

ERL開発の現状と展望

2014年11月22日(土)9時00分～9時30分

自然科学研究機構岡崎コンファレンスセンター中会議室

宮島 司

高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

加速器研究施設

Outline

1. ERL加速器と光源への利用
2. ERL開発の世界の動向
3. 試験機開発(compact ERL)の現状
4. 今後の展望
5. まとめ

ERL加速器と光源への利用

□ERL (Energy Recovery Linac) 加速器

- 線形加速器の特徴を有する
- 「先端性と汎用性」の両立の可能性
- 高輝度・大電流ビームの生成・加速が鍵

□光源性能の目標 (3 GeV ERL計画を例として)

- 高い平均輝度 ($10^{21}\sim^{23}$) と短パルス性 (100 fs ~ 数ps)

□ERL光源実現に向けての課題

- 要素技術開発: 電子銃と超伝導加速空洞
- 安定性、建設・運転コスト、放射線遮蔽

ERL加速器の特徴

- Energy Recovery Linac (ERL、エネルギー回収型線形加速器)の名の通り、**線形加速器**
- 線形加速器：電子源から電子を生成し加速、電子ビームを利用したのちに、ダンプに捨てる
- 線形加速器の特徴：

- ビームは一度きりの使い捨て(ビーム品質は電子源によって決まる)

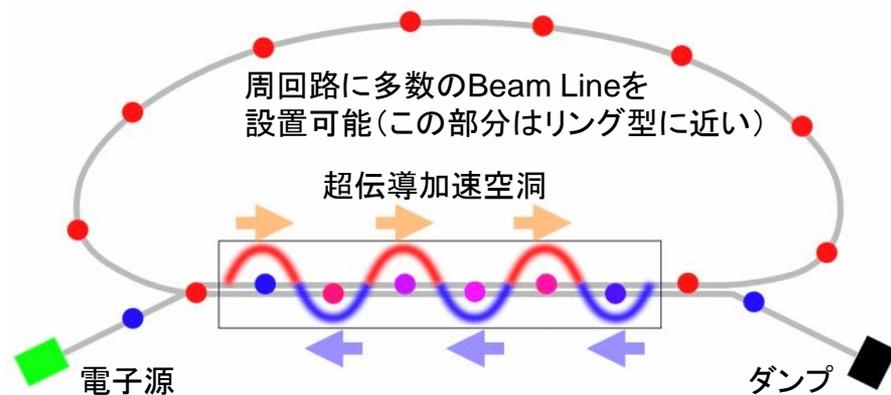
$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_n}{\gamma\beta}$$

加速すればするほど幾何学エミッタンスは減少

- 出力は「電流×加速エネルギー」なので、大電流化するとどんどん必要な電力が増加(ついでに捨てる時の放射線も増大)

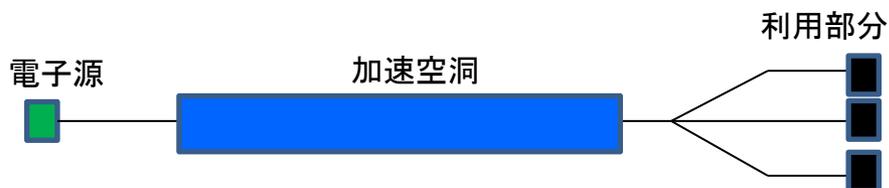
加速すればするほど必要な電力も増える

- Energy Recovery Linac (ERL、エネルギー回収型線形加速器)：加速した電子ビームをもう一度加速空洞に通して減速。そのエネルギーを次のビームに与える。
- メリット
 - 大電流ビームを扱うことが可能
 - 放射光源利用の場合、平均輝度の上昇、多数のビームラインを設置可能(周回路を作るため)



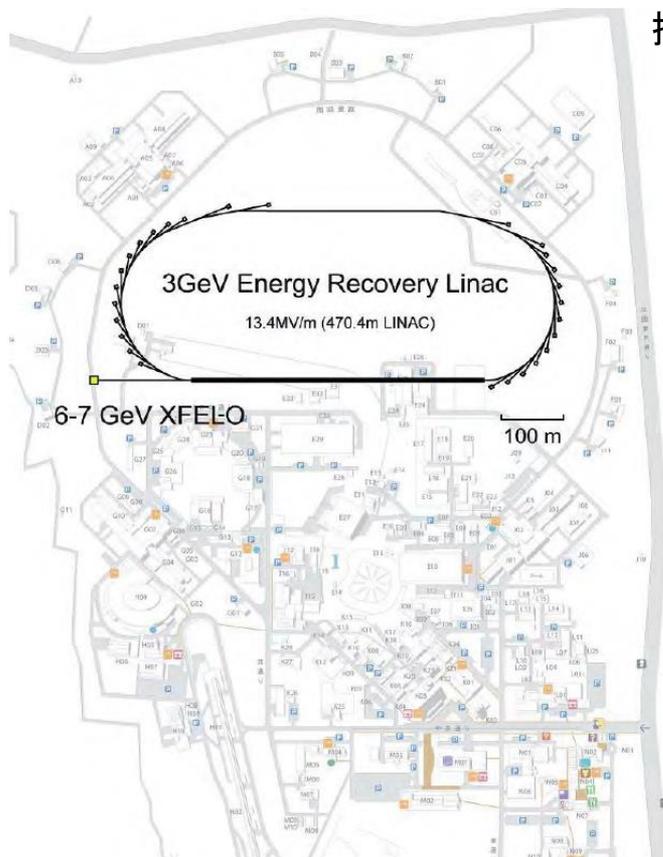
- ERLを利用した光源の目指すところ
 - 先端性(高輝度、高繰り返し、短パルス長、小さいエネルギー拡がり)と汎用性(同時利用)の両立

高輝度・大電流ビームの生成・加速が鍵

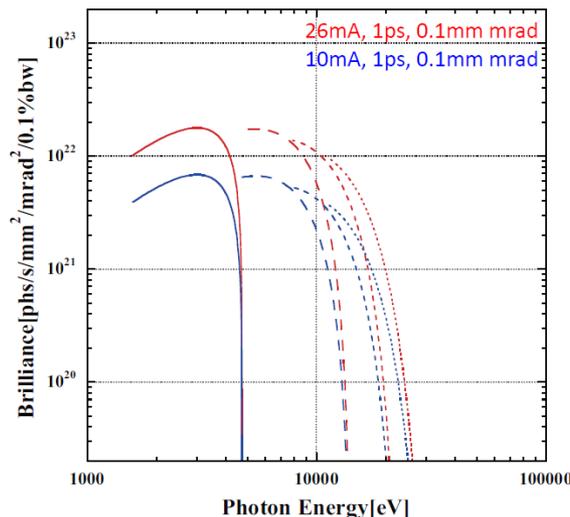


光源性能の目標 (3 GeV ERL光源を例として)

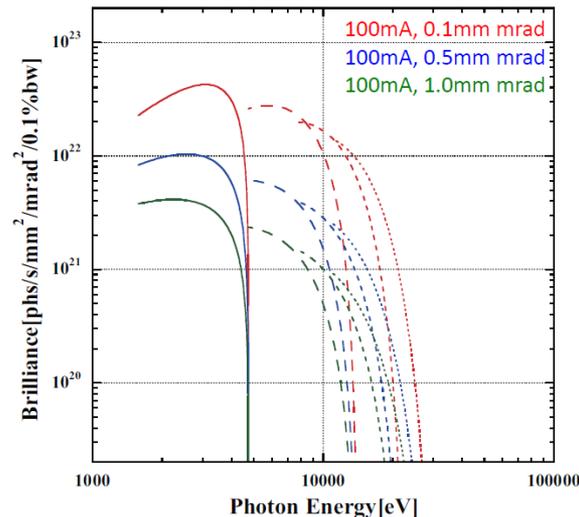
- ERL Conceptual Design Report (KEK Report 2012-4) より



挿入光源 ($L_u=30$ m, $\lambda_u = 18$ mm) からの光のスペクトル計算例 (中村典雄氏)



10 mA, $\sigma_E=5 \times 10^{-5}$ ($\sigma_z = 1$ ps)
8 keVの3次光: 10^{22}



100 mA, $\sigma_E=2 \times 10^{-4}$ ($\sigma_z = 2$ ps)
8 keVの3次光: $10^{21} \sim 10^{22}$

ERL光源性能

3 GeV ERL	
平均輝度	$10^{21} \sim 10^{23}$
設置可能BL数	~30本
空間干渉度	数10%
パルス幅	100 fs ~ 3 ps

KEKB加速器の内側にERL光源加速器を設置したときの配置案

⇒ 超伝導空洞の長さが加速器の大きさを決める

➡ これを実現する加速器の運転条件は？

ERL光源利用時に必要となる加速器性能

- 3 GeV ERL光源で想定される3つの運転モード

	High-coherence mode	High-flux mode	Ultimate mode
Beam energy		3 GeV	
Average beam current	10 mA	100 mA	100 mA
Bunch charge	7.7 pC	77 pC	77 pC
Repetition rate of bunch		1.3 GHz	
Normalized emittance	0.1 mm mrad	1 mm mrad	0.1 mm mrad
Emittance at full beam energy	17 pm rad	170 pm rad	17 pm rad
Energy spread	2×10^{-4}	2×10^{-4}	2×10^{-4}
Bunch length	2 ps	2 ps	2 ps

- 必要な電力とビームを捨てる時の出力

エネルギー回収をしない場合

- 電力: **GWクラス** ($100 \text{ mA} \times 3 \text{ GeV} = 300 \text{ MW}$ + 空洞による損失等)
- 捨てる出力: **300 MW**

線形加速器の大電流化に向けてはエネルギー回収が一つの解になる

エネルギー回収をする場合

- 電力: **数十MWクラス** ($100 \text{ mA} \times 10 \text{ MeV} = 1 \text{ MW}$ + 冷凍機の運転等)
- 捨てる出力: **1 MW**

挑戦的な値はどれか？

- 平均ビーム電流 100 mA
- 規格化エミッタンス 0.1 mm mrad

- 平均ビーム電流 100 mA

- これだけの電流を生成し続ける電子源開発が必要
- さらにこれを加速し続ける加速空洞開発が必要

- 0.1 mm mradのエミッタンス

- この小さい初期エミッタンスを実現するカソード材質
- これを悪化させない輸送法



それでは、他の加速器性能はどうか？

ERL光源実現に向けての課題

- 光源加速器に必要な性能： **安定な光(変動しない、中断しない)**、**低いコスト(建設・運転)**
- 光源利用に向けたERL加速器実現の課題(未知数は何か?)
 - **高輝度・大電流電子ビームの生成**： 100 mAを供給し続ける電子源はこれまでにない。
 - **大電流電子ビームの加速**： 100 mAを加速し続ける超伝導加速空洞はこれまでにない。
 - **ビーム性能**： 入射器(低いエネルギー領域)での試験が進みつつあるが、周回部での実証はこれから。大電流加速の影響、短バンチ長の影響(CSR)などの検証が必要。低エミッタンスを実証することが必要。
 - **安定性(長時間・安定に、一様に)**： 基本的に線形加速器型光源なので、貯蔵リングのような安定化機構がないので、変動源を断つことが必要。ユーザー利用を中断する原因になりそうなのは、カソード交換(寿命がどれくらいか?)、超伝導空洞の停止頻度。
 - **運転コスト**： エネルギー回収は一見エコっぽく見えるが、ビーム出力とは別に、超伝導空洞を2~4 Kに冷却するための冷凍機の運転にコストが掛かる。
 - **放射線遮蔽**： エネルギー回収によってダンプに捨てる出力はかなり下がる。が、輸送中にどこで、どれくらいビーム損失が起きるのかは、試験機で検証する必要がある。

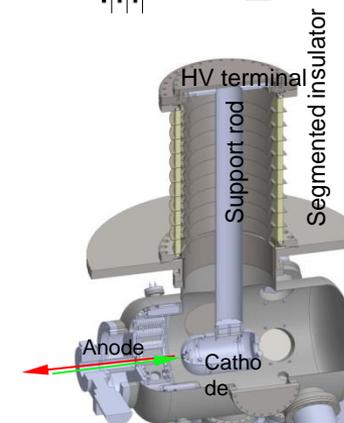
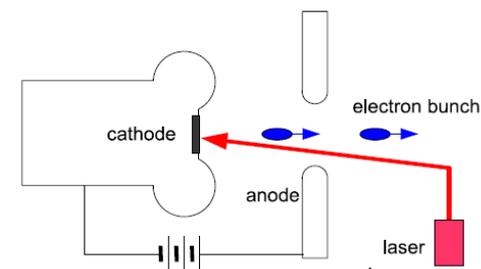


要素技術開発とともに、光源加速器としての総合性能を検証する必要がある

鍵となる開発要素

電子銃

- 高品質・大電流・長時間運転の3つを同時に満たすことが必須
⇒ 「光陰極を用いたDC電子銃」を選択
- 高品質のため：高い電圧が必要 ⇒ 500 kV
- 高品質+大電流のため：GaAsカソードの採用 (NEA表面が長寿命化のカギ)
- 長寿命化するため：カソード周りの真空条件を良くする (極高真空開発)
- 目標設定：100 mA (77pC/bunch) で1 mm mradを切る電子ビームを、500 kVで加速



加速空洞

- 大電流を高い加速勾配でCW運転で加速することが必須
⇒ 「超伝導加速空洞」を選択
- 入射器超伝導空洞：2-cell 空洞 × 3台 (compact ERLの場合、実機では6台)
- 主加速超伝導空洞：9-cell 空洞 × 2台 (compact ERLの最初、実機では224台)
- 目標設定：15 MV/m で100 mAを加速



段階的な開発を継続することが欠かせない



実証機として、compact ERL (cERL)を建設

ERL開発の世界の動向

□ERLの開発目的

- 放射光利用
- 素粒子原子核実験利用

□世界のERL開発の現状

- 加速器の規模
- 運転状態(計画の進み具合)
- 到達している性能(ビーム電流・品質、エネルギー)

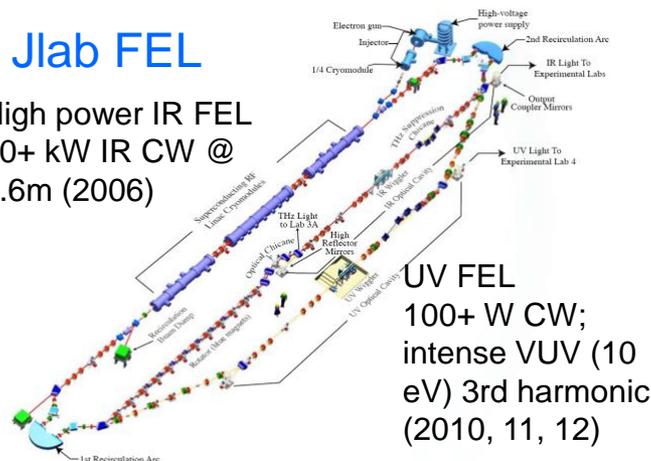
放射光利用を目的としたERL(1)

• 運転中のERL加速器(ユーザー運転加速器・試験加速器)

- JLab FEL(米国): 350 kV-DC光陰極電子銃、CW超伝導加速、135 MeV, max 9 mA
- The ALICE Facility @ Daresbury Laboratory(英国): 325 kV-DC光陰極電子銃、Pulse超伝導加速、26 MeV
- BINP(ロシア): RF電子銃、常伝導加速、マルチターン、30 mAビームのリサイクル(世界最高)
- Cornell test injector(米国): 500 kV-DC光陰極電子銃(運転は350 kV)、CW超伝導加速、8 MeV, 75 mA実証
- cERL(KEK, 日本): 500 kV-DC光陰極電子銃(運転は390 kV)、CW超伝導加速、20 MeV, max 10 mA (6.5 μ Aまで実証済み)

Jlab FEL

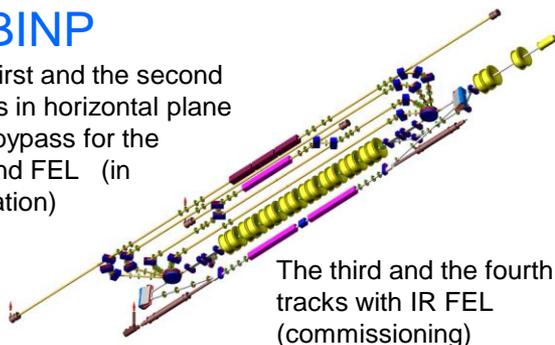
High power IR FEL
10+ kW IR CW @
1.6m (2006)



UV FEL
100+ W CW;
intense VUV (10
eV) 3rd harmonic
(2010, 11, 12)

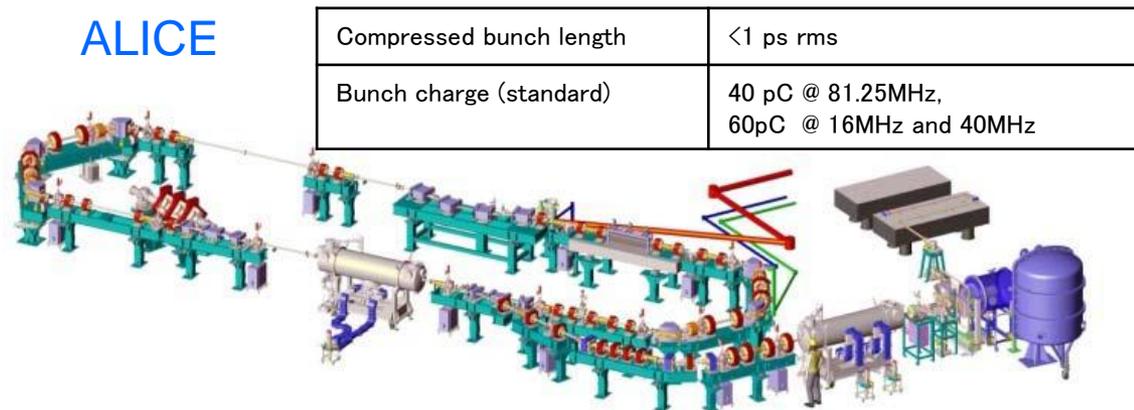
BINP

The first and the second tracks in horizontal plane with bypass for the second FEL (in operation)

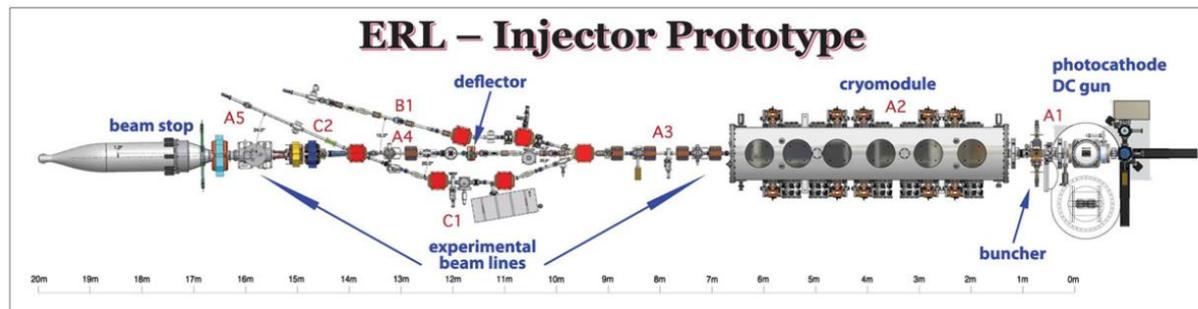


The third and the fourth tracks with IR FEL (commissioning)

ALICE



Cornell, ERL-Injector Prototype



放射光利用を目的としたERL(2)

建設・計画中のERL試験機

- bERLinPro (HZB, ドイツ) : SRF光陰極電子銃、CW超伝導加速、50 MeV, max 100 mA, $\epsilon_n < 1$ mm mrad, 77 pC
- IHEP ERL Test Facility (IHEP, 中国) : 500 kV-DC光陰極電子銃、CW超伝導加速、135 MeV, max 9 mA
- PKU-ERL (北京大学、中国) : DC-SRF injector、Pulse超伝導加速、30 MeV、 $\epsilon_n < 4$ mm mrad, 60 pC, 4 ps (FWHM)

bERLinPro

M. Abo-Bakr, IPAC14より

2015年にGun-1.1からファーストビームの予定

2019年にERL試験開始予定

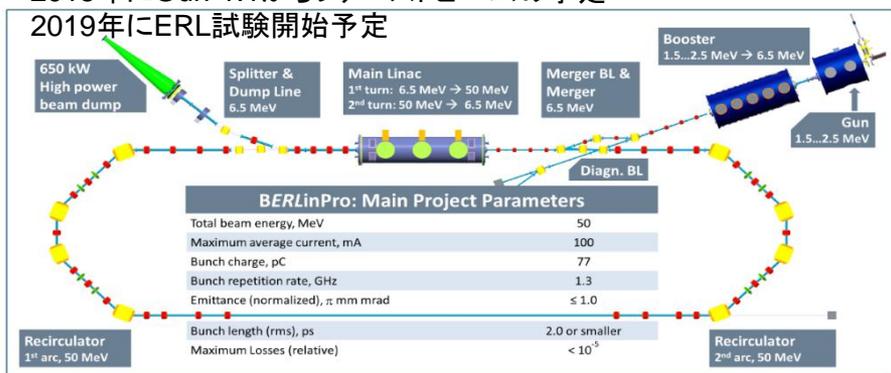
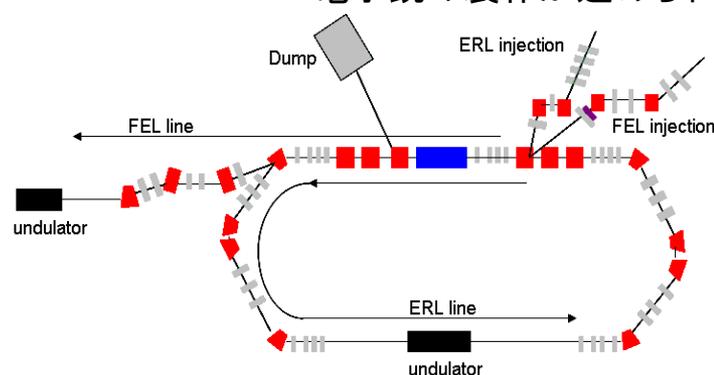


Figure 1: Draft of the major SRF and magnet components of bERLinPro with a summary of its main goal parameters.

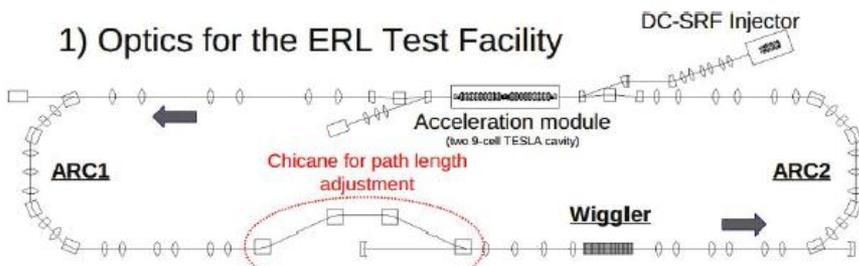
IHEP ERL Test Facility

電子銃の製作が進められている



PKU-ERL

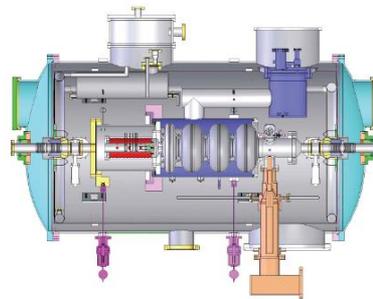
1) Optics for the ERL Test Facility



One of the lattice designs of PKU-ETF¹

CHEN, Si, KEK加速器セミナー、2014/10/22

Energy	Bunch charge	Emittance	Bunch length
30MeV	60pC	4 μ m	4ps
Energy spread	rep. rate	pulse rep. rate	pulse length
0.32% (FWHM)	81.25/26MHz	10Hz	2ms



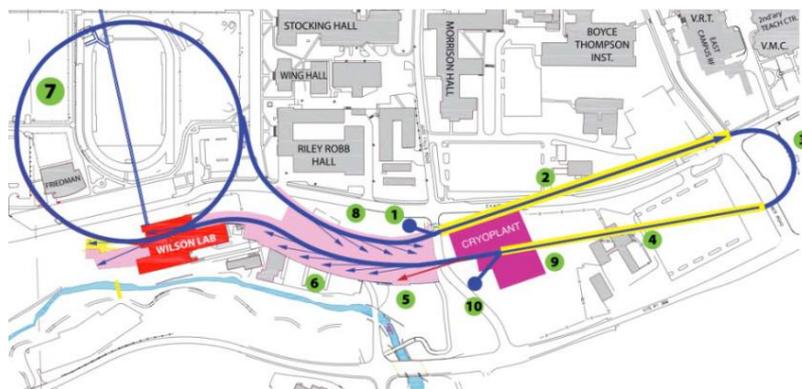
- ▶ Combination of a DC pierce gun and a 3.5-cell superconducting cavity.
- ▶ Two working modes
 - ▶ Marco pulse or continue wave mode for ERL.
 - ▶ Bunch compressor mode for coherent THz radiation.

入射器のビーム試験が開始されている

放射光利用を目的としたERL(3)

- GeVクラス放射光源利用を目的としたERL計画
 - Cornell 5 GeV ERL(米国): 5 GeV ERL、シングルターン,既存のCESRリングを利用、ビームライン:14本
 - 3 GeV ERL(KEK, 日本): 1st stageで3 GeV ERL, 2nd stageでXFEL-O、ビームライン:~30本

Cornell 5 GeV ERL Cornell ERL PDDRより

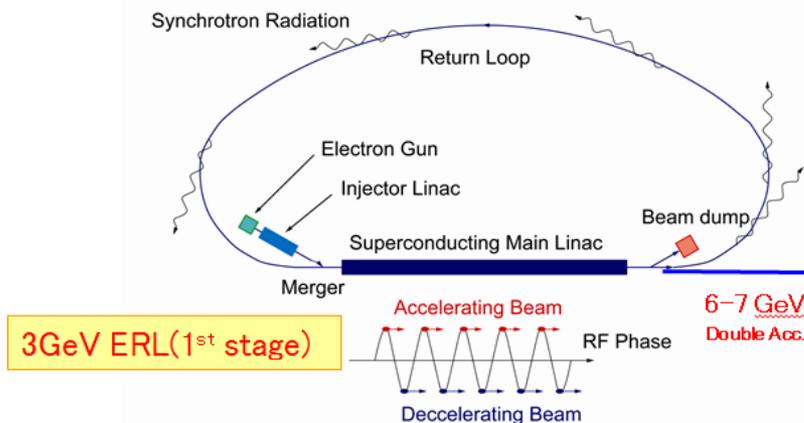


Parameter	ERL	Ring	Ring name
Horizontal emittance ϵ_x	8 pm/30 pm	1 nm	PETRA-3
Vertical emittance ϵ_y	8 pm/30 pm	1.2 pm	Australian LS
Bunch duration σ_t	2 ps	16 ps	ESRF
Energy spread σ_δ	2×10^{-4}	1×10^{-3}	typical
Current I	25 mA/100 mA	500 mA	SPring-8

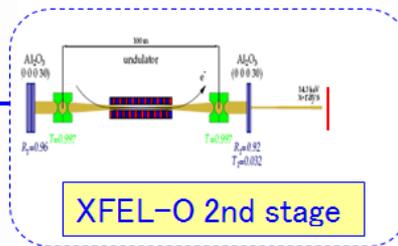
規格化エミッタンスに直すと、
 8 pm rad \Rightarrow 0.08 mm mrad
 30 pm rad \Rightarrow 0.3 mm mrad

2008年からCornell, ERL-Injector Prototypeを運転してきた
 大電流・低エミッタンス生成をリードしてきた

KEK 3 GeV ERL



2013年から試験機のcERL加速器のビーム運転を開始



放射光利用を目的としたERL(4)

- GeVクラス放射光源利用を目的としたERL計画
 - The Femto-Science-Factory (FSF)(ドイツ, HZB) : 6 GeV ERL、マルチターン, max 20 mA
 - IHEP 5 GeV ERL(中国) : phase 1で第三世代光源を建設、phase 2で5 GeV ERLを追加

The Femto-Science-Factory (FSF)

FSF LAYOUT A.N. Matveenko, IPAC14より

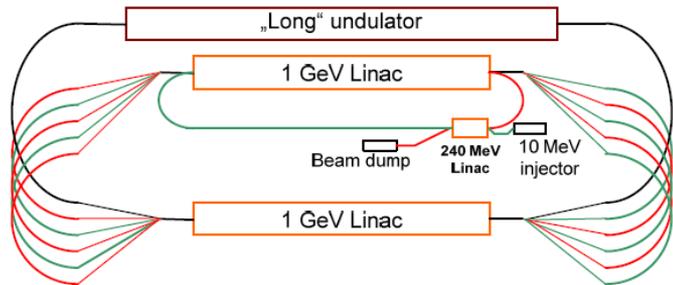


Figure 1: General layout of the FSF. Green lines – beam at acceleration, red – at deceleration, black – 6 GeV beam.

Table 1: Main Parameters of the Multi-turn ERL. Beam brilliance in 3000 period undulator in low emittance mode and 1000 period arc undulators for high brilliance and short pulse modes is given.

Accelerator/beam parameters	Low emittance mode	High brilliance mode	Short pulse mode
E, GeV	6	6	6
$\langle I \rangle$, mA	20	6.5	1.3
Q, pC	15	5	1
$\epsilon_{\perp n}, x/y$ mm	0.25/0.10	0.35/0.11	0.22/0.09
ϵ_l , keV·mm	320	21	7.8
τ , fs	1500	25	~10
$\langle B \rangle, \frac{Ph}{s \cdot mm^3 mrad^2 0.1\%}$	$4.0 \cdot 10^{22}$	$2.6 \cdot 10^{21}$	$8 \cdot 10^{20}$
$B_{peak}, \frac{Ph}{s \cdot mm^3 mrad^2 0.1\%}$	$5.4 \cdot 10^{24}$	$2.0 \cdot 10^{25}$	$\sim 1.5 \cdot 10^{25}$

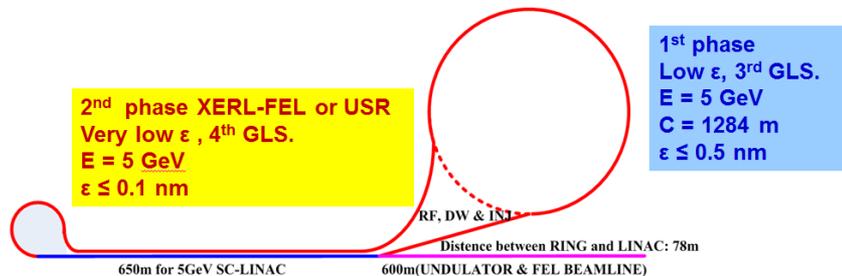
“Long” undulatorが特徴 (multi-user facilityとの記述もある)
10 fs の短パルスを作るが特徴

IHEP 5 GeV ERL

1st Phase : Low emittance 3rd light source (BAPS, 5 GeV)

2nd Phase : XERL or USR (5 GeV)

Beijing Advanced Photon Source at IHEP
(BAPS and Future Plan)



試験機に向けた電子銃開発を行っている

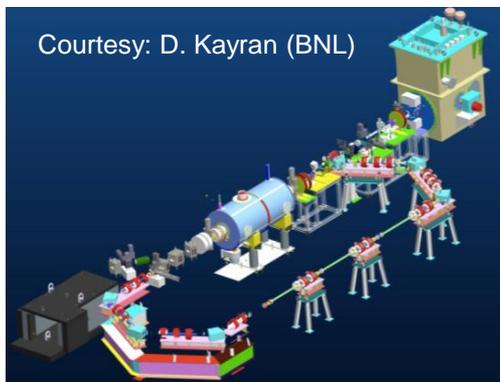
Courtesy: S. H. Wang, J. Q. Wang (IHEP)

素粒子原子核実験利用を目的としたERL(1)

- 建設・運転中のERL試験機(素粒子原子核利用)
 - The R&D Energy Recovery Linac at BNL(米国) : SRF光陰極電子銃、CW超伝導加速、20 MeV, max 350 mA
 - MESA(University of Mainz, ドイツ) : 原子核実験の電子散乱用、通常モード : 155 MeV at 150 μ A、ERLモード : 10 mA at 105 MeV

BNL, ERL R&D

	High Current	High charge
Charge per bunch, nC	0.5	5
Average current, mA	350	50
R.m.s. Normalized emittances e_x/e_y , mm*mrad	1.4/1.4	4.8/5.3
R.m.s. Bunch length, ps	18	31



R. Eichhorn, LINAC14より

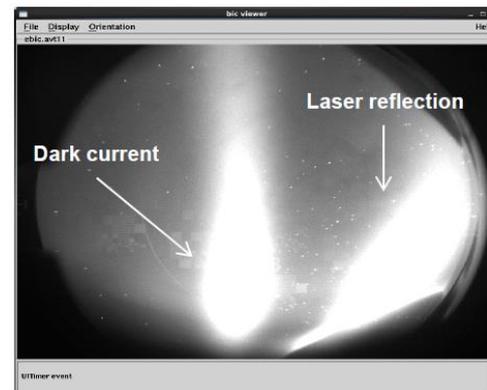
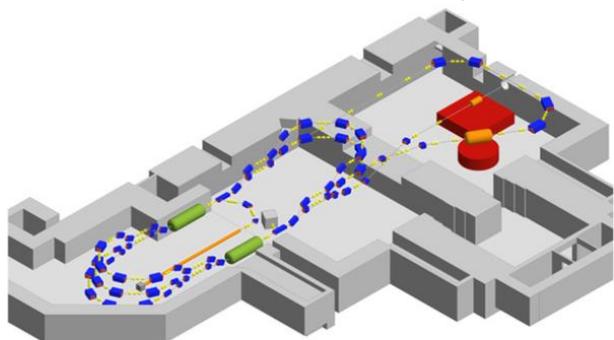


Figure 5: Dark current image taken at beam profile monitor during energy measurement at gun voltage setting of 1.2 MV, taken at the BNL SRF gun.

超伝導RF光陰極電子銃のビーム試験が開始されている
2015年にエネルギー回収試験を予定

MESA

R. Eichhorn, LINAC14より

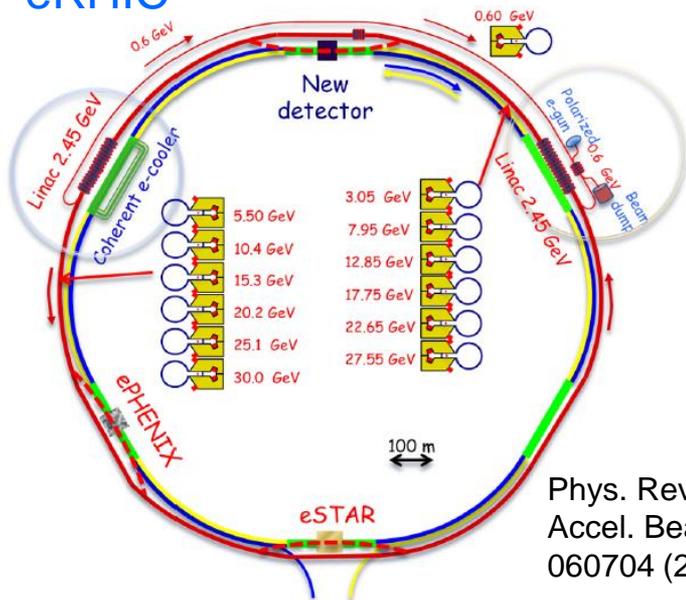


超伝導空洞のモジュールを発注している

素粒子原子核実験利用を目的としたERL(2)

- 素粒子原子核実験利用を目的としたERL計画(光源利用案もある)
 - eRHIC (future electronhadron collider at RHIC) (BNL, 米国): max 30 GeV ERL, FEL利用の場合: 1.8 GeV (Soft X-ray), 10 GeV (Hard X-ray)
 - Large Hadron electron Collider (LHeC)(CERN): 60 GeV ERL for e-p collisions

eRHIC

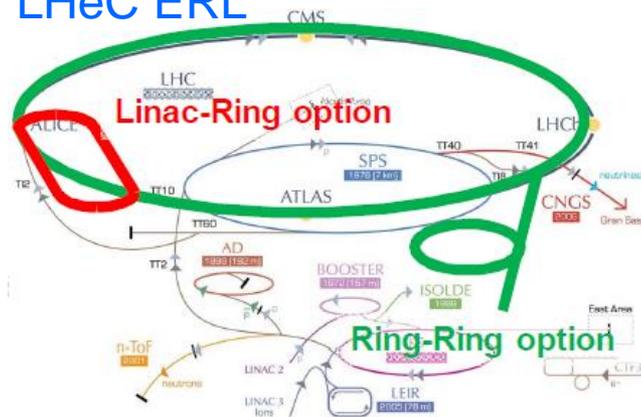


Phys. Rev. ST
Accel. Beams 16,
060704 (2013)

TABLE I. eRHIC beam parameters for FEL operation.

Name	Soft x ray	Hard x ray
Energy (GeV)	1.8	10
Bunch charge (nC)	0.2	0.2
Rms bunch length (ps)	1	1
Rms energy spread (keV)	50–200	500
Rms normalized emittance (μm)	0.6	0.2
Undulator period (cm)	1.85	3
Fundamental wavelength (nm)	1	0.1

LHeC ERL



Draft CDR completed 2011, TDR by
2014, first beam by 2022

R. Eichhorn, LINAC14より

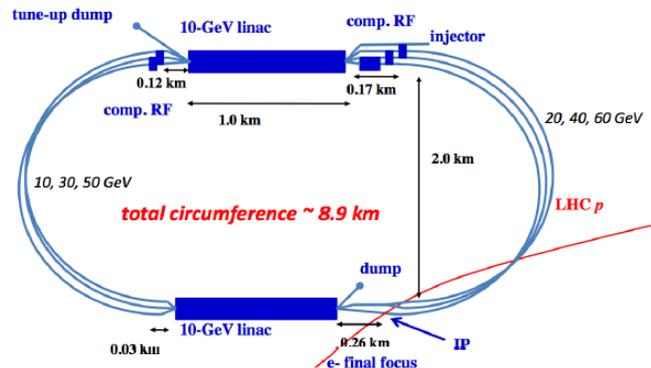
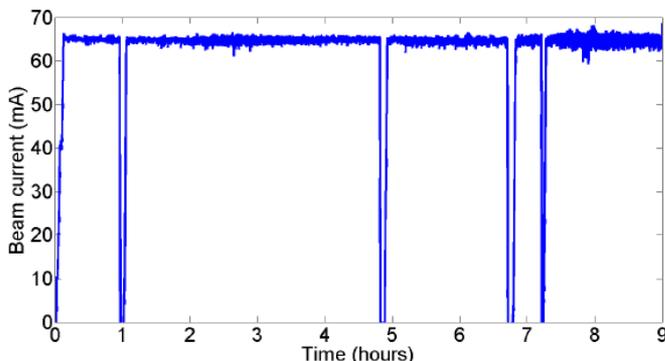


Figure 9: LHeC ERL under conceptual design at CERN.

世界のERLテスト機で実証できていること

- 大電流運転: Cornell ERL-Injector Prototype 65 mAの長時間運転(マルチアルカリカソード使用 ⇒ 寿命が長いカソード)



R. Eichhorn, LINAC14より

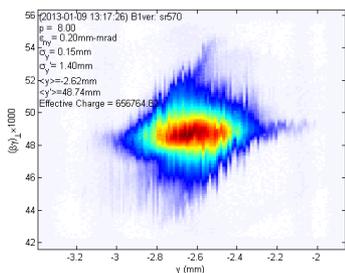
何回か中断しているが、65 mAを8時間キープしている短い時間だか 75 mA も出しているとのこと
では、この時のエミッタンスは? ⇒ よくわからない

Figure 12: Electron beam current during an 8 hour run of the Cornell photo-injector.

- 高輝度電子ビーム: Cornell ERL-Injector Prototype 65 mAの長時間運転(GaAsカソード使用 ⇒ 低エミッタンスのカソード)

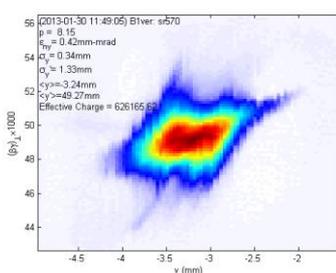
*Phys. Rev. ST-AB 15 (2012) 050703

Courtesy: I. Bazarov (Cornell University)



20 pC/bunch

vertical phase space



80 pC/bunch

vertical phase space

Normalized rms emittance (horizontal/vertical) 90% beam, $E \sim 8$ MeV, 2-3 ps rms

0.22/0.15 mm-mrad

0.49/0.29 mm-mrad

Normalized rms core* emittance (horizontal/vertical) @ core fraction (%)

0.14/0.09 mm-mrad @ 68%

0.24/0.18 mm-mrad @ 61%

非常に低いエミッタンスを実現できている
では、この時の平均電流とカソード寿命は?

低エミッタンス・大電流・長寿命の3つの両立がユーザー運転には必要

試験機開発 (compact ERL) の現状

□ cERL開発の目標

- 要素技術開発: 電子銃 (500 kV, 10 mAから段階的に増強)・超伝導空洞 (15 MV/m)
- エネルギー回収・加速器総合性能の実証 (少なくとも規格化エミッタンス 1 mm mrad 以下)

□ cERL運転の現状

- エネルギー回収に成功 (20 MeV, 6.5 μ A)

□ cERL運転によって課題に対してどこまで答えを出しているか?

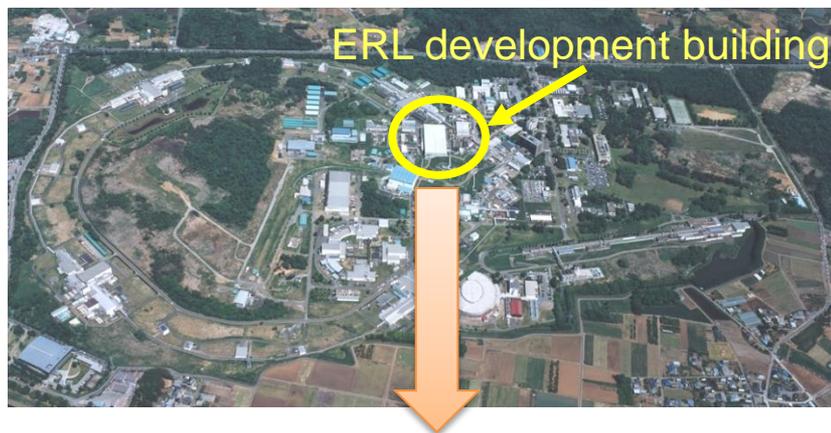
- 電子銃: 500 kVは見えてきた、大電流生成・寿命試験はまだ
- 超伝導空洞: 安定な運転はできた、加速勾配向上が課題
- ビーム性能: ビーム性能はまだ目標に届いていない

実証機としての compact ERL (cERL)

ERLを構成する基本要素をすべて含む

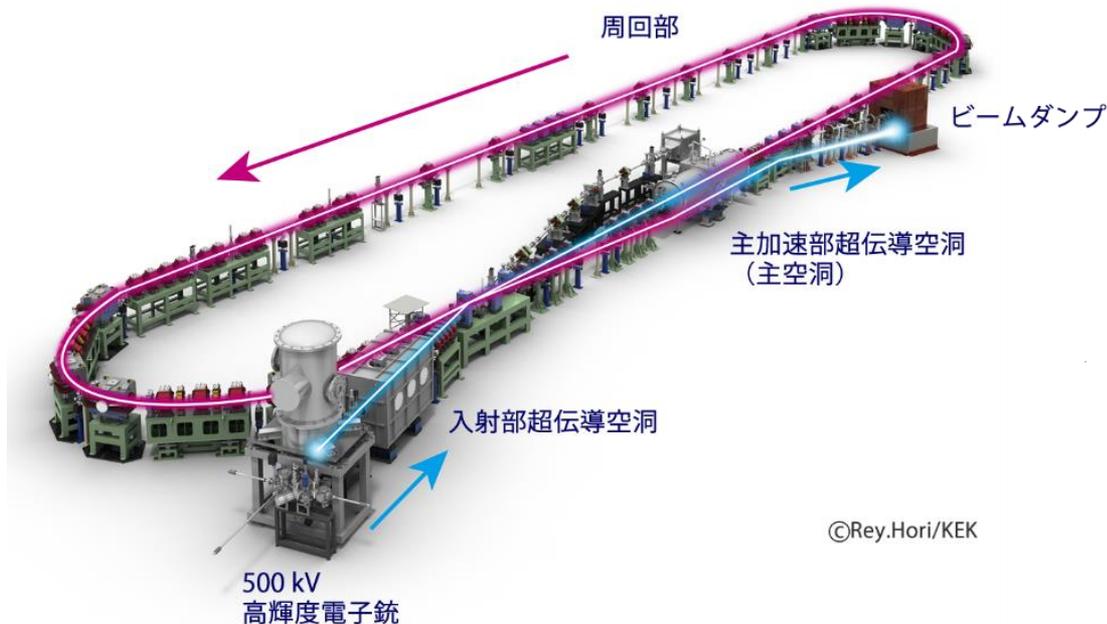
compact ERLの目的

- ・ 鍵となる装置のR&Dと安定な運転の実証
- ・ 超低エミッタンスビームの生成・加速
- ・ エネルギー回収の実証



Parameters of the Compact ERL

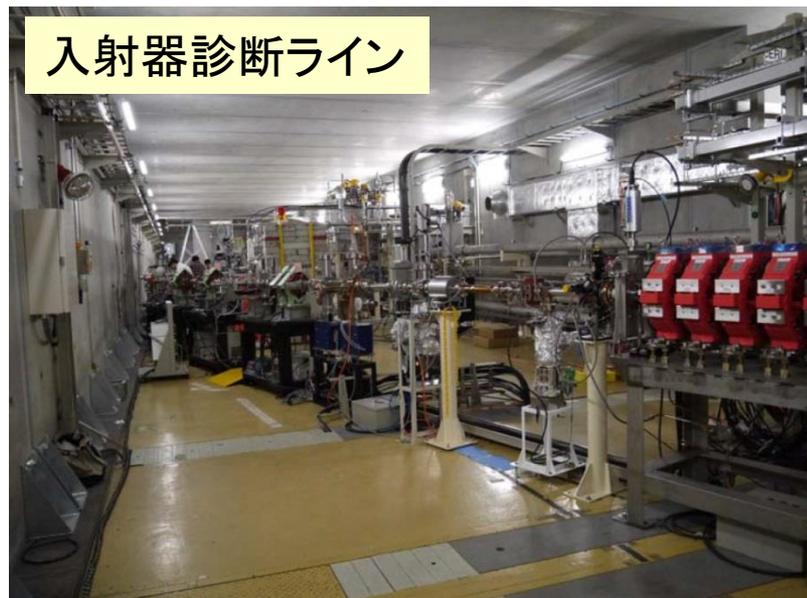
	Parameters
Beam energy (upgradability)	35 MeV 125 MeV (single loop) 245 MeV (double loops)
Injection energy	5 MeV
Average current	10 mA (100 mA in future)
Acc. gradient (main linac)	15 MV/m
Normalized emittance	0.1 mm·mrad (7.7 pC) 1 mm·mrad (77 pC)
Bunch length (rms)	1 - 3 ps (usual) ~ 100 fs (with B.C.)
RF frequency	1.3 GHz



©Rey.Hori/KEK

cERL入射器を構成する装置

- 光陰極DC電子銃 (JAEAで開発): 500 kV, 10 mA
 - 高電圧印加試験を経て、**390 kVで運転**
- 入射器超伝導空洞
 - 2-cell 空洞3台
 - 大電力試験を経て、**最大 7 MV/m で運転**
- 入射器診断ライン
 - 入射器で生成されたビームの品質(エミッタンス、バンチ長等)を診断
 - スクリーンモニタ、ストリップラインモニタ、スリットスキャナ、Faraday cup, 偏向空洞、16度偏向電磁石

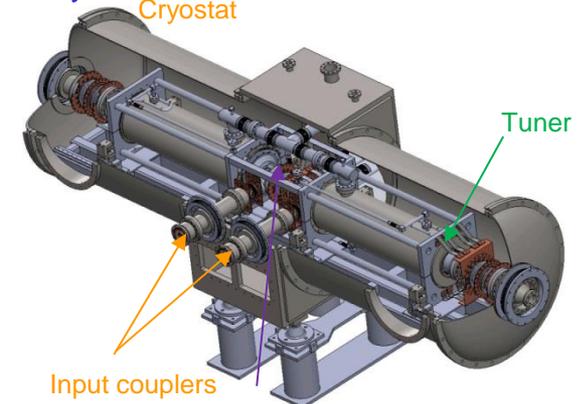


cERL周回部を構成する装置

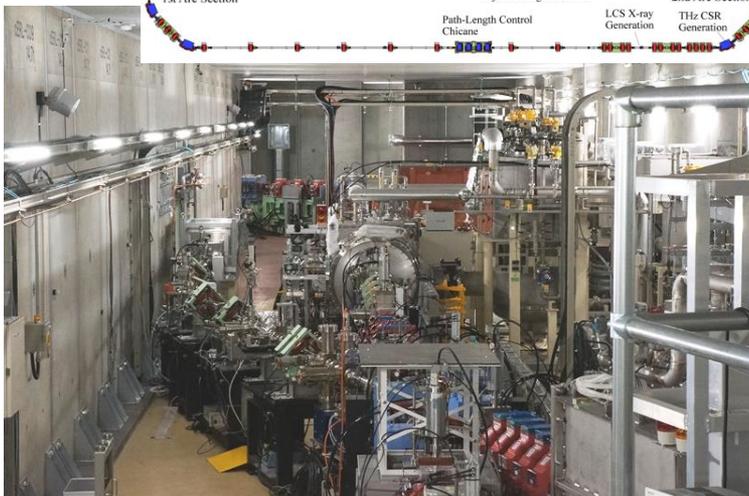
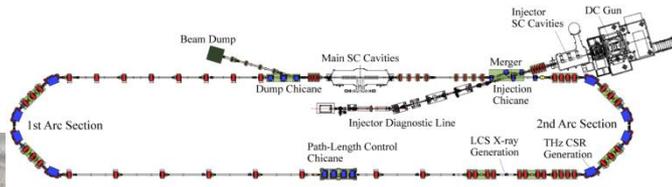
- 主空洞(周回部超伝導空洞)
 - 9-cell空洞2台(性能評価試験では、16 MVに到達)
 - He lossの増大、およびfield emissionによる放射線増大を考慮し、**1台あたり8.57MVで運転**
 - 加速後のエネルギー: **19.4 MeV**
- 周回部
 - アーク部(第1、第2)、長直線部、周長補正シケインで構成
 - スクリーンモニタ、BPMを配置
 - 周回ビームが入射ビームに合流する直前にFaraday cup
- 主ダンプリン
 - 主空洞下流に減速ビームを捨てるダンプリン

主空洞

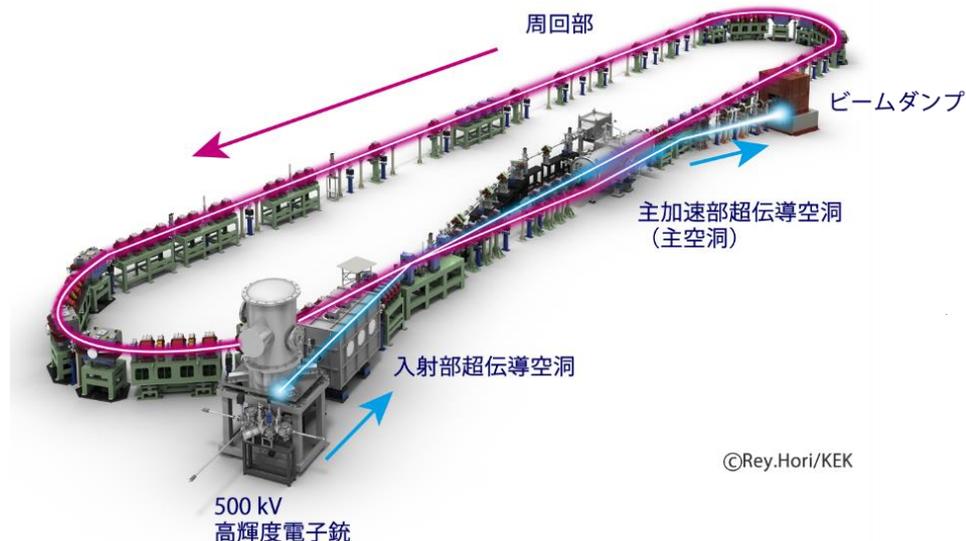
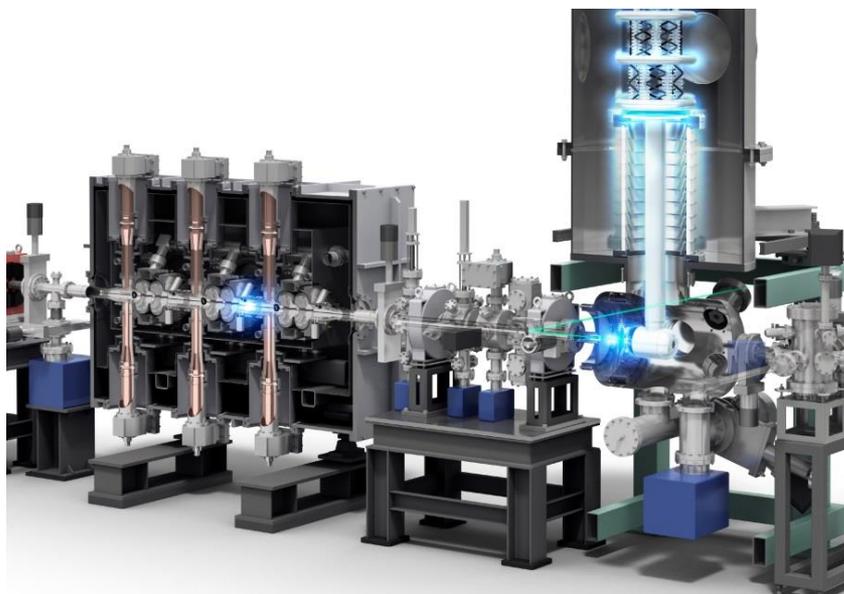
9-cell超伝導空洞
Main-Linac Cryomodule
Cryostat



周回部



cERLコミッショニングでの目標設定(初期段階)



©Rey.Hori/KEK

cERL入射器の最終目標

Gun voltage	500 kV
Beam energy	5 – 10 MeV
Beam current	10 – 100 mA
Normalized rms emittance	1 mm·mrad (77 pC/bunch) 0.1 mm·mrad (7.7 pC/bunch)
Bunch length (rms)	1 – 3 ps (0.3 – 0.9 mm)

これらの性能を実現するには、
500 kV, 15 MV/mの加速電圧・勾配が必要

- 加速電圧は低めで運転
 - 施設検査までの時間が限られている
- ⇒ より現実的な目標を設定する

コミッショニングの目標(初期段階)

- 電子銃からの電子ビーム生成
- 超伝導空洞での安定な加速
- 品質を保持したビーム輸送 (7.7 pC/bunch) ($\epsilon_n < 1$ mm mrad のエミッタンス)
- 周回部輸送
- エネルギー回収
- ビーム電流増強 (最大1 μ A ⇒ 10 μ A)

cERLのビーム運転

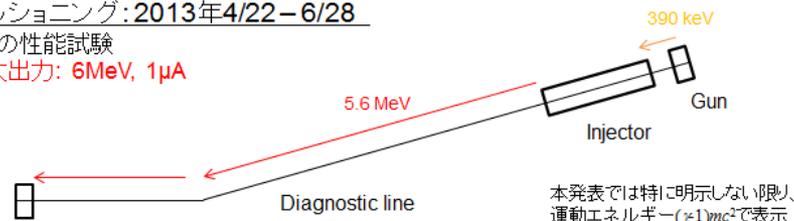
- 2013年4月から運転開始(1年半が経過している)
 - 2013年4月～6月: 入射器単体でのビーム試験(入射器5.6 MeV)
 - 2013年12月～2014年6月: cERL全体でのビーム試験(入射器2.4 MeV, 周回部19.4 MeV)

ビーム電流の推移

- 最大1 μA (2013年6月まで) \Rightarrow 最大10 μA (2014年6月まで) \Rightarrow 最大0.1 mA (2015年1月から)
- 段階的にビーム電流を増強している

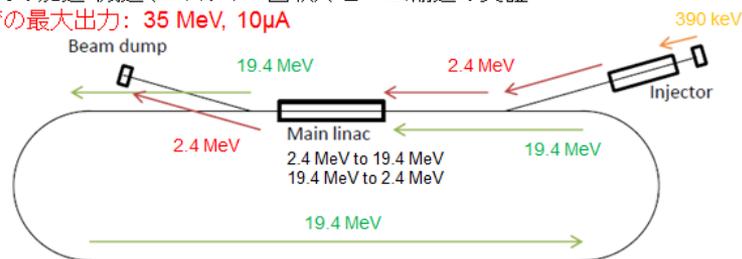
cERL入射器コミッショニング: 2013年4/22-6/28

目的: 入射器単体での性能試験
放射線申請での最大出力: 6MeV, 1 μA



cERL全体でのコミッショニング: 2013年12/16-12/21, 2014年1/30-3/14

2013年7月～11月に周回部を建設
目的: 主空洞での加速・減速(エネルギー回収)、ビーム輸送の実証
放射線申請での最大出力: 35 MeV, 10 μA



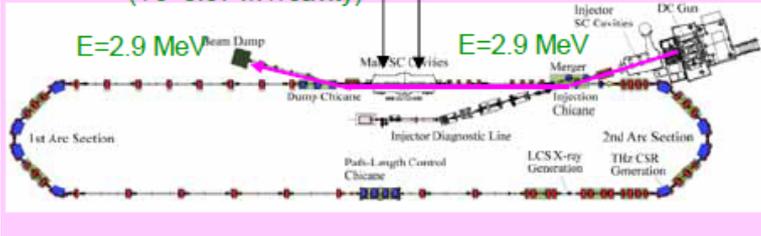
ここで紹介する項目

- エネルギー回収の実証
- 機器の運転状況(電子銃と超伝導空洞): 機器の性能、安定性はどうか?
- ビーム性能: 電流、ビーム品質、安定性はどうか?
- cERLの運転を通してどのようなことがわかってきたか?

エネルギー回収の実証

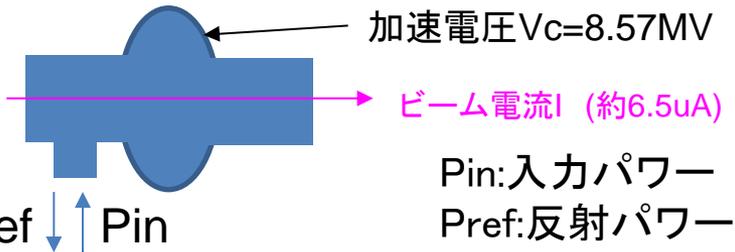
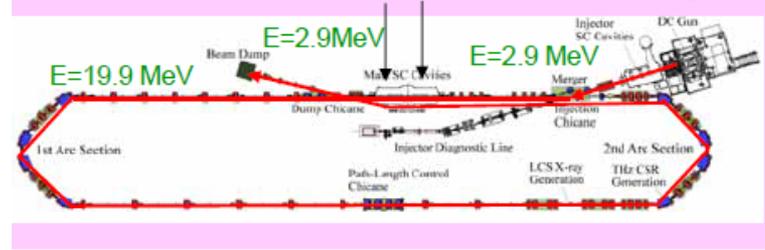
Non-ERL operation (beam loading test)

Cavity 2: deceleration ($V_c=8.57$ MV/cavity)
 Cavity 1: acceleration ($V_c=8.57$ MV/cavity)



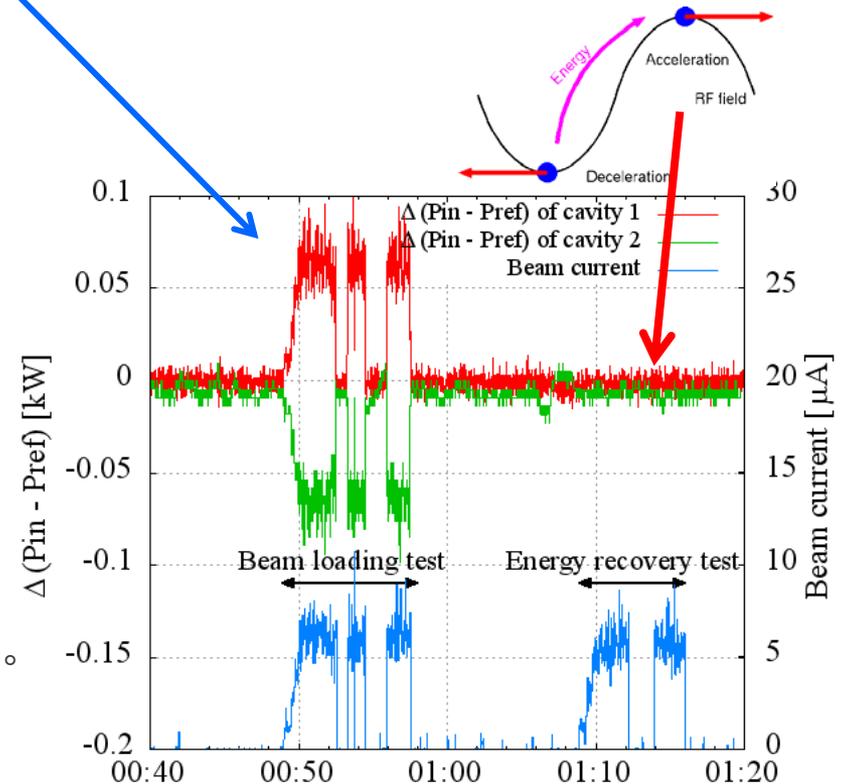
ERL operation

Cavity 1 and 2: acceleration (1st passage) and deceleration (2nd passage)



入力パワーと反射パワーの差 : $Pin - Pref$

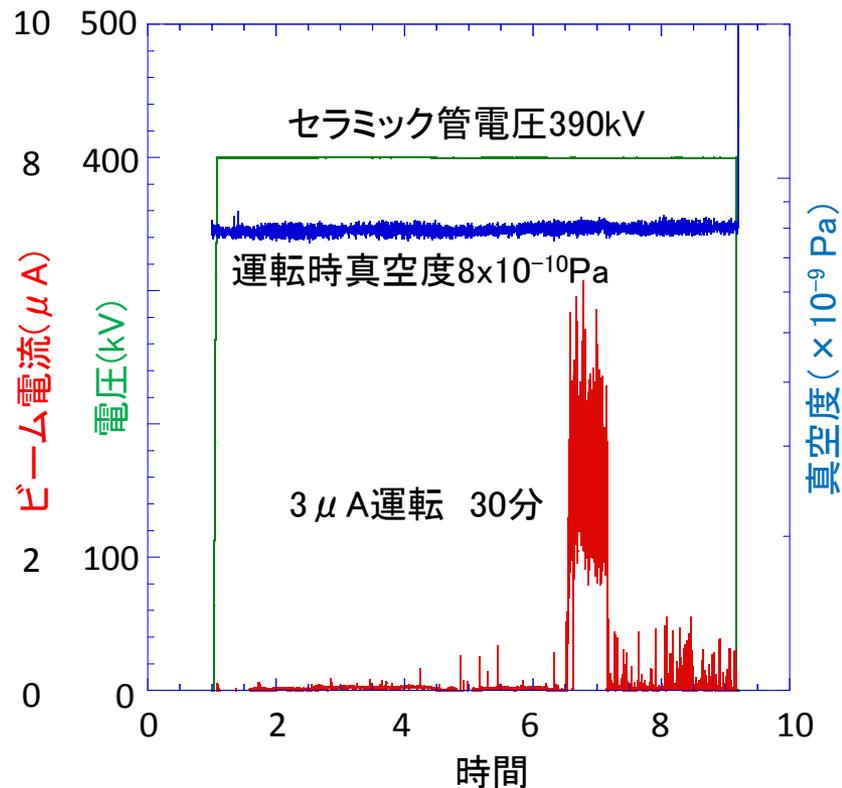
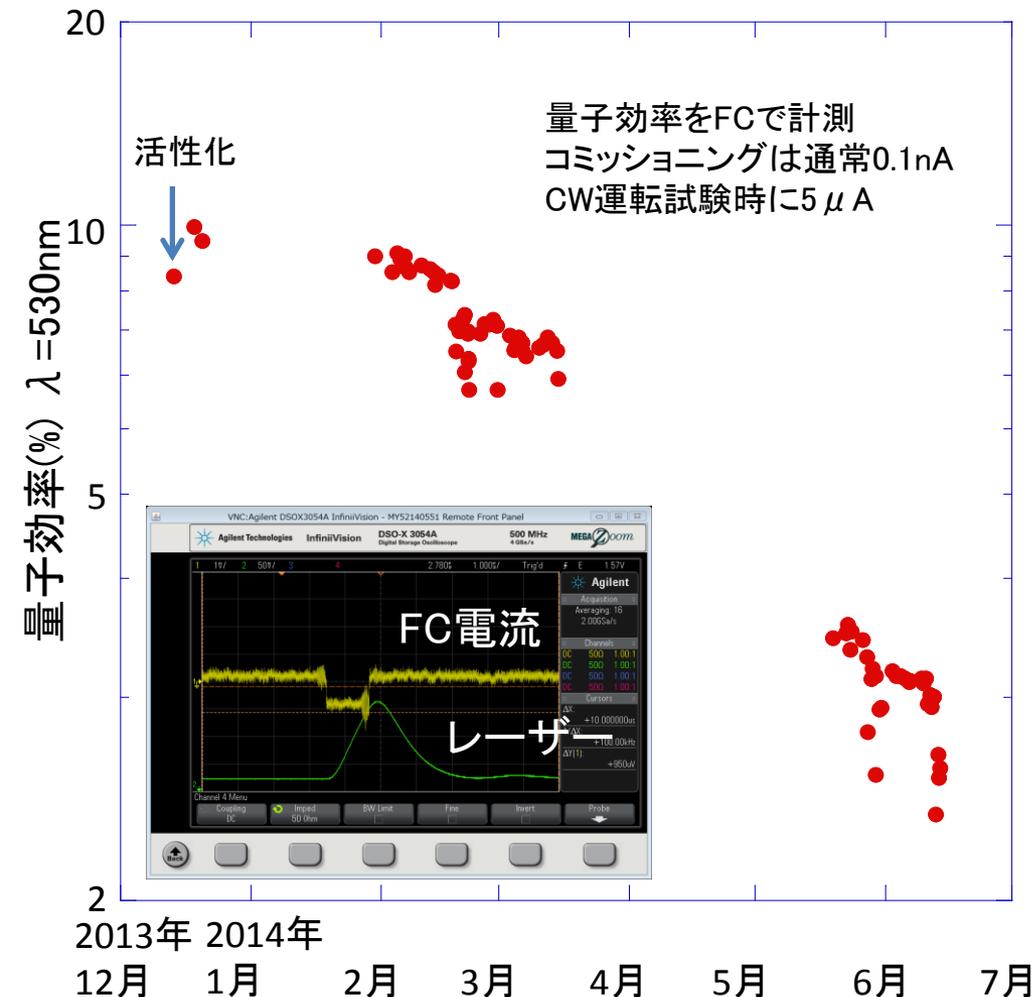
- ・ エネルギー回収試験
エネルギーのやりとりができていない場合、 $Pin - Pref$ はビーム電流によらず一定。
- ・ ビームローディング試験
加速・減速のみの場合、エネルギー収支がゼロでない。
ビーム電流によって入力・反射パワーに変化がある。



電子銃の現状と今後の開発(1)

GaAs光陰極量子効率(周回部コミッシュヨニング時)

電子銃電圧、真空



- ・ 6か月交換なしで、2%以上の量子効率
- ・ 390 kV運転 (延べ500時間以上)
- ・ 運転時極高真空の達成

島田美帆、2014年加速器学会年会より

電子銃の現状と今後の開発(2)

N. Nishimori,
S. Sakanaka
ERL2013発表資料より

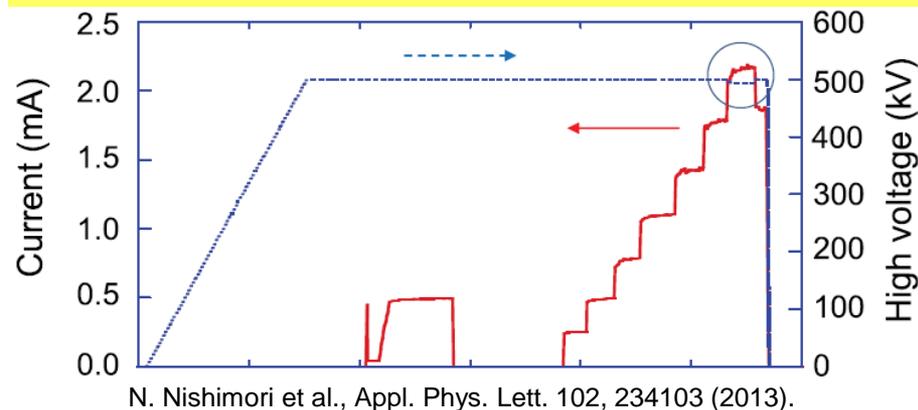
電子銃の現状

- **高品質**: 低電流で達成 (0.07 mm·mrad @10fC, 390 kV)
- **大電流**:
 - 500 kV で 1.8 mA、低電圧で10mAを達成(100 mAには新たな電源が必要)
 - cERL全体としては、390 kV, 6.5 μ Aを達成
- **長時間**: 390 kV 低電流で達成(~ 260 hours)
 - 高電圧に起因する停止はなし(下流の真空悪化による停止は1回あり)

- 高品質かつ大電流: **これから**
- 大電流かつ長時間: **これから**
- 高品質・大電流・長時間: **これから**

ピーク性能だけではない真の性能へ

電子銃単体試験: 500-keV, 1.8 mA 生成を達成



現状の性能から次の段階に向けて

- **大電流化**: 100 mA用の電源の設計検討を進めている
- **長寿命化**: 「GaAs + 極高真空での性能検証」 + 「GaAsカソードに代わる材質の開発」
⇒ マルチアルカリカソードの開発(エミッタンスもそれほど上がらずに、カソード寿命が長いという報告、米国コーネル大学)
- **マルチアルカリカソード開発**: JAEA, 広島大学を中心として、開発を進めている(2015年にcERLおよびKEKで開発している第二電子銃に組み込んで検証を開始する予定)

超伝導空洞の現状と今後の課題

E. Kako, et. al.,
H. Sakai, et. al.

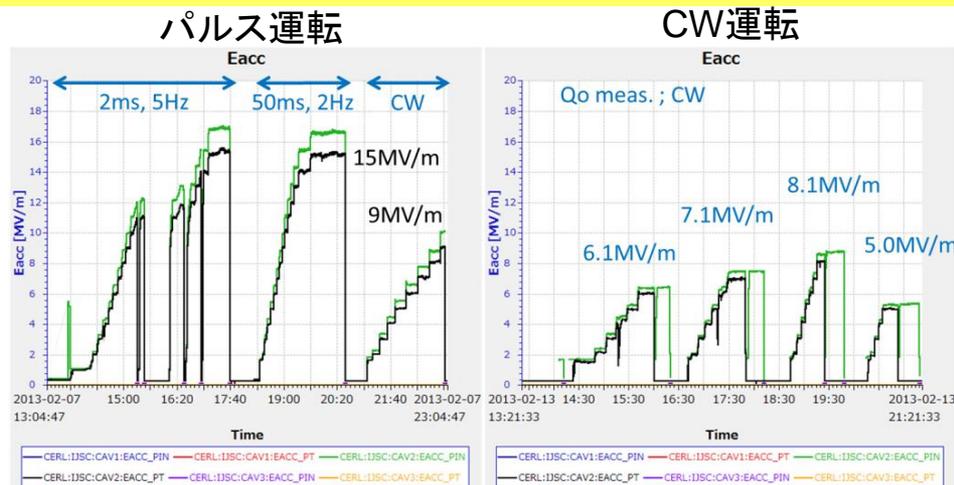
入射器超伝導空洞の現状

- 高い加速勾配: 7.1 MV/m を達成
- 大電流の加速: 6.5 μ A の加速を達成 (3.3 MV/m)
- 長時間: 7.1 MV/m 運転では非常に安定 (~260 hours)
- cERL 全体としては、3.3 MV/m で非常に安定な運転を達成
- 高い加速勾配かつ大電流: **これから**

主空洞の現状

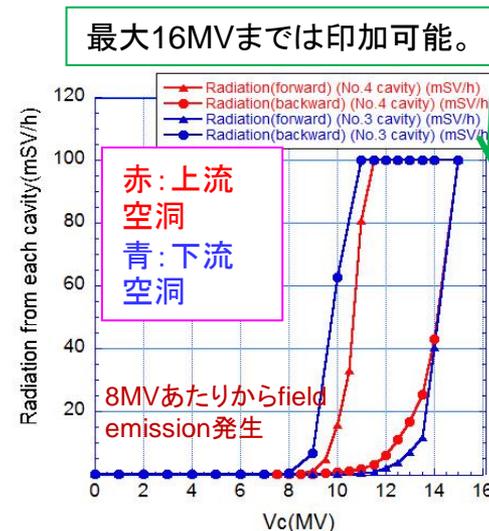
- 高い加速電圧: 8.57 MV を達成
- 大電流の加速: 6.5 μ A の加速を達成
- 長時間: 8.57 MV 運転ではかなり安定 (2014年5/20~6/20の停止回数:20回、全て対処可能なものである)
- 運転開始3週間後に、空洞のfield emissionの増大が見られたが、pulse agingによって回復できることがわかった。
- 最終ターゲットの15 MV/mの安定運転はこれからの課題
- 高い加速電圧かつ大電流: **これから**

入射器空洞単体での性能試験



主空洞単体での性能試験

長期運転への一つのアプローチを確立



空洞の加速電圧は16MVまで到達するが、field emissionによるradiation増加がみられた。

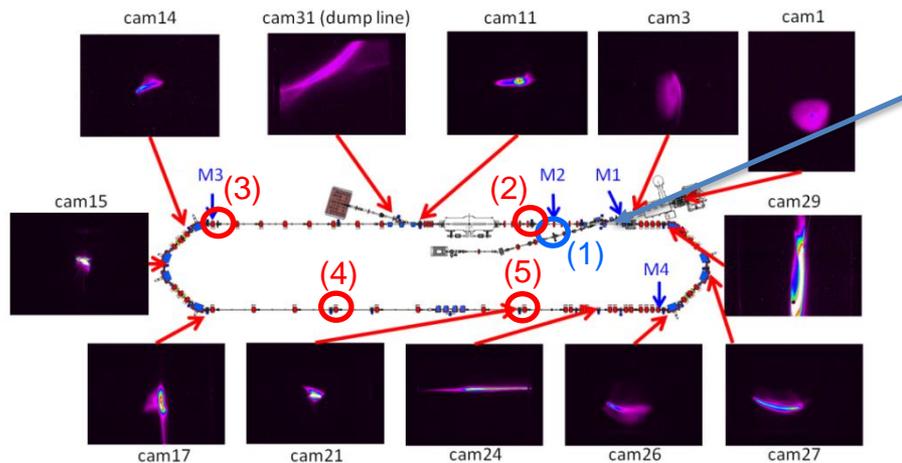
ビーム性能開発の現状と今後の課題(2)

空間電荷効果が支配的な高バンチ電荷(7.7 pC/bunch)の輸送試験の結果

- ・ 周回部輸送調整: **9割が周回部FCに到達**
- ・ ビーム品質測定結果: 入射器 2.9 MeV, 周回部 19.9 MeV
 規格化エミッタンス(設計 0.6 mm mrad): **2.9 mm mrad**(診断ライン)
2.9 mm mrad(周回部第一アーク手前)、**5.8 mm mrad**(周回部南直線部)
 バンチ長(設計 4 ps): **5.5 ps**(診断ライン)

規格化エミッタンスの測定結果 ($\varepsilon_{nx} / \varepsilon_{ny}$), 単位 mm mrad

運転モード	(1)入射器診断部	(2)主空洞前	(3)主空洞後	(4)第一アーク後	(5)第二アーク前
20 fC (6/13)	-	0.15 / 0.14	0.14 / 0.12	0.14 / 0.14	0.13 / 0.15
7.7 pC (6/19)	-	-	-	42 / 14.7	-
7.7 pC (6/20)	2.5 / 2.9	-	2.9 / 2.4	5.8 / 4.6	-



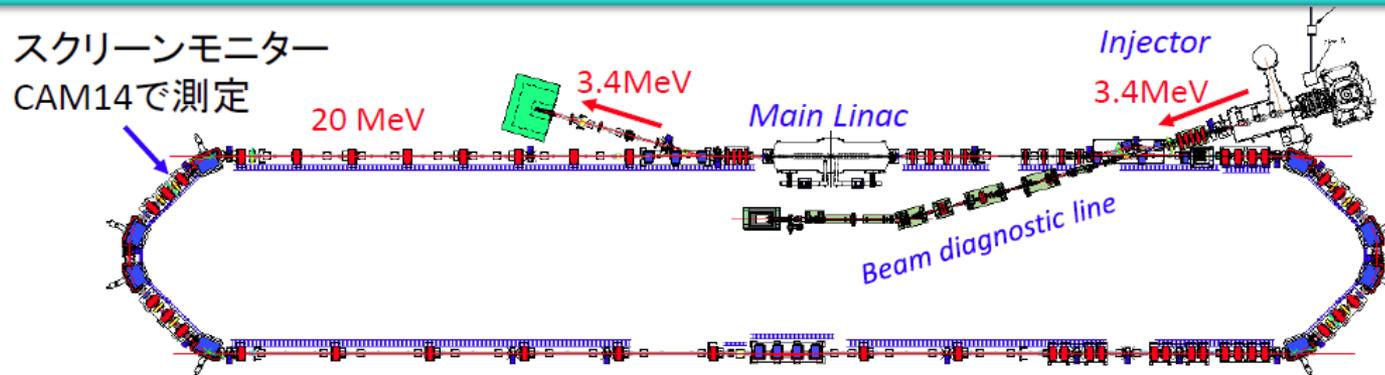
周回部Faraday cup に90%のビームが到達



低バンチ電荷: ほぼ電子源のエミッタンスを保持できた
 高バンチ電荷での調整法の確立が、今後の課題

ビーム性能開発の現状と今後の課題(3)

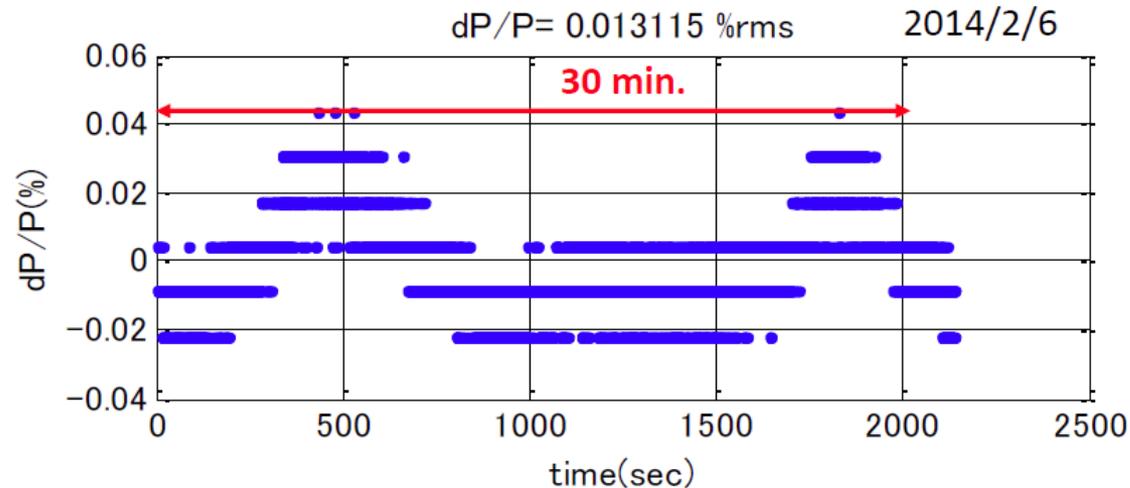
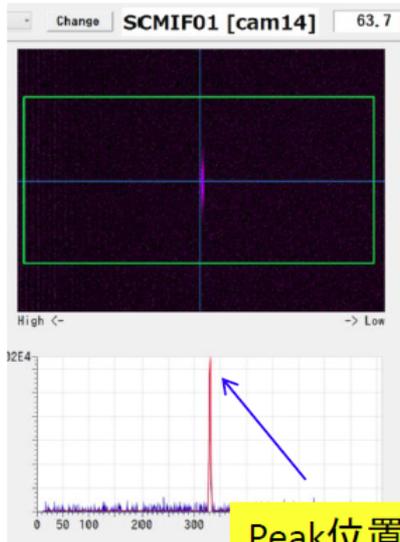
Momentum Jitter for Total Energy



Dispersion : $\eta_x = 0.487\text{m}$

Beam: 5Hz, 3ps rms, 23 fC, total Energy=20 MeV

63.7 $\mu\text{m}/\text{pixel}$



ゆっくりとしたエネルギーの変動が見られた。
原因は、今後のStudyで調査したい

25 25

三浦孝子、2014年加速器研究施設交流会資料より

ビーム性能開発の現状と今後の課題(4)

ビーム性能向上に向けた今後の課題と対策

- **低エネルギー領域のビームの取扱い**
 - 環境磁場(地磁気、予期せぬ磁場(CCGの磁石、クレーン、ビーム近傍の磁性体)、電磁石の残留磁場等)の制御
- **低電荷(空間電荷効果が効かない)ビームの輸送法の改善**
 - 入射器空洞を通過するとき、エミッタンスが悪化することがわかっている
 - 空洞内のビーム軌道、位相の調整がまだ不十分 ⇒ 2015年5月からの運転で対策していく
- **大電荷(空間電荷効果が支配的な)ビームの輸送**
 - モデルとのずれが大きい ⇒ 空間電荷効果を理解するためのビーム試験を続ける
 - 6次元位相空間の情報(ビームサイズ、バンチ長、エネルギー拡がり等)が必要になるので、まずは診断ラインを活用する
- **ビーム調整法の更なる精度向上**
 - シングルキック応答測定等の基礎的な測定を行っている
 - 異なるエネルギーのビームが通過する部分の軌道・オプティクス調整
 - 現状の転送行列を確認するとともに、オプティクスマッチングの精度を向上させる

ERL光源の課題に対するcERLの検証経過

- 光源利用に向けたERL加速器実現の課題(未知数は何か?)
 - **高輝度・大電流電子ビームの生成**: 500 kV で 1.8 mA生成(電子銃単体)、390 kV で 6.5 μ A生成(cERL周回運転)。カソード単体でのエミッタンスは0.07 mm \cdot mrad @10fC, 390 kV。「**高品質・大電流・長時間**」の両立の実証がこれからの課題。
 - **大電流電子ビームの加速**: 8.5 MV/m で 6.5 μ A のCW運転を実証。大電流加速試験は電子源の増強に合わせて進める。実用的な加速勾配に合わせて、3 GeV ERL光源設計の修正が必要(加速勾配によって加速器の「長さ」が決まる)。
 - **ビーム性能**: 低バンチ電荷(空間電荷なし)では、初期エミッタンスを保持して周回運転できた。高バンチ電荷での空間電荷効果補償法の確立がこれからの課題。
 - **安定性(長時間・安定に、一様に)**: 低電流運転ではカソード寿命が長いことは確認できた。大電流電寿命試験がこれからの課題。電子銃・超伝導空洞の運転安定性は高いことが確認されつつある(ただし、空洞の台数はまだ少ない)。ビーム品質の安定性の評価はこれからの課題。0.01 %程度のエネルギー変動で安定であった。
 - **運転コスト**: 超伝導空洞は一度冷やしたらずっと運転し続けないと効率が悪い。cERL運転の電力は1.1 MW(このうち、およそ半分が冷凍機の電力)。注:3 GeV ERLでは冷凍機の構成が異なるので、これの外挿とはならない。
 - **放射線遮蔽**: 6.5 μ Aではまだ問題にはならない。ビームダンプ以外でのビーム損失箇所・量の評価を進めている。



2013年から運転を開始して、少しずつ回答を出しつつある
この結果をERLの光源利用に今後反映していく

今後の展望

□ cERLにおける実証試験の継続とユーザー利用

- レーザーコンプトン散乱によるX線生成
- CSRを利用したTHz光源

□ 3GeV-ERL光源設計へのフィードバック

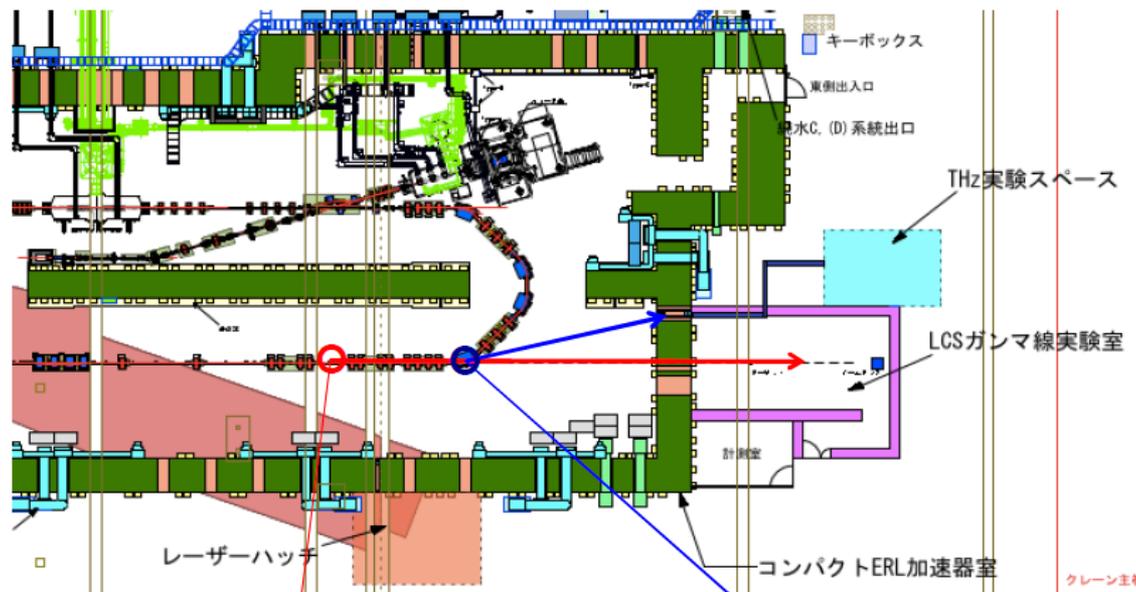
- 最初から全部両立できるではなくて、達成できることから段階的に運転してアップグレードする方向性もあるのでは？

□ 新たな展開

- 「先端性・汎用性」から「先端性」を活かした方向への可能性
- EUV-FEL, CW-FEL, XFEL-O ⇒ 詳しくは[阪井さんの発表](#)

cERLにおける実証試験の継続とユーザー利用

- 実証試験での次の項目
 - 空間電荷効果の支配的な高バンチ電荷でのビーム輸送法の確立
 - ビーム電流の段階的増強(放射線申請を着実にクリアする): 0.1 mA(2015年1月~)、1 mA(2015年度)、10 mA(2016年度?)、100 mA(電源増強が必要)
- ユーザー利用に向けた準備
 - レーザーコンプトン散乱によるX線・γ線の生成・利用
 - コヒーレントTHz(CSR-THz)光の生成・利用



レーザーコンプトン散乱(LCS)X線/γ線の発生

- 極小電子ビームの生成
- 電子ビームとレーザーとのコンプトン散乱X線
- 2014年度開始予定(2015年1月から)

コヒーレント・テラヘルツ光(CSR-THz)の発生

- 超短バンチ電子ビームの生成(<100fs)
- 第2アーク部偏向電磁石からのコヒーレント放射
- 2015年度開始予定

3GeV-ERL光源設計へのフィードバック

機器の現実的な性能のフィードバック

- 超伝導加速空洞の現実的な加速勾配が見えてきた ⇒ 加速器の大きさに直結するので、全体デザインの修正が必要
- カソード交換による中断時間の低減: ユーザー運転の中断時間を極力短くするための準備を進めている(複数のカソードを同時活性化しそれを保管 ⇒ 3つの同時活性化を実証)。交換時間は1回10分程度。
- カソードの寿命: 1日程度の寿命があれば、1日1回10分程度の中断時間を狙える

運転モードの見直し

- 3 GeV ERL光源の最終(限界)性能は示されてきたが、到達する道筋があまり見えていないのではないかな?
- 段階的に性能向上を図れる道筋を示していきたい
- 現状: **ビーム性能を制限するのは電子源**
- 電子源の重要な点: 運転を続けながらも、別施設で開発継続が可能。段階的にアップグレードできる。
- 例えば、10 mA で運転開始。100 mAの電子源が開発できたらそれにアップグレード。

Table 1-1 Target parameters of the 3-GeV ERL which is integrated with the X-ray free-electron-laser oscillator (XFEL-O).

	Operation modes				
	High-coherence mode	High-flux mode	Ultimate mode	Ultra short-pulse mode	XFEL-O
Beam energy (E)	3 GeV				6-7 GeV
Average beam current (I_b)	10 mA	100 mA	100 mA	Typically, 77 μ A (flexible)	20 μ A
Charge/bunch (q_b)	7.7 pC	77 pC	77 pC	Typically, 77 pC (flexible)	20 pC
Repetition rate of bunches (f_{rep})	1.3 GHz	1.3 GHz	1.3 GHz	Typically, 1 MHz (flexible)	1 MHz
Normalized beam emittances ($\epsilon_{mx}, \epsilon_{my}$)	0.1 mm-mrad	1 mm-mrad	0.1 mm-mrad	To be investigated (typically, 1-10 mm-mrad)	0.2 mm-mrad
Beam emittances at full beam energy (ϵ_x, ϵ_y)	17 pm-rad	170 pm-rad	17 pm-rad	To be investigated (typically, 0.2-2 nm-rad)	15 pm-rad
Energy spread of beams; in rms (σ_E/E)	2×10^{-4}	2×10^{-4}	2×10^{-4}	To be investigated	5×10^{-5}
Bunch length; in rms (σ_t)	2 ps	2 ps	2 ps	100 fs	1 ps

○加速器性能の段階的なアップグレード案

Middle-coherence (cERLで1~2年後にテストできそう):
10 mA, 0.3~0.5 mm mrad



High-coherence:
10 mA, 0.1 mm mrad (エミッタンスはほぼ限界)



High-flux:
100 mA, 1 mm mrad (電子源開発が必要)



Ultimate-mode:
100 mA, 0.1 mm mrad (エミッタンスが非常に厳しい)

新たな展開の可能性

- ERL加速器開発での重要なこと：大電流を生成して加速すること
 - 大電流を生成可能な電子源の開発
 - 大電流を加速可能な超伝導空洞の開発
- これらの要素技術 ⇒ LCLS-IIのような高繰り返しX線FELの実現に必要な技術
- 一つの方向性として、ERLでの開発を基礎においた高繰り返し線形加速器型光源もありうるのではないか？
- 最終的には、XFEL-Oの加速器としての利用がゴールか
- ERL光源で目指してきたこと：「先端性」と「汎用性」の両立
 - 「先端性」を活かした方向性もありうるのではないか？
 - EUV光源として、ERL+FELが注目を集めつつある ⇒ 半導体のリソグラフィー用の光源
 - 平均電流 10 mA がターゲットになるので、設計条件がかなり緩和される
- 新たな展開の可能性の詳細については、[阪井さんの発表](#)を参照して下さい

まとめ

まとめ (cERLの運転)

- cERL入射器コミッショニングで達成した項目
- 加速後の規格化エミッタンス ⇒ **最初の目標 ($\varepsilon_n < 1$ mm mrad) はとりあえず達成**
 - 0.17mm mrad (~ 10 fC/bunch) ⇒ 次の目標の 0.1 mm mradに近いがまだ調整が必要
 - ~ 0.8 mm mrad (7.7 pC/bunch) ⇒ 次の目標の 0.3 mm mrad に到達する調整は今後の課題
- ERLの鍵となる電子銃、入射器超伝導空洞ともに非常に安定であった

- cERL全体(周回部)コミッショニングで達成した項目
- **6.5 μ A, CW運転でのエネルギー回収を実証** ⇒ **大きなmilestone**
- オプティクスマッチング後、ビーム損失を抑えた周回に成功
- 加速後の規格化エミッタンス ⇒ 周回部での調整はまだ不十分
 - 0.15 mm mrad(20 fC/bunch) ⇒ ほぼ入射器のエミッタンスを保持して周回できた
 - 2.9 mm mrad(7.7 pC/bunch) ⇒ 次の目標の0.3 mm mradに到達する調整は今後の課題(2015年4月から開始予定)
- 20MeV運転を始めてから3週間後に突然主空洞のradiationが増える現象が見られたが、**性能劣化回復**を行うことが可能であった。⇒ **長期運転への一つのアプローチを確立**

- 現状と今後の課題
- 現状 ⇒ **各機器のピーク性能を検証しつつある**
- 今後の開発 ⇒ **ピーク性能だけではなくて総合性能を発揮できるように**
 - 電子銃: **大電流と長寿命化の両立** ⇒ 大電流電源とマルチアルカリカソードの開発(2015年～)
 - 超伝導空洞: **電圧上昇と、大電流ビームの加速** ⇒ Field emissionを抑える組み立て、process法の開発等

まとめ（光源加速器としてのERL）

- ERL (Energy Recovery Linac) 加速器
 - 線形加速器の特徴を有する
 - 「先端性と汎用性」の両立の可能性
 - 高輝度・大電流ビームの生成・加速が鍵
- 光源加速器に必要な性能： 安定な光（変動しない、中断しない）
⇒ 試験加速器 cERL において総合性能の検証を続けている
- 試験加速器 cERL における結果のフィードバック
 - 達成できていること： 500 kV の電子銃電圧、超伝導空洞での安定な加速、0.15 mm mrad（空間電荷なし）
 - 達成できていないこと： 10 mA (100 mA) の生成、15 MV/m の加速勾配、0.1 mm mrad (7.7 pC/bunch)、ユーザー利用に耐える運転時間を確保できるかの検証（カソード寿命）
 - 電子源の重要な点： 運転を続けながらも、別施設で開発継続が可能。段階的にアップグレードできる。
 - 最終（限界）性能だけを示すのではなく、現実的な運転モードからのアップグレードの道筋を示す
- 「先端性と汎用性」の両立 ⇒ 「先端性」を利用した展開の可能性
 - 高繰り返しXFEL光源
 - EUV-FEL光源（半導体リソグラフィー用）
 - XFEL-O

Buck up slides

cERL Development Team



High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

S. Adachi, M. Adachi, M. Akemoto, D. Arakawa, S. Asaoka, K. Enami, K. Endo, S. Fukuda, T. Furuya, K. Haga, K. Hara, K. Harada, T. Honda, Y. Honda, H. Honma, T. Honma, K. Hosoyama, K. Hozumi, A. Ishii, X. Jin, E. Kako, Y. Kamiya, H. Katagiri, H. Kawata, Y. Kobayashi, Y. Kojima, Y. Kondou, O.A. Konstantinova, T. Kume, T. Matsumoto, H. Matsumura, H. Matsushita, S. Michizono, T. Miura, T. Miyajima, H. Miyauchi, S. Nagahashi, H. Nakai, H. Nakajima, N. Nakamura, K. Nakanishi, K. Nakao, K. Nigorikawa, T. Nogami, S. Noguchi, S. Nozawa, T. Obina, T. Ozaki, F. Qiu, H. Sakai, S. Sakanaka, S. Sasaki, H. Sagehashi, K. Satoh, M. Satoh, T. Shidara, M. Shimada, K. Shinoe, T. Shioya, T. Shishido, M. Tadano, T. Takahashi, R. Takai, H. Takaki, T. Takenaka, Y. Tanimoto, M. Tobiyama, K. Tsuchiya, T. Uchiyama, A. Ueda, K. Umemori, K. Watanabe, M. Yamamoto, Y. Yamamoto, Y. Yano, M. Yoshida



Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

R. Hajima, S. Matsuba, R. Nagai, N. Nishimori, M. Sawamura, T. Shizuma



Hiroshima University

M. Kuriki, Y. Seimiya



Nagoya University

Y. Takeda, M. Kuwahara, T. Ujihara, M. Okumi



The Graduate University for Advanced Studies (Sokendai)

E. Cenni (present address: Kyoto University)



Yamaguchi University

H. Kurisu



UVSOR, Institute for Molecular Science

M. Katoh



National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

D. Yoshitomi, K. Torizuka



JASRI/SPRING-8

H. Hanaki



CERN

A. Valloni

• 謝辞 ～運転を支えて頂いた方へ～



コミッションング運転では、建設・コミッションングチームだけでなく、機器を安定に運転するために多くの方の協力がなければ進めることができませんでした。

大前提として、冷凍機の安定な運転が欠かせませんでした。冷凍機運転員の方に感謝します。
また、コミッションング運転では機器の迅速な立ち上げ・立ち下げ、そして運転に必要なソフトウェアの迅速なサポートが欠かせませんでした。

東日本技術研究所： 路川徹也さん、亀田吉郎さん、
NAT： 山田浩気さん、沼田直人さん、浅川智幸さん
に感謝します。