

# 超伝導加速器利用推進チーム報告

2017年7月11日

河田洋

- ERL計画推進委員会
- EUV-FEL開発への新しい取り組み

# ERL計画推進委員会

日時： 7月7日 13：30-15：30

場所：3号館1階会議室

## アジェンダ)

- |                           |    |
|---------------------------|----|
| 1. ERL推進室から超伝導加速器利用推進チームへ | 河田 |
| 2. cERLの現時点での達成性能の概要      | 宮島 |
| 3. 評価専門委員会の位置付けと委員提案      | 河田 |
| 4. その他                    |    |

# ERL計画推進室から 超伝導加速器利用推進チームへ

河田洋

- ERL総括委員会
- KEK-PIP
- ERL技術の産業応用へ向けて
- 超伝導加速器利用推進チーム

# ERL総括委員会(1)

<http://www.kek.jp/ja/About/OrganizationOverview/Assessment/ResearchAccount/2016/10/12/ERL2016.pdf>

- ERL計画を総括するために開催された委員会(2016年7月～9月)
- 報告書は9月7日に作成され、現在上記のURLに掲載されている。

- **委員**

雨宮慶幸 (東京大学大学院・新領域創成科学研究科教授)  
小杉信博\* (自然科学研究機構・分子科学研究所教授、UVSOR施設長)  
壽榮松宏仁 (東京大学名誉教授、元理化学研究所・播磨研究所長)  
上垣外修一 (理化学研究所・仁科加速器研究センター・加速器基盤研究部長)  
瀧川 仁 (東京大学物性研究所長)  
中野貴志 (大阪大学核物理研究センター長)  
委員長は小杉信博先生

- **総括項目**

- 1) ERL光源をPFの将来計画に決めた経緯と理由が妥当だったか。
- 2) ERL光源をPFの将来計画として実現するための実証機の位置付けが妥当だったか。
- 3) ERL光源をPFの将来計画としないことに至った経緯と理由が妥当だったか。

3項目それぞれについて、機構内部(PF、物構研、機構全体)での議論・見直しが適切だったか、利用研究者との関係が適切に行われたか、日本放射光学会との関係が適切だったか、世界的動向と把握が適切だったか、などの側面を考慮しながら総括

# KEK-PIPの中におけるERL計画の位置付け

- KEKロードマップからERLの次期光源の位置付けが削除
- KEK Project Implementation Plan (KEK-PIP)

<http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20160802141100/>

その中に、ERLに関しては、以下の記述

## 3-2. Other research projects carried out using general funds of KEK

The following projects have up to now been conducted mainly using general funds of KEK. They will be continued on the condition that greater efforts are made to obtain external funding.

- Simulation studies with the existing supercomputer (only up to summer of 2017)
- [Industrial application of ERL technology](#)
- Participation in CERN LHC/ATLAS
- Research carried out in the Detector Technology Project
- Research in the Japan-US cooperation program
- Projects under the Toshiko Yuasa Laboratory (TYL)
- Small-scale research projects conducted in KEK institutes

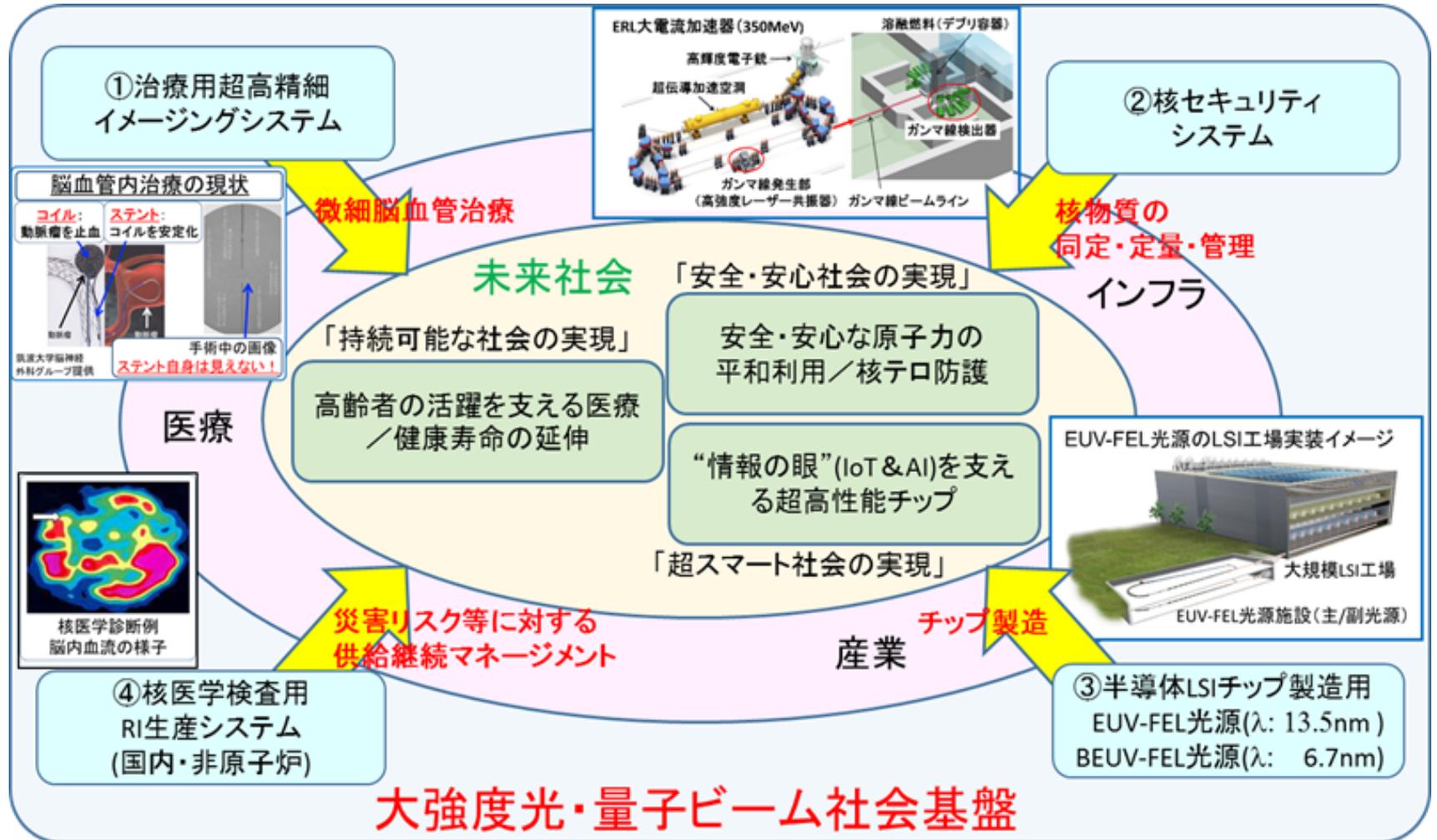
# 産業化に向けた経緯

## － EUV-FEL光源産業化研究会の発足と活動状況 －

- 2012秋 EUV Source WorkshopにてEUV光源としてのFELに言及 (ASML)
- 2014.2 SPIE Advanced LithographyにてASMLグループが発表 (13.5nm, 6.7nm)
- 2014.4頃～ EUV-FEL光源の可能性検討をKEK／東芝で開始。  
ギガフォトン／早大はFEL光の利用技術について検討開始
- 2014年 ASMLがKEK訪問 (技術検討の協力依頼)
- 2015.6 EUV-FEL光源実現に向け産学の結集を図るため研究会を企画。
- 2015.8 EUV-FEL光源産業化研究会を発足 (企業6社、コンソ1社、大学等6機関)
- 光源開発 (ERLをベースとした超高出力EUV-FEL光源)
  - 利用技術開発 (超高尖頭値FEL光へのレジスト、マスク材料対応)
- 2016.1 研究開発プロジェクト立案のため光源分科会を設置
- 2016.4～ 産業化に向けた競争的資金獲得を目指して、国、JSTへのアプローチを開始
- 2016.6 TIA連携プログラム調査研究 (かけはし) の資金を得て半導体業界への浸透活動を強化
- ～現在 参加機関: 企業 10、コンソーシア 1、大学・研究機関 7  
(内、光源分科会: 企業8、大学・研究機関7)

# 日本の未来社会における開発の位置付け

## -大強度光・量子ビーム社会基盤-



# ERL計画推進室から 超伝導加速器利用推進チームへ

- 2017年からERL計画推進室をKEK内組織から廃止。
- ERL技術の出口戦略を策定し、その研究開発を担うためには、これまでERLについて研究開発を推進していたチームが引き続き協力できる体制が必要。
- 先端加速器推進部に部内措置として、超伝導加速器利用推進チームを設ける。
- cERLに関するこれまでの研究開発の成果をまとめる作業のために、2018年3月31日まで、ERL計画推進委員会を存続させる。

# cERLの現時点での達成性能の概要

第10回ERL計画推進委員

2017年7月7日 13時30分～15時30分

KEKつくばキャンパス 3号館1階会議室

高エネルギー加速器研究機構

加速器研究施設

宮島 司

# 目次

- cERLで検証すべき課題
- 鍵となる要素の性能
- 加速器としての総合性能
- まとめ

# 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:
    - 大電流・低エミッタンス・短バンチの両立を実証することが必要
  - 安定性(長時間・安定に、一様に):
    - 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: カソード交換頻度(カソード寿命が重要)、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

# 実証機としての compact ERL (cERL)



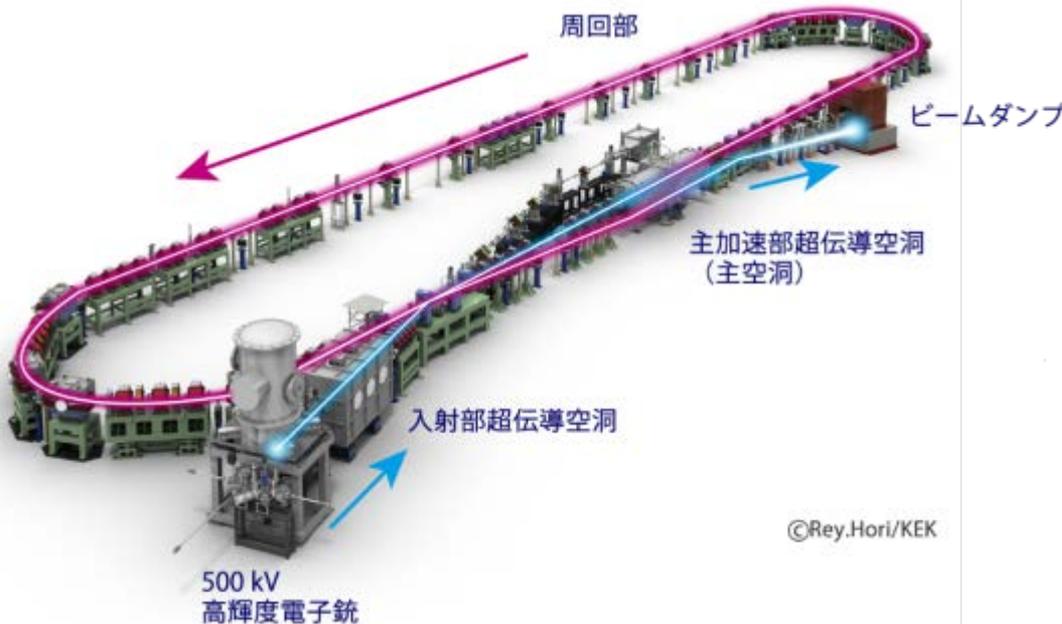
## compact ERLの目的

- 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
- 加速器総合性能の確認

設計段階のパラメタ  
(「コンパクトERLの設計研究」より)

## 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



ERLを構成する基本要素をすべて含む

# 鍵となる開発要素

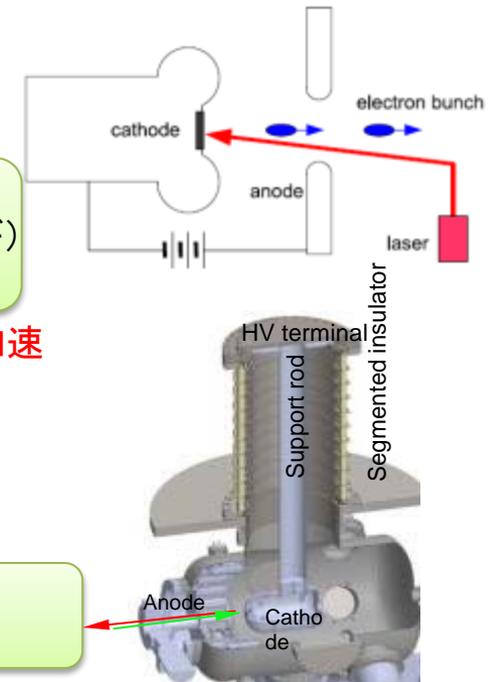
## 電子銃

- 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：空間電荷効果を弱める⇒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（compact ERLでは3台、3 GeV光源では6台）  
主加速超伝導空洞：9-cell空洞（compact ERLでは2台、3 GeV光源では224台）

- 目標設定：15 MV/m で100 mAを加速



課題を解決できるのか実証（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



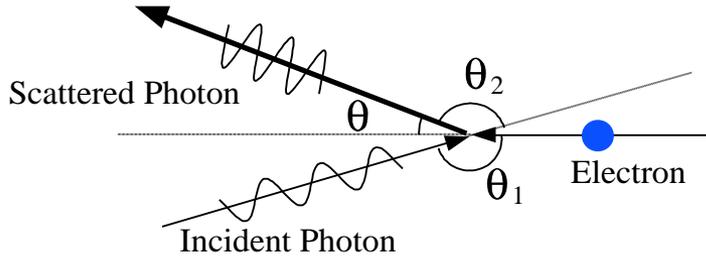
# 達成した規格化エミッタンス

- 極低バンチ電荷 (< 50 fC/bunch)
  - ほぼカソードで生成されるエミッタンスを保持して周回を達成 (0.13 ~ 0.19 mm mrad)
  - ほぼ設計通り
- 低バンチ電荷 (0.5 pC/bunch)
  - バンチ長: 3 ps
  - 0.3 ~ 0.41 mm mrad (周回部)
  - 設計から2倍弱
- 中バンチ電荷 (7.7 pC/bunch)
  - バンチ長: 3 ps
  - 0.8 mm mrad (入射器)、1.0 ~ 1.6 mm mrad (周回部)
  - 設計から2~3倍
- 高バンチ電荷 (40 pC/bunch)
  - バンチ長: 3-4 ps
  - 0.9 ~ 2.4 mm mrad (入射器)、2.0 ~ 10 mm mrad (周回部)
  - 最大設計の10倍程度
- 低エミッタンス・短バンチ長・大バンチ電荷
  - 横方向、進行方向ビームダイナミクスを精密に制御する必要がある

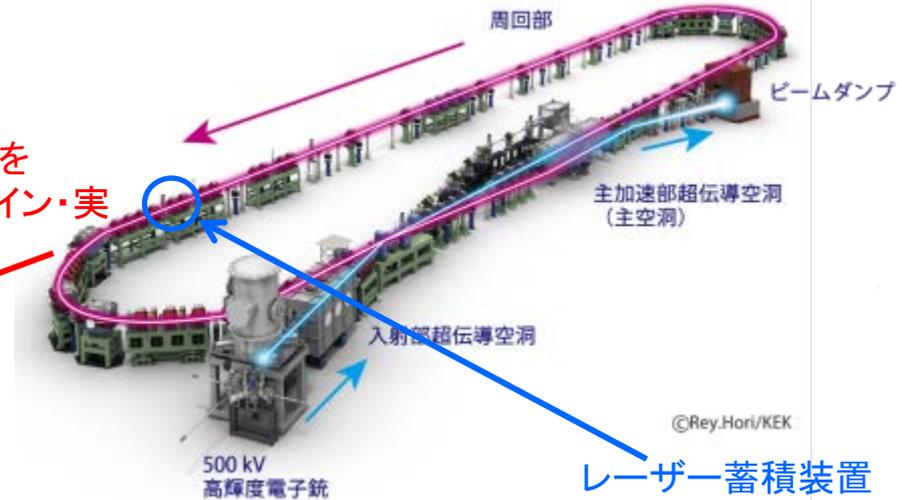
# レーザーコンプトン散乱光源

単色性の良い高輝度・高強度ガンマ線を得るには  
低エミッタンス・大電流電子ビームが必要

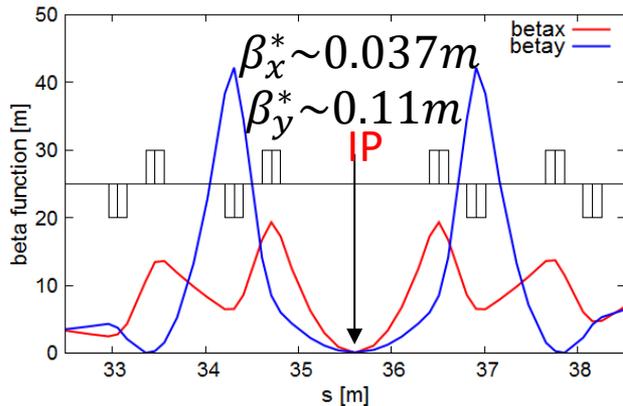
⇒ ERLの利用が適している



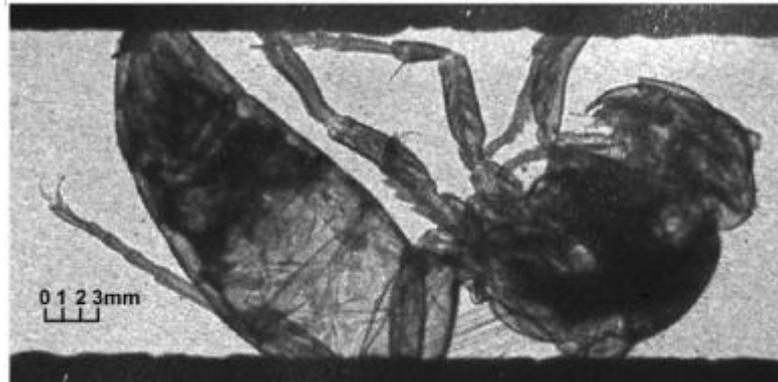
発生したX線を  
LCSビームライン・実  
験室へ



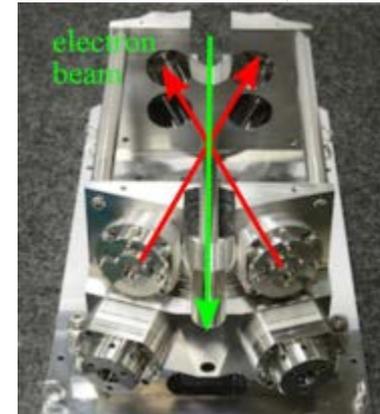
## 衝突点近傍の設計オプティクス



バンチ電荷: 0.5 pC, 162.5 MHz CW運転  
平均ビーム電流: 80  $\mu$ A



A. Kosuge et al., Proc. IPAC-2015, TUPWA066



7 keV X線の生成に成功 (“ERL+レーザー蓄積”で世界初)  
イメージングに成功

調整後のビームサイズ

$\sigma_x^* \sim 13 \mu m$ ,  $\sigma_y^* \sim 25 \mu m$

調整技術を確立

# cERL性能まとめ(入射器)

2017年3月までの運転で達成した性能

Parameter	Achieved performance	Target values	Remark
Beam energy $T$	5.6 MeV (typ.), 5.9 MeV (max.)	5 MeV (typical)	OK
DC voltage for DC gun $V_{\text{gun}}$	450 kV in operation (500kV achieved)	500 kV	OK
Acceleration Energy $E_{\text{acc}}$	7 MV/m (typ.)		OK
Normalized Emittance (Very low bunch charge)	$\approx 0.07 \mu\text{m}\cdot\text{rad}$ (@~10 fC/bunch, T=390 keV)	0.1 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$	OK
Normalized Emittance (Low bunch charge)	$\approx 0.17 \mu\text{m}\cdot\text{rad}$ (@0.02 pC/bunch, T=5.6 MeV)	0.1 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$	OK
Normalized Emittance (Medium bunch charge)	$\approx 0.8 \mu\text{m}\cdot\text{rad}$ (@7.7 pC/bunch, T=5.6 MeV)	$\leq 1 \mu\text{m}\cdot\text{rad}$ (at the beginning) 0.1 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$ (aggressive)	OK Still
Normalized Emittance (High bunch charge)	1.5~3 (@40 pC/bunch)	1 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$	still
Momentum spread $(\sigma_p/p)_{\text{rms}}$	$< 10^{-3}$ (< 1 pC/bunch) (1.5 - 2.5) $\times 10^{-3}$ (@7.7 pC/bunch)	$\leq 10^{-4}$ (3 GeV ERL)	Should be OK

H. Kawata, ERL17 workshop

# cERL性能まとめ(周回部)

Parameter	Achieved performance	Target Value	Remark
Energy of the electron beam $E$	19.9 MeV	35 MeV	Still
Energy of Injector $E_{inj}$	2.9 MeV	5 MeV	Still
Average Current $I_0$	6.5 $\mu$ A (steady state)、 1mA (steady state)	10 $\mu$ A 10 mA	OK Should be OK
Field gradient of main linac $E_{acc}$	8.2 MV/m	15 MV/m	Still
Normalized Emittance at RL (Very low bunch charge)	$\approx 0.13 \mu\text{m}\cdot\text{rad}$ (@ $\sim 0.05\text{pC}/\text{bunch}$ )	0.1 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$	OK
Normalized Emittance at RL (Low bunch charge)	0.3 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$ (@0.5 pC/bunch)	0.1 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$	Not bad
Normalized Emittance at RL (Medium bunch charge)	$\sim 1.0\text{-}1.6\mu\text{m}\cdot\text{rad}$ (@7.7 pC/bunch, E=19.9 MeV)	$\leq 1 \mu\text{m}\cdot\text{rad}$ (Beginning) 0.1 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$ (aggressive)	Should be OK  Still
Normalized Emittance at RL (High bunch charge)	2-10 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$ (preliminary) (@40 pC/bunch)	1 $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$ (@77 pC/bunch)	Still we need an adjustment time
Momemtun Spread $(\sigma_p/p)_{rms}$	$1.2 \times 10^{-4}$	$\leq 10^{-4}$ (3 GeV ERL)	OK
Jitter of Momemtum $(\Delta p/p)_{rms}$	$6 \times 10^{-5}$	$\leq 10^{-4}$ (3 GeV ERL)	OK
Bunch compression $(\sigma_t)$	0.25ps @ 2pC/bunch	0.1ps	Not bad

H. Kawata, ERL17 workshop

# 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:
    - 実証済み: 500 kV で 1.8 mA 生成(電子銃単体)、390 kV で 0.9 mA 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·mrad @10fC, 390 kV、実用環境下での500 kV ビーム生成を達成。
    - 残りの課題: 10 mA(100 mA) 生成試験
  - 大電流電子ビームの加速:
    - 実証済み: 8.5 MV/m で 0.9 mA のCW運転。実用環境下での性能回復法の確立。
    - 残りの課題: 大電流加速試験(10 mA, 100 mA)。加速勾配を上げること。
  - ビーム性能:
    - 実証済み: 40 pC/bunchまでの性能検証を実施。進行方向ダイナミクスの制御はほぼ確立。バンチ圧縮の実証。
    - 残りの課題: 大バンチ電荷(> 40 pC)でのエミッタンス補償法の確立。
  - 安定性(長時間・安定に、一様に):
    - 実証済み: CW 0.9 mA での長いカソード寿命、電子銃・超伝導空洞(ただし、空洞台数はまだ少ない)の高い安定性
    - 残りの課題: > 10 mA でのカソード寿命試験(寿命はどれくらい? ビーム品質の劣化は?)
  - 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:
    - 実証済み: 平均電流0.9 mAでの低損失を実証。CW 10 mA運転の目途も立った
    - 残りの課題: CW 10 mA運転の実証、ビームダンプ以外でのビーム損失箇所・量の評価を進めること
  - cERLの利用に向けた試験
    - レーザーコンプトン散乱によるX線発生試験、THz光生成試験

# 評価専門委員会の位置付けと 委員提案

超伝導加速器利用推進チーム

河田洋

- 評価専門委員会の位置付け
- 委員提案

# ERL計画推進室から 超伝導加速器利用推進チームへ

- 2017年からERL計画推進室をKEK内組織から廃止。
- ERL技術の出口戦略を策定し、その研究開発を担うためには、これまでERLについて研究開発を推進していたチームが引き続き協力できる体制が必要。
- 先端加速器推進部に部内措置として、超伝導加速器利用推進チームを設ける。
- cERLに関するこれまでの研究開発の成果をまとめる作業のために、2018年3月31日まで、ERL計画推進委員会を存続させる。

# 評価専門委員会の位置付け

- ERL計画評価専門委員会について(案)
- スケジュールの概要
  - 7月7日に評価専門委員会を設置
  - 超伝導加速器利用推進チームを中心に、「ERL計画成果報告書」を作成
  - 10~11月に評価専門委員会を開催
  - 評価専門委員会にて、「評価専門委員会報告書」を作成頂く
  - 12月頃に第2回ERL計画推進委員会を開催し、「評価専門委員会報告書」を審議頂き、承認を得たうえで公開

# 評価頂く内容の概要

超伝導加速器利用推進チームが用意する「ERL 計画成果報告書」とプレゼンテーションを元に以下の項目を中心に評価とアドバイスを頂きたい。

- 次期放射光源のテスト機としてのcERLで、実証すべき項目の達成度と今後の課題
- 産業応用への展開を図るために今後開発すべく項目の妥当性とその実現に向けての課題

# 委員長および委員の提案

委員長： 加藤 政博

委員： 熊谷 教孝、腰原 伸也、花木 博文、濱 広幸、  
古川 和朗、三浦 太一、山口 誠哉  
(敬称略)

# 議事録案(1)

## 1 ERL推進室から超伝導加速器利用推進チームへ

河田委員長から資料1に基づく報告後、次のような質疑応答があった。

・超伝導加速器利用推進チームのミッションは何か。

→超伝導加速器の技術的検討と産業等への応用がミッションである。

・産業応用を目的とする理由は何か。

→「KEK-PIP」に産業応用を目指すべきとの記載があることが理由である。

また、超伝導加速器利用推進チームの目指す方向性を明確化するために、「CW超伝導」などのキーワードを入れた方が良いとの提案があった。

# 議事録案(2)

## 2 cERLの現時点での達成性能の概要

加速器研究施設・宮島准教授から資料2に基づく報告後、委員よりcERLに関する性能についての確認等があった。

## 3 評価専門委員会について

河田委員長から資料3に基づく説明後、評価専門委員会の設置については了承されたが、委員構成について、社会科学の有識者を加えてはどうかという提案があり、内諾を得ている評価専門委員8名に追加するか否かについては委員長へ一任するものとして了承された。

## 4 その他

次回のERL計画推進委員会は評価専門委員会での報告書作成後の12月頃開催予定とする。

# cERLの加速器技術に関する成果報告書

評価専門委員会は10月中旬頃 専門委員会に向けて成果報告書の作成をお願いする。

<報告書の内容>	担当者は提案段階
全体設計	中村
電子銃	宮島
電子銃本体	
カソード開発	
励起レーザー	
超伝導加速空洞	加古
前段加速空洞	
主加速部空洞	
RF源	明本(三浦)
冷凍機	仲井
電磁石システム	原田
真空システム	本田融
ビーム制御・診断システム	帯名
放射線シールド、周辺設備	芳賀
ビームダイナミクス・コミッショニング	宮島
THz発生	本田洋介
LCS発生	赤木
将来展望	河田

# 国際ワークショップの概要

- EUVL Workshop: June 11-15, 2017 in Berkeley, CA.  
<https://euvlitho.com/>
- ERL17: 18-23 June 2017, CERN  
<https://indico.cern.ch/event/470407/page/6158-registration-closed>

# EUVL Workshop

- [Agenda](#)
- 印象(雑感)
  - LPP光源が200Wの運転ができるようになり、EUVLの量産機導入の直前まで来た。
  - ペリクルは205Wまでしか現在耐性が無く今後の大強度光源に向けて開発が必要
  - 「やっとここまで来た！」という安堵感
  - 「今後、FEL等の更なる大強度光源の議論は本格化するだろう!」とのコメント

# ERL17

- <https://indico.cern.ch/event/470407/timetable/#20170619.detailed>
- 印象(雑感)
  - ERLの応用は高エネルギー物理へ
  - Berlin-Proはその中で加速器のR&Dという立場で着々と建設を進めている。(100mAを目指して)
  - SRF電子銃の開発が急速に進展
  - 超伝導空洞はHigh Qの開発(LCLSII)
  - ERLではないが上海にCW-XFEL(8GeV)のスライドが出てきた
  - 次回はBerlin-Proがホスト
  - KEKのIOCメンバーは河田から宮島氏へ