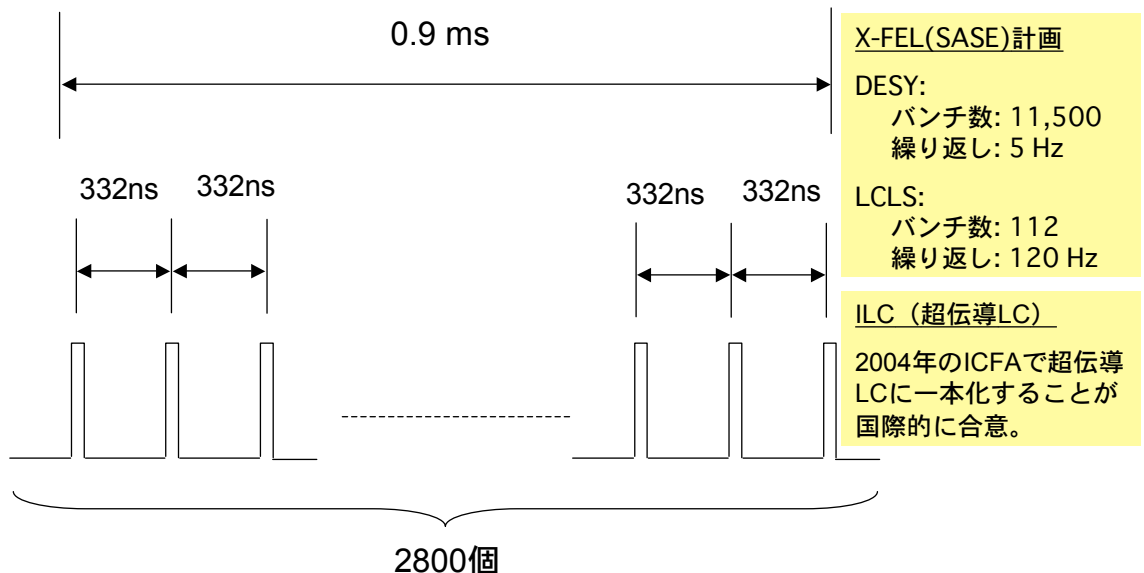
A-2-3. Driven Laser for ERL (0.1 mm-mrad mode)



スペック (Micro bunch Charge: 7.7 pC) :

- ①個々のパルスの幅: 10~20ps
- ②個々のパルスのエネルギー: 1.2 nJ (平均出力: 1.6 W)
- ③波長: 780nm (NEA GaAs、QEが5%から1%まで降下するまで)
低エミッタンス化には、860nm 近辺の長波長側が有利だがQEは低い
- ④上記パルス繰り返し: CW

B. Linear Collider (偏極電子源はGaAsのみ) & X-FEL(SASE) (繰り返し上限)

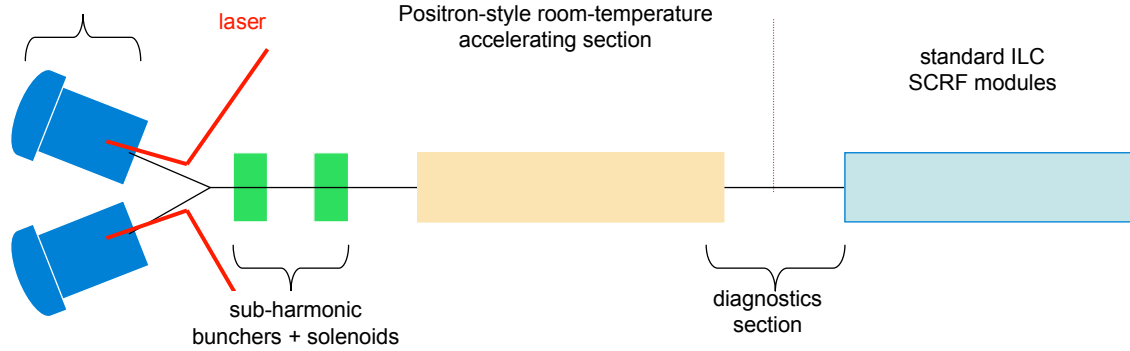


スペック (Micro bunch Charge: 6.4 nC) :

- ①個々のパルスの幅: 10ps (Cs₂Te+RF-Gun); 1ns (GaAs/GaAsP超格子+DC-Gun)
- ②個々のパルスのエネルギー(Cs₂Te: QE1%): ~3.2μJ
(マクロパルス内平均~9 mJ、平均出力~ 45 mW)
GaAs/GaAsP超格子のレーザのエネルギーは上の3.3倍 (QEを0.1%とした場合)。
- ③波長: 266nm (Cs₂Te); 780nm (GaAs/GaAsP超格子 Pol~85%)
- ④上記マクロパルス繰り返し: 5 Hz

B-1. Linear Collider (偏極電子源: DC-GUN)

E=70-100 MeV



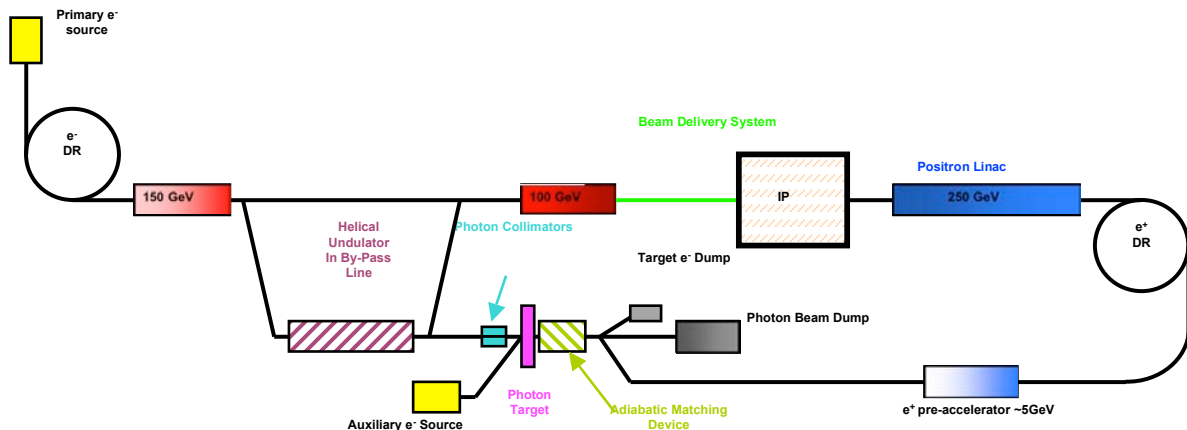
Parameter	Symbol	Value	Units
Electrons per bunch ¹		$4 \times 10^{10} (2 \times 10^{10})^\dagger$	Number
Bunches per pulse		2820 (5640) [†]	Number
Microbunch repetition rate	f_{micro}	3 (6) [†]	MHz
Pulse Repetition Rate		5	Hz
DR energy Acceptance	$\Delta E/E$	1	% (FW)
DR Transverse Acceptance	$A=2J$	0.09	m-rad
Electron Energy	E_0	5	GeV
Electron Polarization	P_e	>80	%

¹ twice IP requirement

[†] Low charge parameters

Cautesty of : Strawman BCD (Baseline Configuration Document)
(C-1 & 2) <http://lcdev.kek.jp/GDE/library.php>

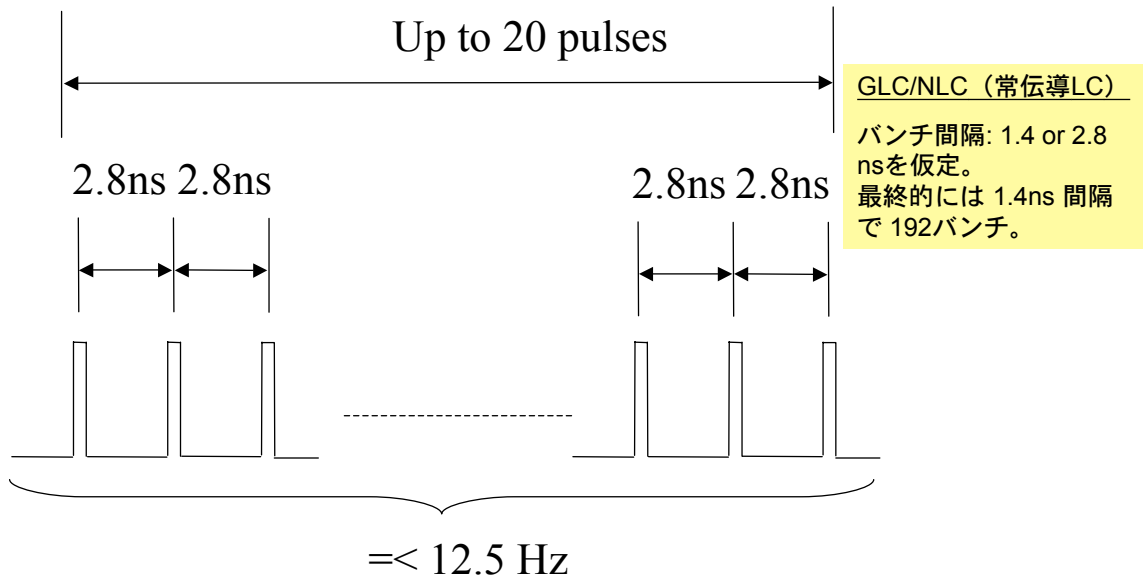
B-2. Linear Collider (陽電子源: バックアップ用のGUN)



現在のILCの設計では二つ陽電子源が必要

- 1) 高エネルギー電子ビームをアンジュレーターに通し、得られるガンマ線から標的中での対生成により陽電子を生成。衝突前の電子ビームを使用するので、陽電子用のドライバーは必要ない。この方法だと標的への熱負荷が低く抑えられ、かつ原理的に偏極も可能。欠点は電子ビームがないと、陽電子もつukれないこと。そのため、2) のバックアップがないと稼働率が大幅に低下する。
- 2) 数GeVの電子ビームを標的に入射し、その対生成による陽電子を使用。バックアップと考えられている。電子源と線型加速器からなるドライバーが必要。バンチ構造は電子側と同じ (300-330ns) で、電荷密度は10%程度。生成効率はドライバーのエネルギーによるが、レーザ・パルスエネルギーは0.15-1.5uJ/bunch 程度。

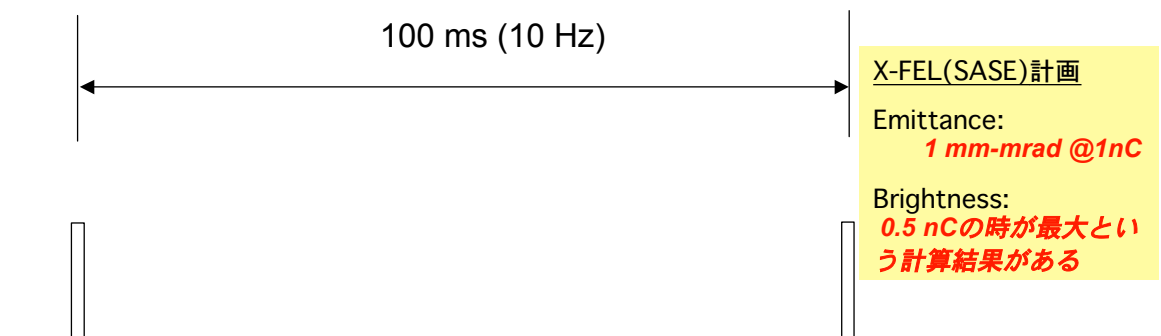
B-3. Drive Laser for KEK-ATF RFGun (常伝導LC用)



スペック (Micro bunch Charge: < 4.8 nC) :

- ①個々のパルスの幅: ~ 10 ps
- ②個々のパルスのエネルギー: 2-4 μ J (平均出力: < 0.1 mW)
- ③波長: 266nm (CsTe, QE 1%), laser media Nd:YVO₄
- ④上記パルス繰り返し: 12.5Hz 以下

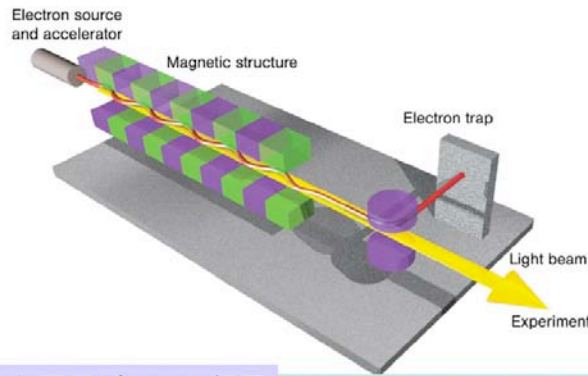
C. Inverse Compton Scattering & X-FEL (SASE) (繰り返し下限)



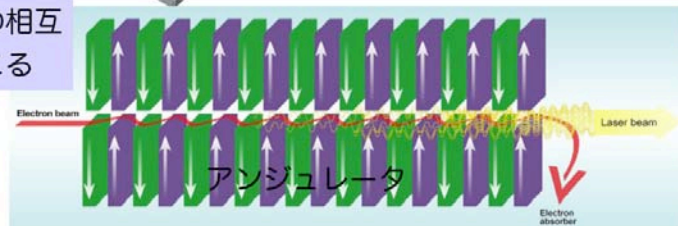
スペック (Bunch Charge: 5 nC) :

- ①個々のパルスの幅: 10 ~ 20 ps
- ②個々のパルスのエネルギー: > 2.5 μ J (Cs₂Te, QE $< 1\%$)
 > 20 μ J (Mg, QE $< 0.1\%$)
 > 250 μ J (Cu, QE $< 0.01\%$)
- ③波長: 266 nm(YAG:FHG), 263 nm(TiSa:THG), 258 nm(YbYAG:FHG)
- ④上記パルス繰り返し: 10 Hz、シングルモード

C-1. X-FEL (SASE)の基本構成



光と電子ビームの相互作用で増幅が起こる



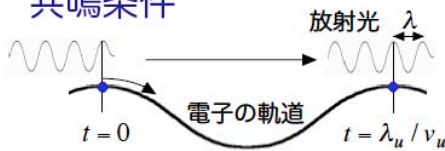
SASE-FEL (赤外～X線)

Self-Amplified Spontaneous Emission



C-2. X-FEL (SASE)の発振、増幅、飽和過程

共鳴条件



電子が一周期走った時、光が一波長分追い越せば共鳴

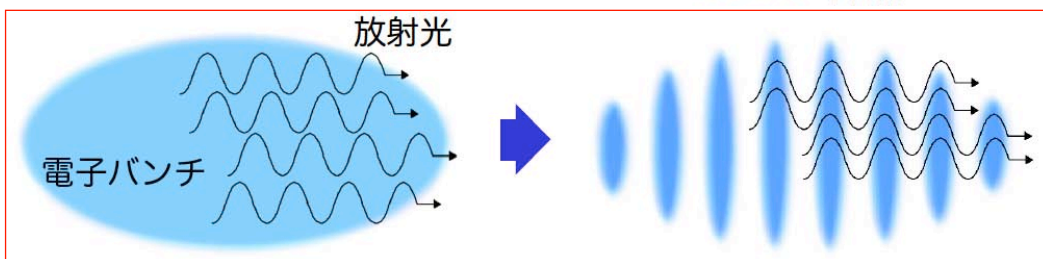
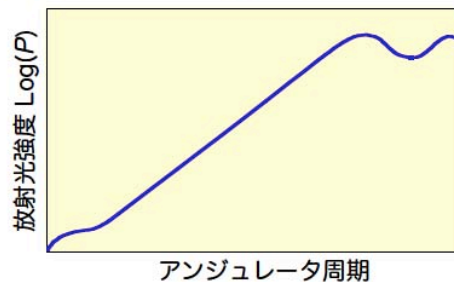
$$\lambda = \lambda_u (c/v_u - 1) \approx \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right)$$

増幅の原理

電子は併走する放射光と相互作用し、マイクロバンチングを起こして強力なコヒーレント放射光を放出する。この放射光がさらにマクロバンチングを促進する

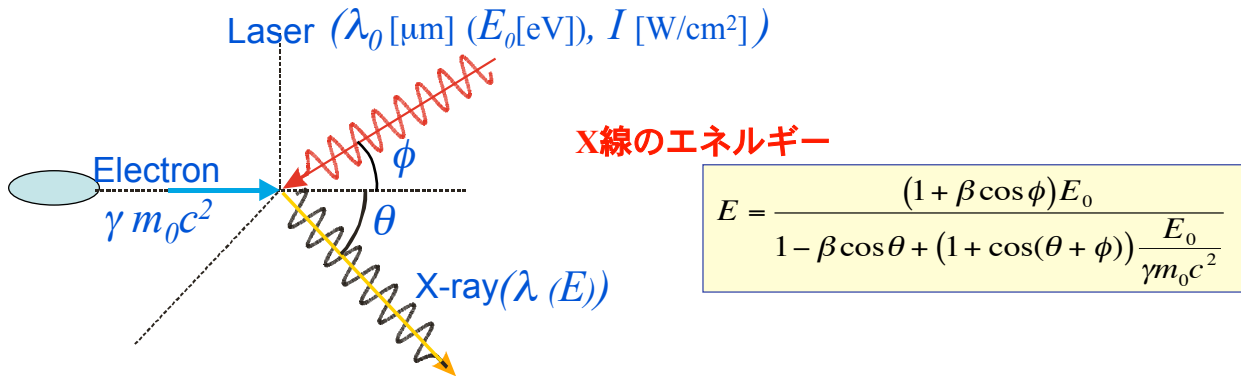
飽和

光放出による電子のエネルギー損失が大きくなり、エネルギー幅も広がると、増幅しなくなる



C-3. 逆コンプトン散乱（レーザコンプトン散乱）の原理

高エネルギー電子ビームとレーザとの相互作用でX線を生成



X線の特徴

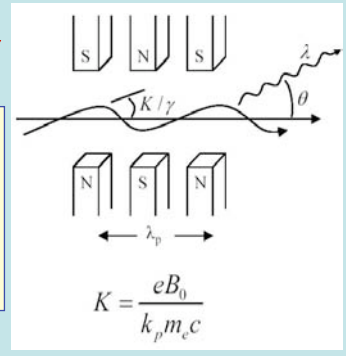
1. 短パルス性
2. 波長可変性
3. 準単色性
4. 指向性
5. 高偏極性
6. 装置のコンパクト性

Undulator Radiationとしても記述

X線の波長

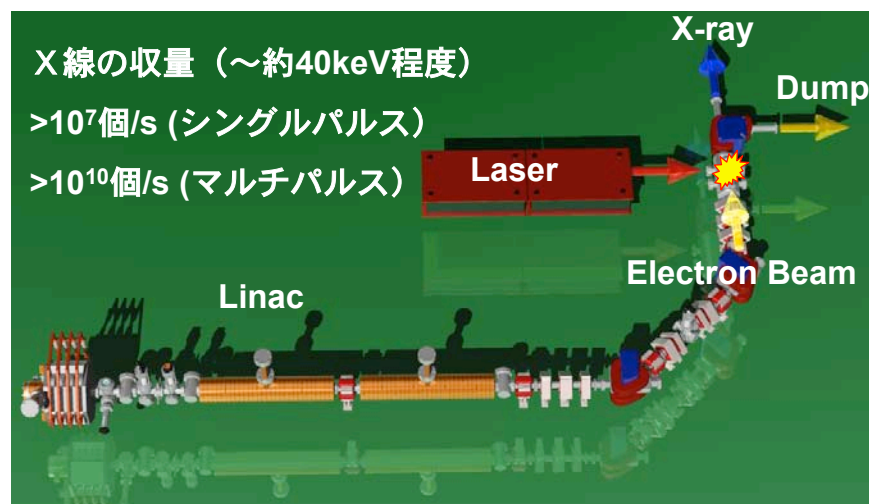
$$\lambda \cong \frac{\lambda_0 (1 + K^2/2 + \gamma^2 \theta^2)}{2\gamma^2 (1 - \cos \phi)}$$

$$K = eA_0 / m_e c^2 \approx 0.85 \times 10^{-9} \lambda_0 \sqrt{I}$$



C-4. 逆コンプトン散乱（レーザコンプトン散乱）X線源

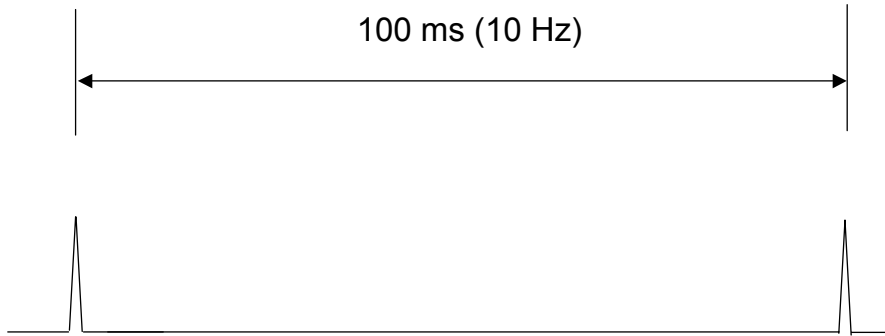
☆LinacベースのコンプトンX線源



☆RingベースのコンプトンX線源



D. Laser Accelerator (プラズマ・カソード)

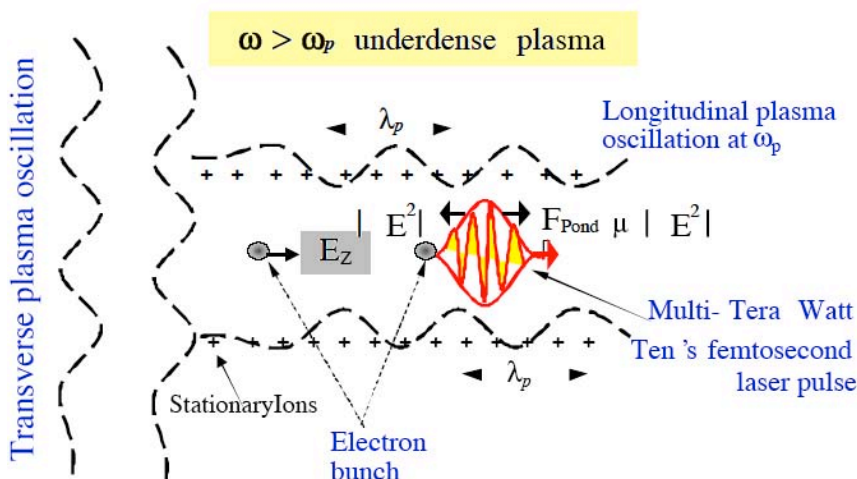


スペック :

- ①個々のパルスの幅:<50 fs (30fs:ただし、スペクトル・ナローイング 補償が必要)
- ②個々のパルスのエネルギー:>10 TW (ただし、波面補償により集光強度で稼ぐことが可能:~TWで回折限界の2 μm程度で可能)
- ③波長: 800 nm (バンド幅が増幅後に取れることが最重要)
- ④上記パルス繰り返し: 10 Hz
- ⑤コントラスト:<10⁻⁶ ~ 10⁻⁷
- ⑥QE (参考値):プラズマ生成でかなりのエネルギーを消費するため、3.9E-9.

D-1-1. Laser Acceleratorの原理 (電子発生と加速機構の機能分離)

(Tajima and Dawson Phys. Rev.Lett. 43, 267, (1979))



Injector 部

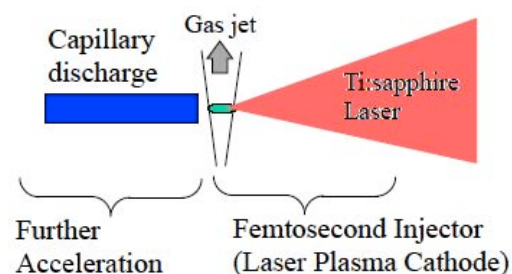
10-20 MeV領域で準単色ビーム
 $\Delta E/E \sim 10\%$ 、
 電荷量 ~10-25 pC/shot
 エミッタンス ~0.05 π mmmrad
 電子パンチ長 < 200 fs

加速管 (プラズマ導波路) 部

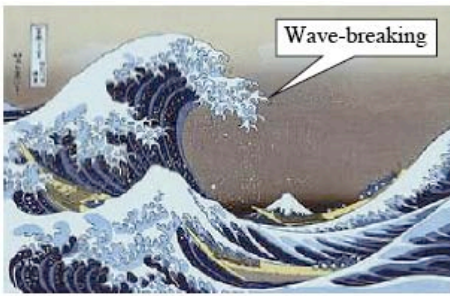
c mオーダーのチャンネル形成をキャピラリー放電 (Zピンチ) で実現し高強度レーザーパルスをガイディングする。

Staged Acceleration

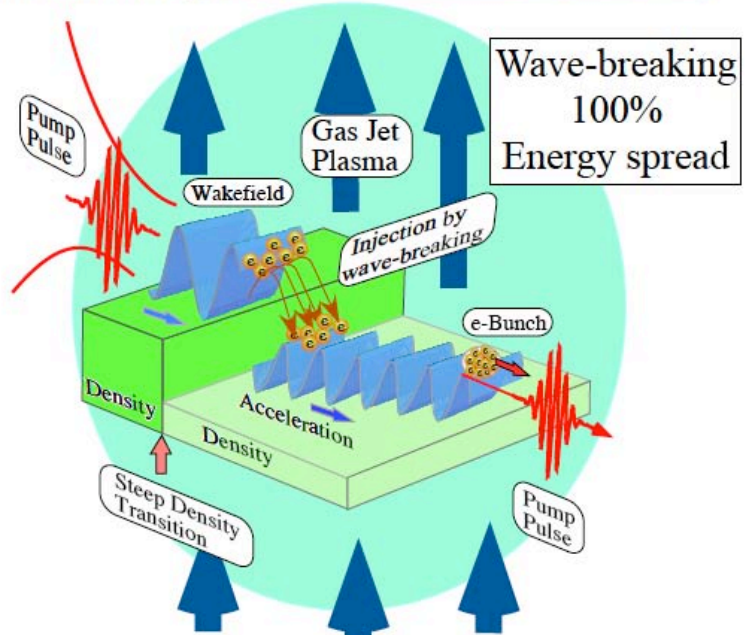
A plasma channel can serve as a media for perfect wake-field for further acceleration generated via wave-breaking



D-1-2. Laser Acceleratorの原理 (Wave-breakingによる電子発生)



Rapid injection into correct acceleration phase → Femtosecond e- bunch



- Wave-breaking field

$$E_B \sim [2(\omega/\omega_{pl}-1)]^{1/2} mc\omega_{pl}/e$$

- Density gradient

$$\lambda_{pl} N/(dN/dx) \sim 1$$

ω : Laser frequency

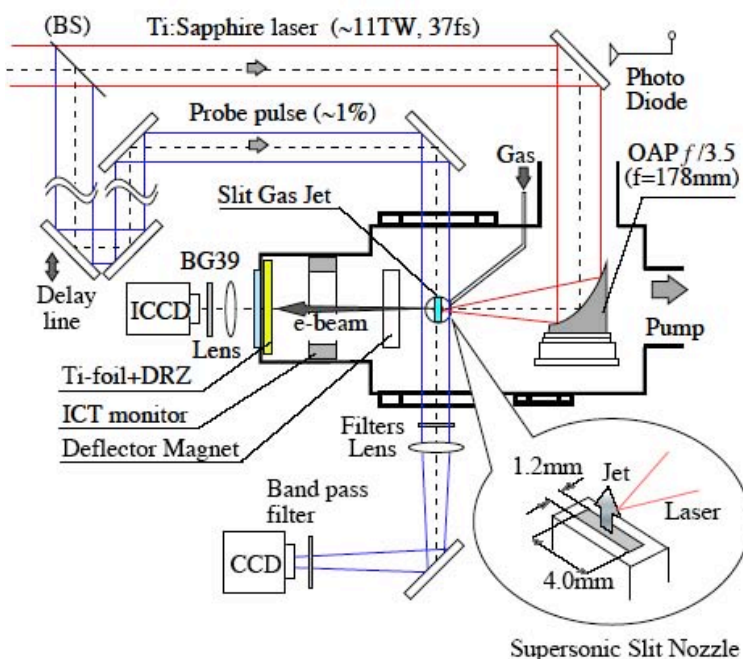
ω_{pl} : plasma frequency

$$\lambda_{pl} = 2\pi c/\omega_{pl}$$

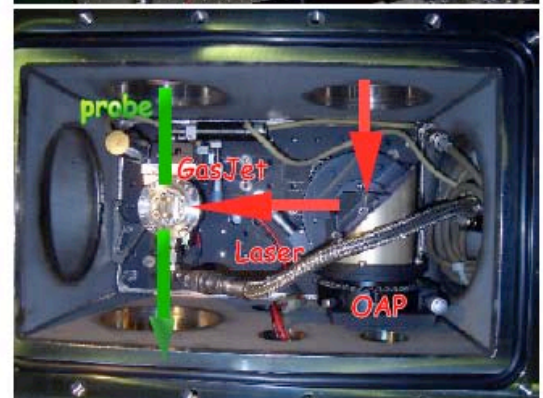
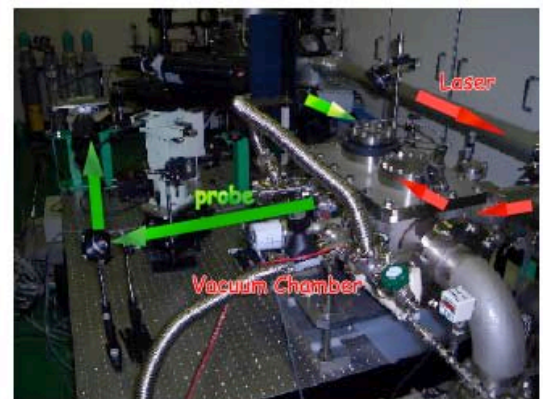
λ_{pl} : plasma wavelength

Reference : S.V.Bulanov, et al, Phys.Rev.E. 58, R5257

D-2-1. Laser Accelerator装置 (東大)

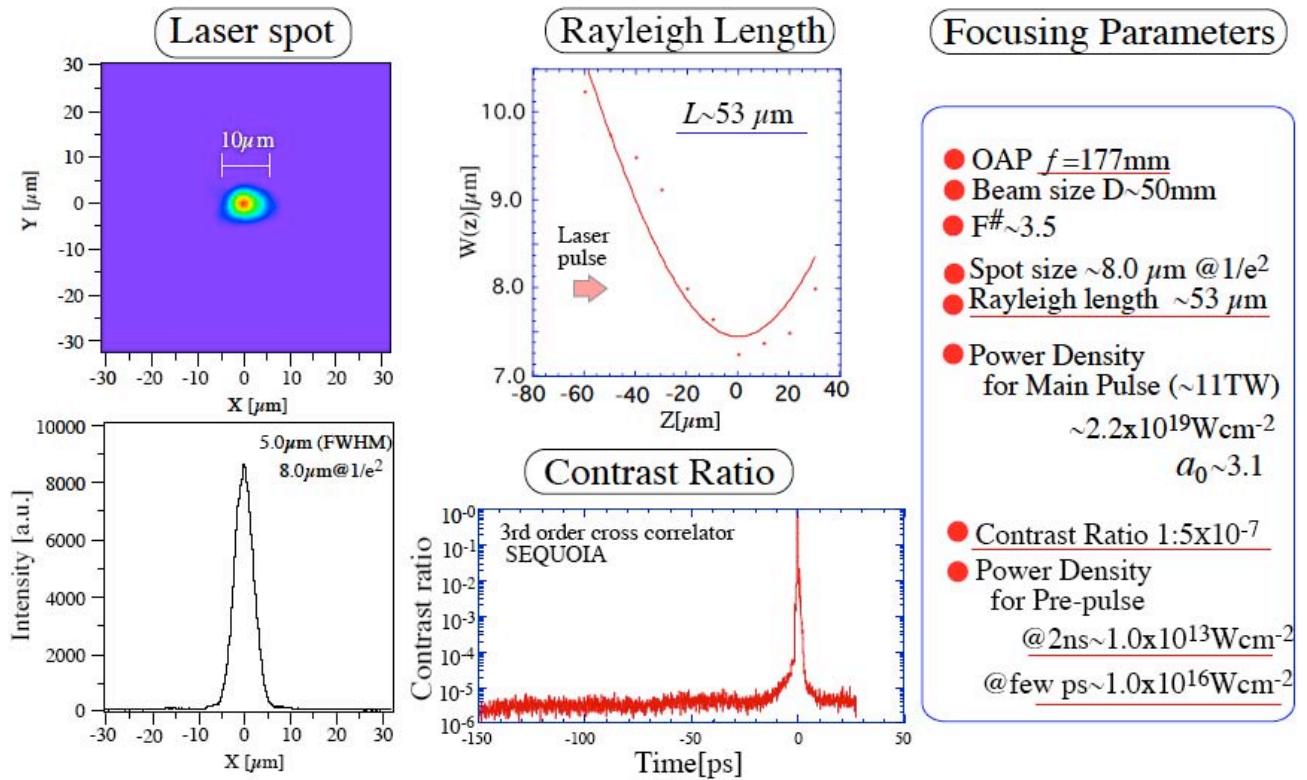


Gas density up to $6 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ @80atm



D-2-2. Laser Accelerator実験状況 (東大)

Ti:Sapphireレーザの条件 : 17 TW, 37 fs (Dazzlerによるスペクトル補償)



III. 同期

低ジッターと
ドリフト制御

RFとレーザーの同期の必要性

フォトカソード電子銃においてはレーザーとRFは同期をとる必要がある。この理由はレーザーがカソードに当たると光電子が発生するが、この瞬間の空洞内のRFの位相が最適位相で安定していなければならないからである。

RFの周波数 2856MHz (Sbandの場合)

レーザーオシレータの周波数

79.33 MHz (RF周波数の36分周@東京大学)

89.25 MHz (RF周波数の32分周@Spring-8)

119 MHz (RF周波数の24分周@住友重機械) など

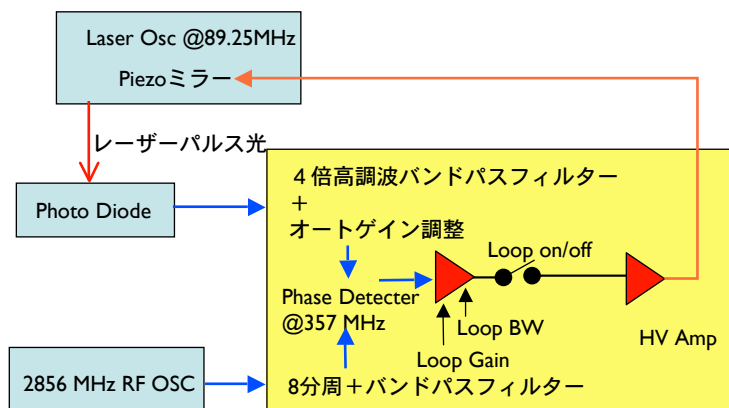
レーザーオシレータの周波数 f はオシレータの共振器長 L 、光速 c により、次式で与えられる

$$f = \frac{c}{2L}$$

共振器端の一方のミラーを高速制御可能な**ピエゾ素子**で動かすことにより、共振器長 L を調整する。通常**PLL回路**をもちいて、レーザー周波数をRFにロックすることにより高精度な同期が可能となる。

A. 同期回路について

PLL同期回路の実際 (@ Spring-8)



左の例でRFとレーザー間のr.m.sジッターは550fs程度

同期回路の低ジッター化のポイント

位相比較周波数
位相比較回路方式
ループフィルターの最適化
分周器
バンドパスフィルター
ピエゾ素子の応答速度
など

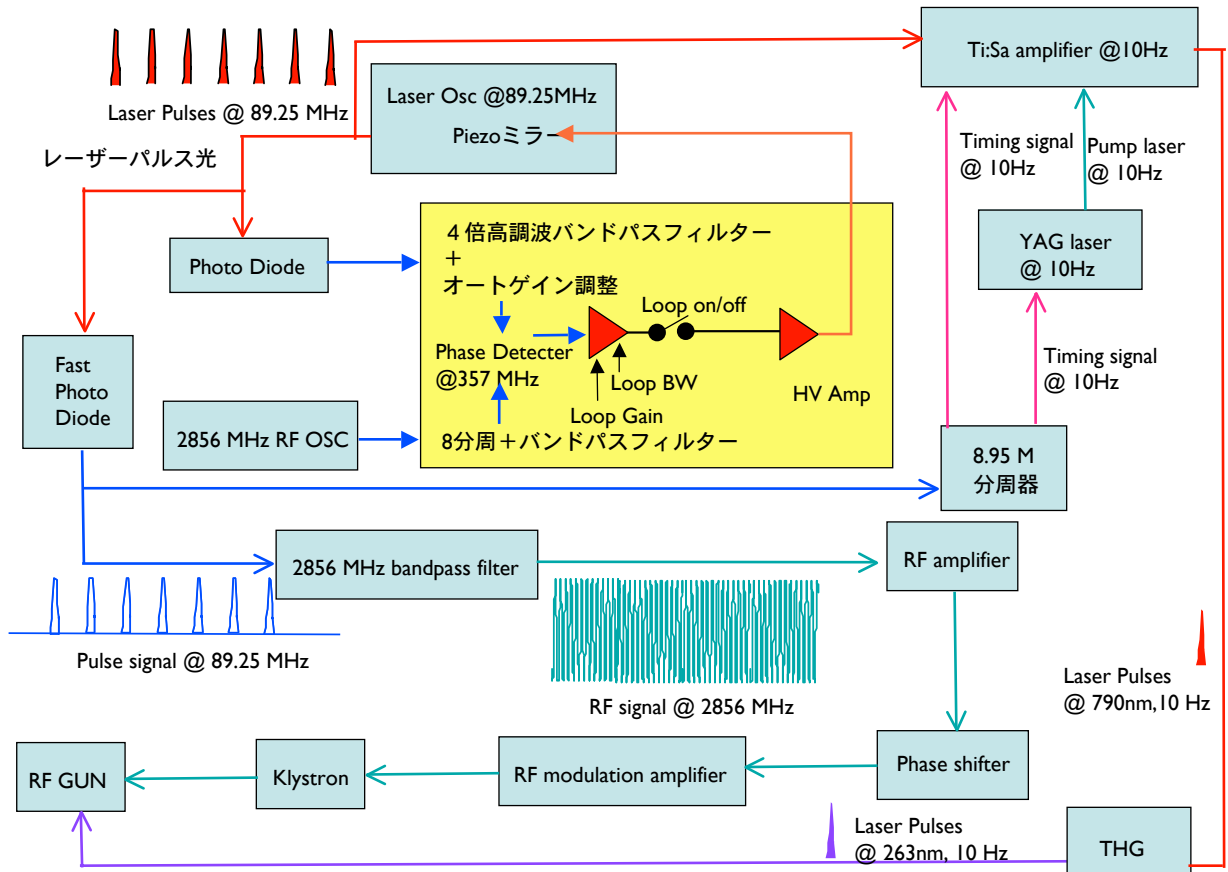
PLL回路以外の低ジッター向上以外の方法

レーザーオシレータからの光パルスを用いてRFを再生成すると、再生成されたRFとレーザー間のジッターは減少する。r.m.sジッターが230 fsまで低減できることを検証済み (@ Spring-8)

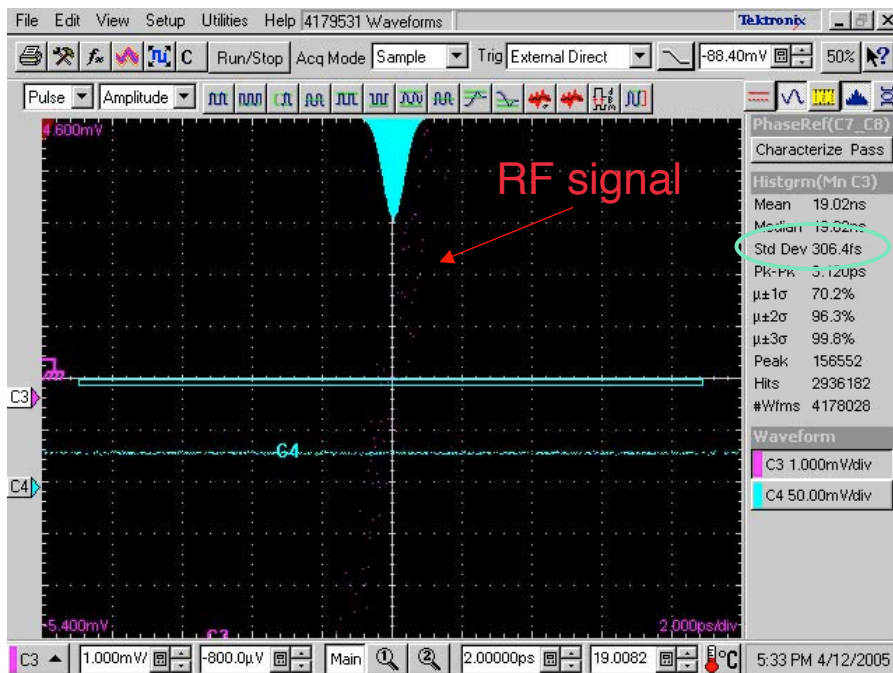
2つのレーザーを同期するために相関光を用いる方法

逆コンプトン散乱によるX線発生においてはRF電子銃カソード照射用のレーザーと逆コンプトン光発生用レーザーの2つのレーザーの同期を取る必要がある。この場合にはPLLを用いない同期方法が可能である。2つのレーザー光を同時に互いに斜めに非線形結晶にあて、出てきた**相関光の強度変動**から時間差がわかる。これを用いて一方のレーザー発振器にフィードバックをかけることにより2つのレーザー間の高精度の同期をおこなう。これにより10 fs以下のジッターが可能である。逆コンプトン散乱の場合には、実際には電子銃カソード照射用のレーザーは電子加速器のRFとも同期を取る必要があるため、各レーザーをPLLにて電子加速用RFと同期を取った状態で相関光による同期を行う (@FESTA (住友重機械工業))。尚、同様の方法でのr.m.sジッター世界記録は0.3 fs (MIT)である。

B-1. レーザオシレータの光パルスからRFを再生成する方法 (SPring-8)



B-2. RFを再生成する方法による低ジッター化 (SPring-8)



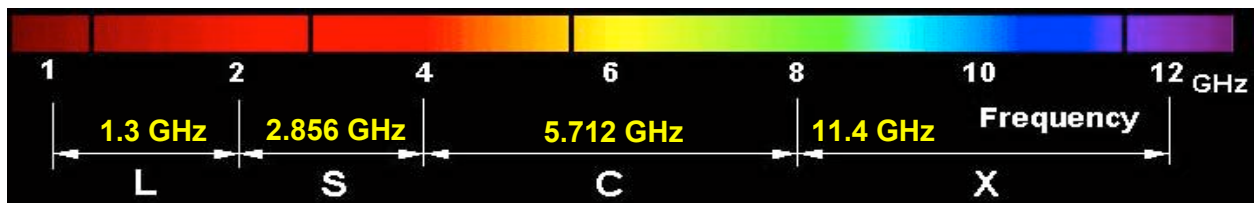
オシロスコープの内部ジッター (200 f s) を考慮すると
RFとレーザー間の正味のr.m.sジッターは230fs

IV. 加速管の選択

高繰り返しで大規模になるほどランニングコストの小さい超伝導のほうが有利

進行波型加速管周波数の選択

周波数選択は高電界加速や電力効率だけでなく、 $\Delta E/E$ を小さくするための位相安定化や低暗電流化の観点が重要である。



•位相安定度はタイミング・ジッターが 100 fs 以下は困難なため、それぞれの周波数について評価しなければならない。

↓ 位相角0.1度(X-FELの要請)に相当するジッターの許容範囲は
L (240 fs) S (100 fs) C (50 fs) X (25 fs)

↓ 位相角10度(ILCの要請)に相当するジッターの許容範囲は
L (23 ps) S (10 ps) C (5 ps) X (2.5 ps)

•もし仮に技術革新で 100 fs 以下のような超低ジッターができたとしても各周波数に等しく寄与するので、Lバンド (1.3GHz)が常に優位。

超伝導か常伝導かの選択

超伝導の方が共振のQが高く有利だが、Lバンドまでしかその有用性が維持できない。また、高電界はクエンチングで制限される。常伝導は原理上は周波数制限がないが、周波数が高くなると、加工精度や表面処理の限界から高電界が制限される。多空洞では2次電子増幅による制限も加わる。

- RF位相はモジュレータ高圧電源のリップルが大きいほど不安定。超伝導空洞は常伝導に比べて共振のQが2桁は高いので、Filling timeが2桁長くなり、ビームがこの位相ノイズの影響を2桁程度は受け難いために圧倒的有利。

↓ X-FELに必要なアンジュレータでの条件は **0.5 nC @100 fs time width!**
 RF電子銃の10 psから始まるとすると100 fsにするには、圧縮度1/100。
 バunchを1/100に圧縮したときにRFの位相安定度の許容値は**0.01°!!**

例えば、X-FELに求められるRF位相安定度は各計画の独自の工夫により
TESLA計画の超伝導（位相角 $< \sim 1^\circ$ ） LCLS常伝導（位相角 $< \sim 0.1^\circ$ ）

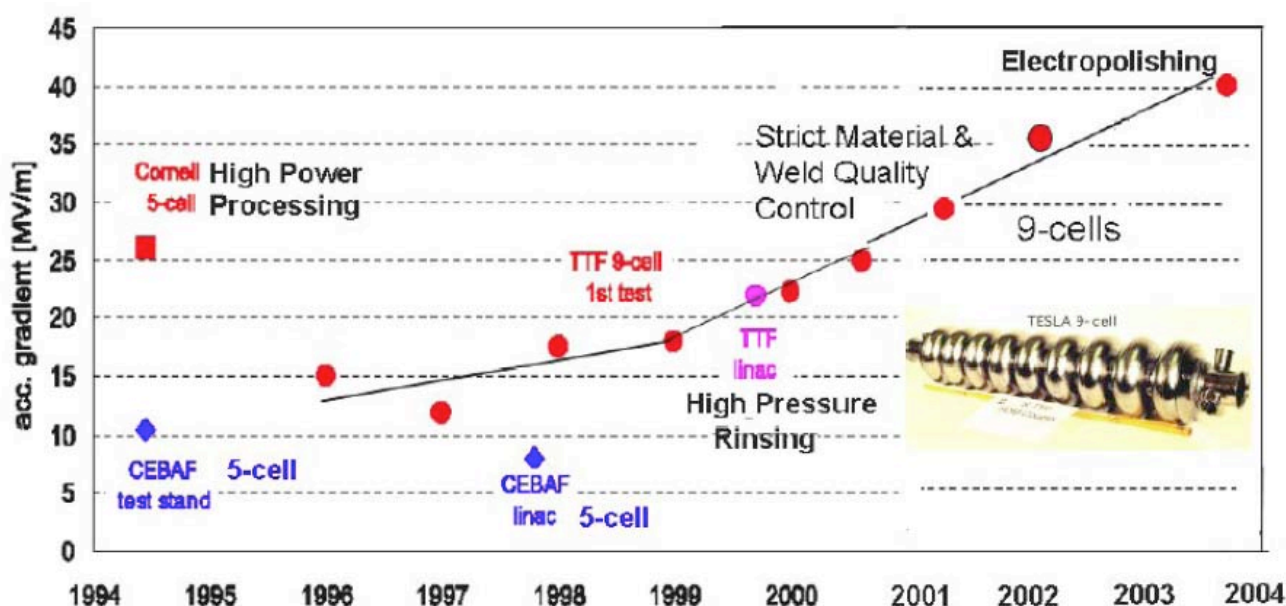
- 周波数が高い方が高電界加速に有利でコンパクトという意見があるが、現実的な多空洞での高電界試験ではL、S、C、Xバンドすべて**50 MV/m程度**で変わらない。これには空洞内での2次電子増幅の影響が考えられる。ビーム負荷時で長期の安定度を考慮し、実際はこの半分程度の加速勾配で運転。

※ 実際のビーム加速では 周波数が高いほどビームローディングがきついで注意!

※ 超伝導は表面磁場による超伝導の破壊、常伝導は表面での放電（壁電流が関係）で制限!

超伝導空洞の高電界化

元来、周波数を高く出来る常伝導の方が超伝導よりも高電界加速に有利で装置のコンパクト化に寄与すると言われたが、近年の表面処理技術でほとんど、この点での差はなくなっている。



空洞の高周波化に伴う表面状態への敏感度

超伝導体もAC/R F応用では表面抵抗が存在する。超伝導空洞の場合は表面欠陥でクエンチが起こるので極低温でも高熱伝導率を要求する。

$$\text{Skin depth: } \delta = \frac{1}{\beta} = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}}$$

$$R_s = \sqrt{\frac{\mu\omega}{2\sigma}} = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{\mu\sigma\omega}{2}} = \frac{1}{\sigma\delta}$$

Frequency	δ [μm]	R_s [$\text{M}\Omega$]	Facility
508MHz	2.90	5.78	トリスタン
1300MHz	1.81	9.24	TESLA
2856MHz	1.22	13.70	Conventional LINAC
11.4GHz	0.61	27.36	GLC

周波数が高くなるほど、skin depthが浅くなり、空洞性能が表面状態に敏感になる。

ITRP (International Technology Recommendation Panel)

19 November 2003

Charge for the International Technology Recommendation Panel

General Considerations

The International Technology Recommendation Panel (the Panel) should recommend a Linear Collider (LC) technology to the International Linear Collider Steering Committee (ILCSC).

On the assumption that a linear collider construction commences before 2010 and given the assessment by the ITRC that both TESLA and JLC-X/NLC have rather mature conceptual designs, the choice should be between these two designs. If necessary, a solution incorporating C-band technology should be evaluated.

超伝導Lバンドと常伝導XバンドがLCの技術選択をする国際的な組織であるITRPで、2003年に推奨され、2004年に最終的に超伝導Lバンドで一本化に決定。

We developed an extensive and systematic process for evaluating many criteria for both technologies. These criteria fell into six major areas that are described in the body of this report. Each criterion was analyzed and evaluated in terms of the relative advantages or disadvantages for warm and cold technologies. We examined the extensive existing materials and assessed the answers to specific questions that we posed to the experts and proponents. Our evaluations led to substantial consistency, item by item over the Panel. Our final evaluation and choice was primarily based on integrating over all these evaluations from the twelve Panel members. Although the choice was very close, with some criteria yielding advantages for one technology and others for the other technology, we found a broad and consistent advantage for the cold technology. On that basis, we recommended that the LC design be based on the superconducting rf technology.

謝辞：

以下の方々にご協力頂いてこのレジュメは完成されました。
この場をかりて深く御礼いたします。（役職名等は省かせて頂きました）

栗木 雅夫 @高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設
山本 将博 @名古屋大学 大学院理学研究科
佐々部 順 @(株)浜松ホトニクス 中央研究所
作美 明 @東京大学大学院工学系研究科原子力専攻ライナック管理部
細貝 友直 @東京大学大学院工学系研究科原子力専攻ライナック管理部
羽島 良一 @日本原子力研究開発機構、ERLグループ
飯島 北斗 @日本原子力研究開発機構、ERLグループ
西谷 智博 @日本原子力研究開発機構、ERLグループ
黒田隆之助 @産業技術総合研究所 計測フロンティア研究部門
川戸 栄 @福井大学、工学研究科
松原 伸一 @福井大学、工学研究科
松井 多志 @福井工業技術センター

ここに名前を挙げた方以外にも（財）高輝度光科学研究センター
加速器部門の研究員より、多くのアドバイスとご協力を頂きました。
ありがとうございました。

尚、ここに挙げた協力体制は過去3回開かれた高周波電子銃会議に
おいて協力体制が進む欧米に危機感を抱く、若い研究者達の間で自然
に築かれてきたものである。このレジュメは、この会議でレーザ光源
の分科のまとめ役をしている上記財団所属の冨澤宏光が取りまとめた
にすぎない。本文責はすべて冨澤宏光にあることをここに明記する。