

KEKでのITN (ILC Technology Network)の下での 加速器開発の現状

阪井寛志 (on behalf of ITN members)

Innovation Center for Applied Superconducting Accelerators (iCASA), Accelerator Laboratory

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

Contents :

- A) ILC概要とITN(ILC Technology Network)について
- B) ILC加速器に必要な最先端技術とその開発について(JFY2023~2024)
- C) まとめと今後

18 min. (talk) + 2min.



本発表はILC加速器開発の全体の発表となりますが、関連研究の詳細は下記で参照ください。

口頭発表

- FRO701 「ILC 電子ドライブ陽電子源の機械学習による全体最適化」佐々木 遥大、他
- FRO704 「大強度陽電子生成標的の開発」森川 祐、他
- FRO709 「KEKにおける超伝導加速空洞を用いたクライオモジュールの製造」道前 武、他

ポスター発表

- WEP009 「KEK加速器試験施設タイミングシステム改良状況報告」Konstantin Popov、他
- WEP047 「ILC電子駆動型陽電子源の捕獲部における ビームシミュレーションによるYield改善の研究」福田 将史、他
- WEP063 「ILC電力分配システム用可変電力分配器のプロトタイプの開発」Joshi Prakash、他
- WEP068 「KEKにおけるITN(ILC Technology Network)クライオモジュール試験用RF電力分配系」松本 利広、他
- WEP072 「ILC主線形加速器用NbTi伝導冷却超伝導四極磁石の開発」有本 靖、他
- THP001 「KEKにおける超伝導加速空洞を用いたクライオモジュールの設計検討」原 隆文、他
- THP054 「ILC用 MARX電源における制御電源供給の信頼性向上」澤村 陽、他
- FRP001 「クライオモジュール製造に向けた極めて清浄な空洞連結作業の検討」井藤 隼人、他
- FRP015 「ウェイク場低減に向けたATF最終収束ビームラインの高度化」阿部 優樹、他
- FRP045 「KEK iCASAにおける陽電子源開発の進捗」榎本 嘉範、他
- FRP052 「KEKにおける文科省補助金による5カ年計画（MEXT-ATD）のためのEuropean XFELタイプ入力結合器のクオリティチェック」山本 康史、他
- FRP053 「KEKにおける文科省補助金による5カ年計画（MEXT-ATD）のためのEuropean XFELタイプ入力結合器の製造とハイパワー試験の準備」山本 康史、他
- FRP062 「ILCクライストロン用チョップ型マルクス電源の現状」中島 啓光、他
- FRP063 「レーザーとRFの同期およびKEK ATFにおける電子ビームの安定性への影響」Konstantin Popov、他

施設報告

- WHP012 「KEK先端加速器施設(ATF)におけるナノビーム技術開発の現状」奥木 敏行、他
- WHP014 「STF/COI施設報告」山本 康史、他

すでに発表が終わりましたが、口頭発表3件、ポスター発表14件、施設報告2件の発表が行われました。



(A)

A) ILC概要とITN(ILC Technology Network)について

B) ILC加速器に必要な最先端技術とその開発について(JFY2023~2024)

C) まとめと今後

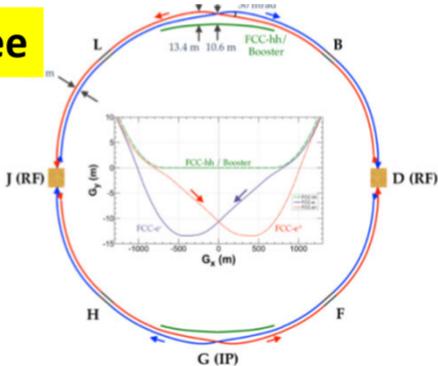
Candidates of Future e+e- colliders for a Higgs factory

ヒッグス粒子生成には250GeV以上の重心エネルギー(CM)が必要。



• Circular Collider

FCC-ee



Merit:

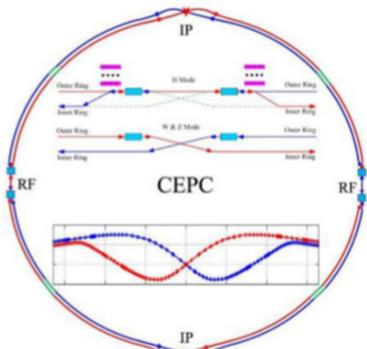
既存の円形加速器の技術を用いる。

Demerit:

放射光ロスが非常にシビア
エネルギーは350 CMエネルギー以上は厳しい。

Circumference 90~100km

CEPC



放射光ロス = 100MW

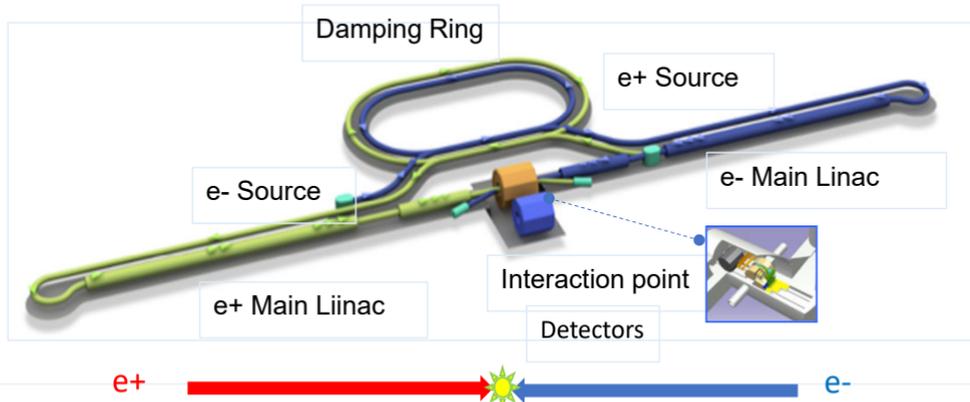
Frank Zimmermann, CERN, "Highlights from the future Circular Collider feasibility study and path to construction" IPAC'25, Friday

• Linear Collider

ILC (International Linear Collider)

Global project

Merit :Extendibility for higher energy than 250 GeV



ILC250 focuses on Higgs Factory;
Length becomes 20km
Shorter than LHC

LC vision includes all linear collider such as CLIC, C³, HELEN, HALHF, Plasma

本発表ではILC250に関する加速器R&Dについて発表する。

ILC 加速器の概要

エネルギー：
 125 GeV + 125 GeV = 250GeVがヒッグス粒子生成には必要。

超伝導加速空洞



Damping Ring (a few GeV)
 : ビームを扁平に小さく

e- Source: 偏極

e+ Main Linac : 加速 125 GeV

ILCの開発の大半が加速器の開発

加速器開発のポイント

非常に高い KEKBと同じくらい。

Item	Parameters
C.M. Energy	250 GeV
Length	20 km
Luminosity	$1.3 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
Beam Current	5.8 mA (in pulse)
Beam size (x/y) at FF	516 nm/7.7 nm
SRF Cavity G.	31.5 MV/m
Q_0	$Q_0 = 1 \times 10^{10}$

Key Technologies

多くの(陽)電子

ナノビーム

高加速勾配 (大電力)
 →超伝導加速空洞

Luminosity :

$$\mathcal{L} = f_{rep} \frac{n_b N^2}{4\pi\sigma_x^* \sigma_y^*} \times H_D$$

Frep: ビーム繰り返し
 nb : trainのbunch数
 N: bunch内の(陽)電子の数
 σ_x^*, σ_y^* : 水平、垂直のビームサイズ(@衝突点)
 HD: 衝突時のビーム相互作用による減衰効果。扁平ビームが良い。

ビームのぶつかる頻度を表す。これが大きいと新しい粒子が発見されやすい

- ILCは20kmとコンパクトで放射光ロスなしで、250GeVのコライダー実験を行うことが可能。さらに加速器を追加してエネルギー拡張性あり。従来のリング型コライダーに対して、非常に大きなメリット
- ILC実現には特有の加速器開発が重要 (右)。

- (ILC加速器開発の具体的課題)
1. ナノビーム生成とその衝突の安定性。
 2. 大量の電子陽電子の生成 (リングのように繰り返し当てられない。)
 3. 高加速勾配、高Q値超伝導空洞大量生産 9000台 (EURO-XFEL 800台)
 4. 衝突後の高エネルギー大電流ビームをいかにダンプするか？

Compare ILC and FCC-ee (and others...)

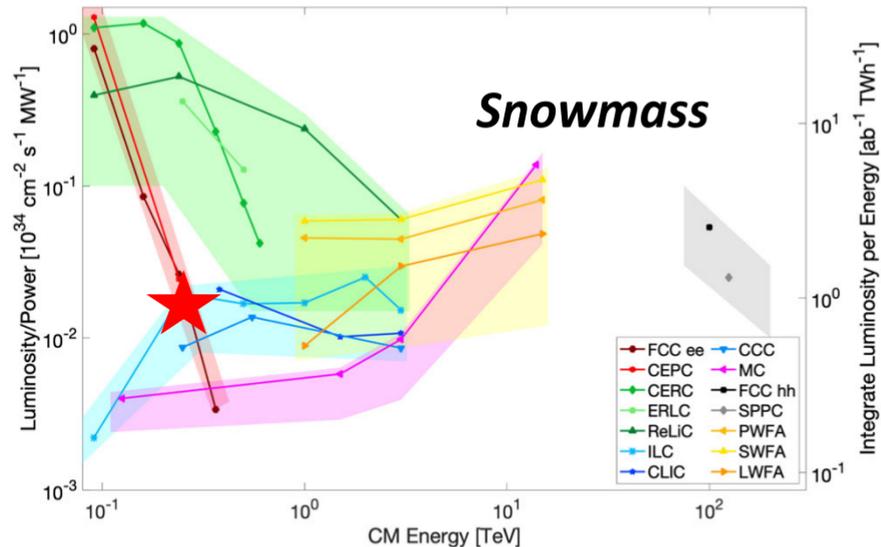
Luminosity:
$$\mathcal{L} \sim \frac{N_e N_{e^-}}{4\pi\sigma_x\sigma_y} \times f \times n_b$$



A. Miyazaki, LCWS2024 pre-school

	ILC	FCCee ZH
\mathcal{L} [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	1.35×10^{34}	6.9×10^{34}
N_e	2.0×10^{10}	2.0×10^{17}
f [Hz]	5	3000
n_b	1312	260
σ_x [nm]	516	6300
σ_y [nm]	7.7	28

Report of the Snowmass'21 Collider Implementation Task Force
 Thomas Roser for the Snowmass Implementation Task Force
 P5 committee meeting April 13, 2023



- Both are almost comparable for Higgs measurement @250GeV CM (電力はインフラ込)
- Circular colliders are better for lower energy (Z-pole 90GeV) → FCC-ee, CEPC
- Linear colliders are more advantageous for higher energy (ttbar 350GeV, HHH 500GeV) → ILC (as Future collider)
- For even higher energy: FCChh, MuCol, Plasma (more than 1 TeV to 10 TeV) (energy scale of new physics?)

現在の技術で250GeV以上の高エネルギーを狙う次世代加速器としては、ILCが非常に有力な加速器である。

ITN (ILC Technology Network)の経緯と概要



ILC国際推進チーム (IDT) が研究者間の議論のために作成した流れ (すべて順調に行った場合を想定)

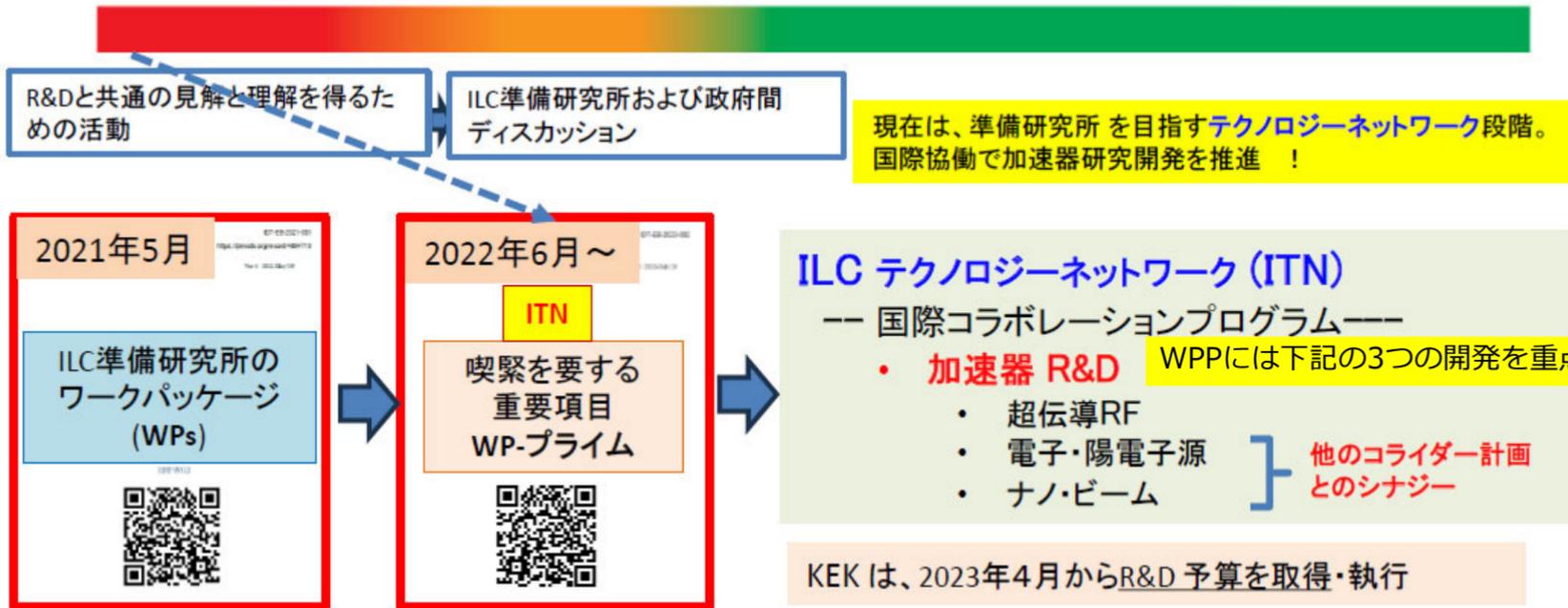
(~4年)

テクノロジー・ネットワークフェーズ

(~4年)

準備フェーズ

建設フェーズ (建設および試運転で10年間)



ITNでの実施課題(WPP)には、世界で共通化された**最新の超伝導材料**、**表面処理法**などを取り込んだ空洞の世界三領域での製造実証および**高圧ガス安全基準**を満たす空洞システム製造の実証、**長時間安定なナノビーム**を実現する技術の実証、そして2つある**陽電子発生技術をより成熟**させることなどが含まれている。

ILC Technology Network (ITN) since 2023



- For **WPP-1&2 (SRF cavity, CM)**, single cell & 9 cell cavity production in **Korea/Europe** started.
- **JAI (UK)** started WPP-14 (DR Injection/extraction, **synergy with Diamond Light Source upgrade**)
- For **WPP-15 (Final Focus System)**, **European and Korean researchers have joined to the ATF experiments** since 2023.



Agreement: KEK and CERN

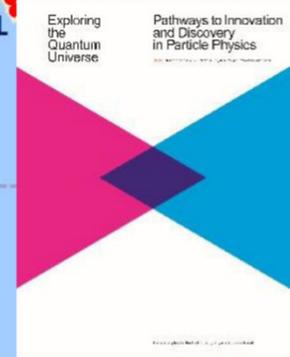


CERN, German, UK, France, Italy, Spain

Agreement: KEK and Korean Univ.



KEK, Korea, Australia



US Labs. join using Japan-US funding frame



(B)

A) ILC概要とITN(ILC Technology Network)について

B) ILC加速器に必要な最先端技術とその開発について(JFY2023~2024)

1) 超伝導空洞開発

2) 陽電子開発

3) ナノビーム開発

C) まとめと今後

2023年度から5年での具体的なILC加速器開発目標 (WPP 4 つ)

超伝導空洞開発

WP-prime 2: クライオモジュール組立・試験・設計決定



WP-prime 1: 空洞量産実証



2023年度から5か年で
KEKでは文科省補助金
(MEXT-ATD program)で実施。

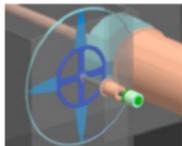
目標 (モジュール)
8空洞入りモジュール
加速勾配: 31.5MV/m
Q値: $< 1 \times 10^{10}$

Rey.Hori/KEK

目標 (空洞単体テスト)
冷凍機則に則った9セル空洞で
加速勾配: 35MV/m
Q値: $\sim 1 \times 10^{10}$

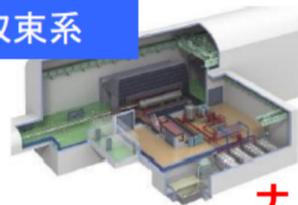
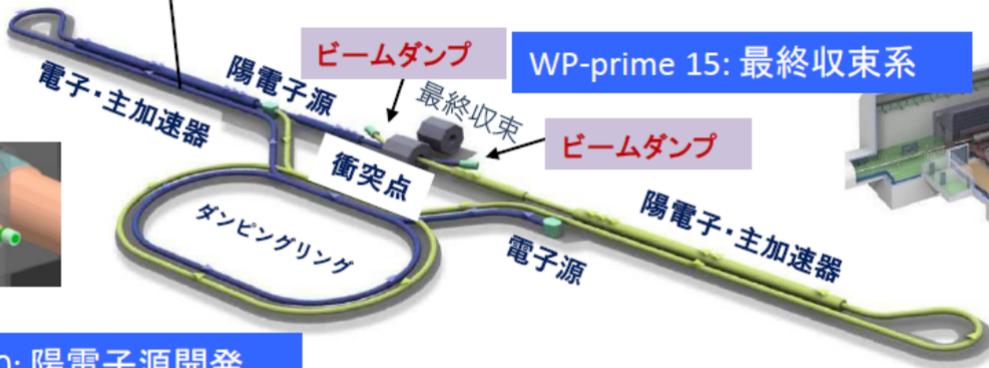
陽電子開発

目標
SLCやS-KEKB
を超える大量の
陽電子生成技術
確立



陽電子源

WP-prime 8~10: 陽電子源開発



ナノビーム開発

目標:
ATF-FFで垂直方向
37nmを安定にkeep。

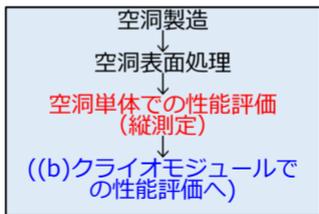
①超伝導空洞開発



超伝導加速器ができるまでの手順

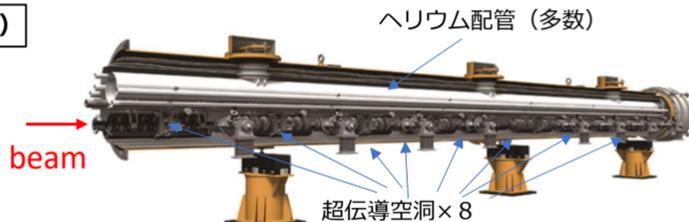
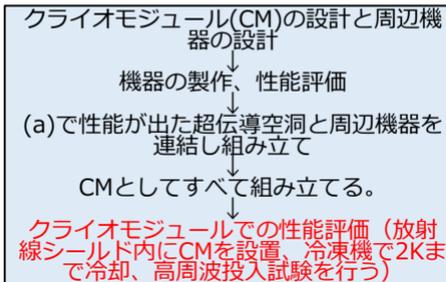
(超伝導空洞とクライオモジュール)

(a) 空洞単体での性能評価 (WPP1)



冷凍則への整合も今回重要。

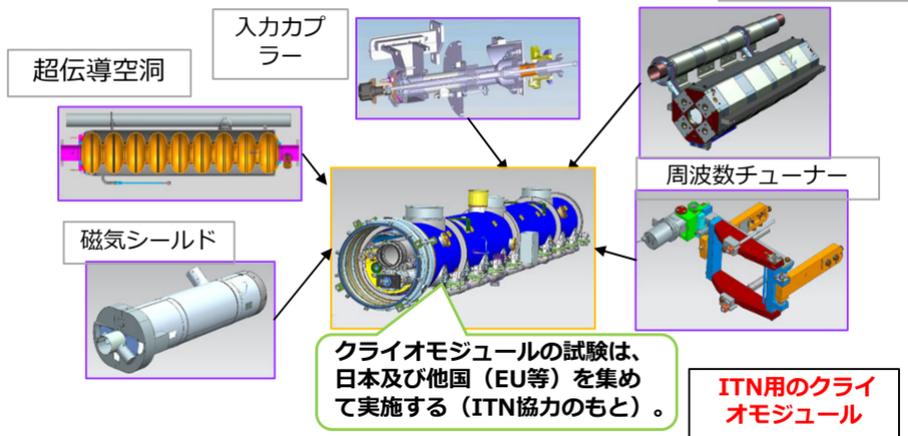
(b) クライオモジュールでの性能評価 (WPP2)



8台の超伝導加速空洞を納める直径1m、12m長のクライオモジュール(と呼ぶ)。これが並びビームを加速していく。断熱槽に囲まれ、内部の超伝導空洞は液体ヘリウムで冷やされる。

国内外の空洞をテストし、最終的に、8空洞をクライオモジュールに組み込み。ILCの目標は、**31.5 MV/m**である。

クライオモジュールと必要な周辺機器



空洞性能の目標値

- ◆(a) 縦測定(空洞単体テスト)(WPP1):
 加速勾配 = $<35.0 \text{ MV/m}>$,
 $Q_0 = 1.0 \times 10^{10}$
- ◆クライオモジュールでの性能評価(WPP2):
 加速勾配 = $<31.5 \text{ MV/m}>$,
 $Q_0 = 1.0 \times 10^{10}$

この性能評価はKEKにあるCOI棟にて、最終的に2027年度にクライオモジュールを組み立てテストを行う。



電解研磨 (150 μm)



熱処理
(900°C, 3h)



電解研磨 2
(cold EP, 20μm)



高圧超純水洗浄
Clean Assembly



2-step Baking
(75°C, 4h
+
120°C, 48h)

KEK's proposal is to apply **2-step baking** to realize high performance, higher-Q and higher gradient, of the cavities.



Cold EP



Vacuum Furnace

(New) Clean Oven



2-step Baking

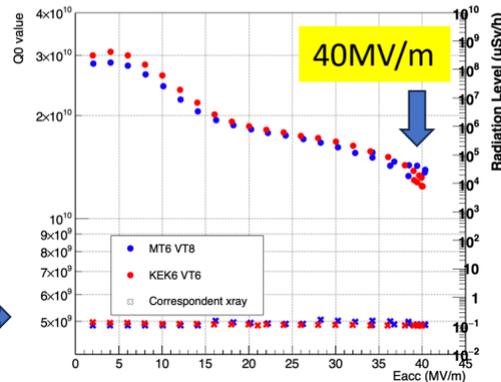
In KEK

Results of FG 9-cell cavity
applied 2-step baking

Possible to achieve **> 40 MV/m** with good Q-value

(温度プロファイルはbackup)

片山氏提供

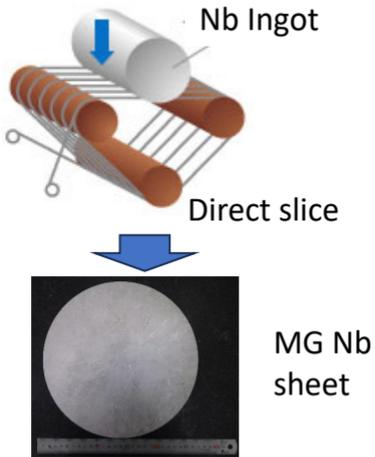


Performance of MG single-cell cavity

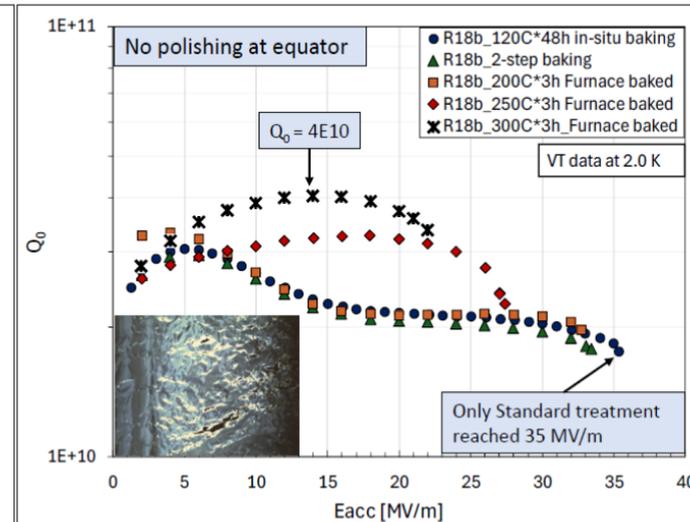
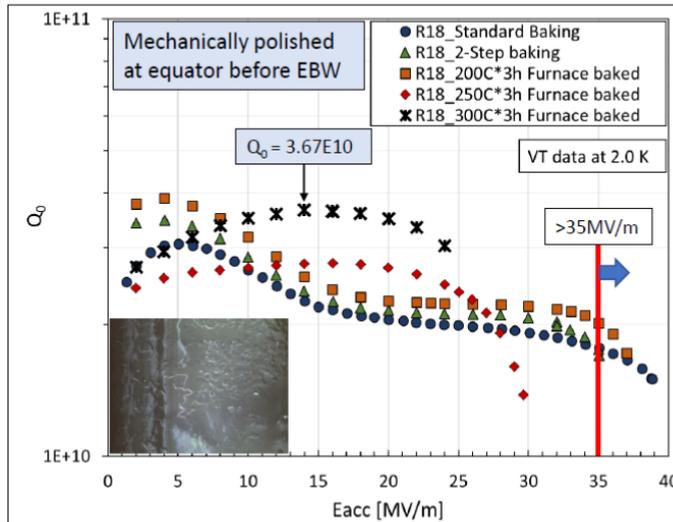


- Single-cell MG cavities satisfied ILC specifications(VT), $> 35 \text{ MV/m}$ & $Q > 1e10$
- Performance of 9-cell MG cavity should be verified.

Fabrication of Medium grain (MG) Nb sheet



Ashish Kumar, TTC meeting in WG1



- No degradation in Eacc after quenching, degradation in Q_0 expected due to trapped flux.
- R18 maximum Eacc is $> 35 \text{ MV/m}$ for all High G surface treatments.
- R18b Eacc $> 35 \text{ MV/m}$ achieved only for Standard treatment, but Q_0 was higher for high Q treatments w.r.t R18.

Merit:

MG sheet cheaper than FG (fine grain) sheet

Demerit : seems difficult to fabricate cavity \rightarrow need check.

Production Schedule of Cavity and Ancillaries for 5-year Plan (FY starts from April in Japan)

黄色の赤枠が2023年度
~2024年度の成果

	JFY2023				JFY2024				JFY2025				JFY2026				JFY2027			CY2028
	CY2023		CY2024		CY2025		CY2026		CY2027		CY2027		CY2027		CY2028					
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	
Cavity	9-cell FG	1 (prototype)			2			1												
	9-cell MG				1 (prototype) + 1			1												
	9-cell MG (oversea)	press test						2												
	VT for recipe establishment																			
	VT for success yield																			
Welding helium tank																				
Ancillaries	Power coupler				4			4												
	Frequency tuner				1			8												
	SCQ magnet+BPM							1												
	Magnetic shield				1			2												
Cryomodule	CM production																			
	CM assembly																			
	CM test ① w/ low power																			
	CM test ② w/ high power																			



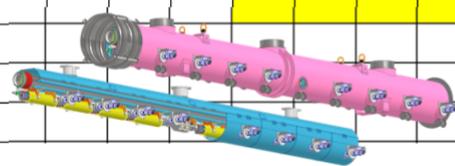
9cell 4 空洞 (2 MG and 2 FG) をKEKで製作中。



(製作)Input coupler 4台



Tuner test with cavity



Cryomodule design for ITN
そして、COI棟の整備、(冷凍機、RF含む)

**Goal: Perform high power cryomodule test
Of 8 ILC cavities with <math><31.5\text{ MV/m}</math> ave.**

In 2027, we plan to complete ITN cryomodule

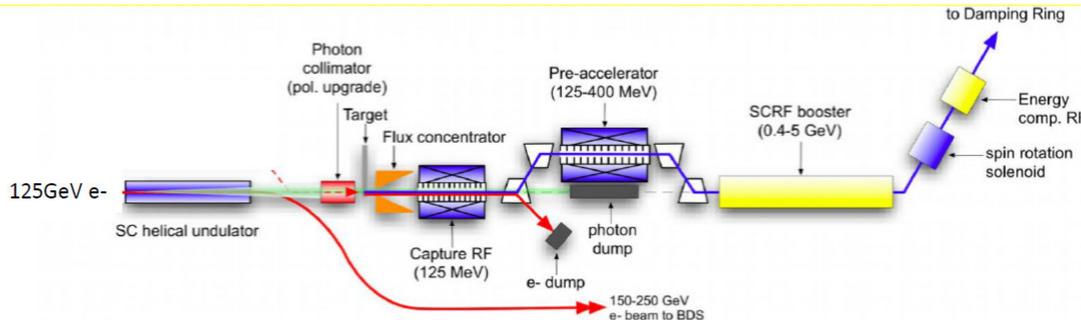
②陽電子源開発



自然界では安定に存在しない粒子。高いエネルギーの電子あるいは光（ガンマ線）を金属ターゲットに当てて電子・陽電子の対を生成する。

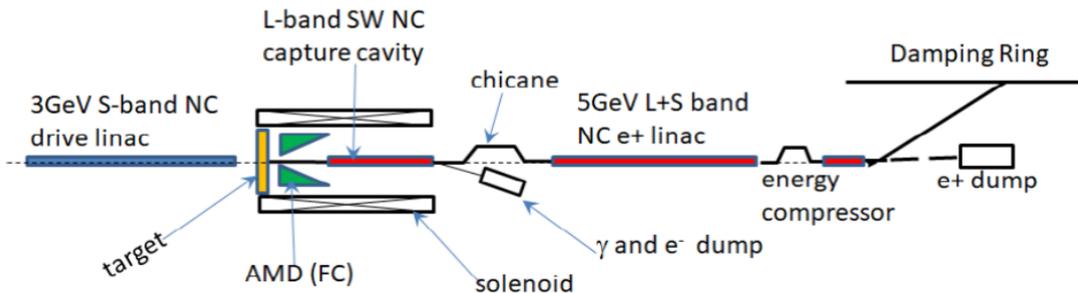
アンジュレータ方式：125GeVの電子をヘリカルアンジュレータに通し、発生したガンマ線をターゲットに当てて電子・陽電子対を生成させる。偏極陽電子（30%）が得られる。

国外中心で開発



電子駆動方式：3GeVの電子をターゲットに当て、電子・陽電子対を生成させる。高エネルギーの電子が不要で、陽電子側のコミッションングが電子側に左右されない。

日本中心で開発



具体的な陽電子源開発の目標値



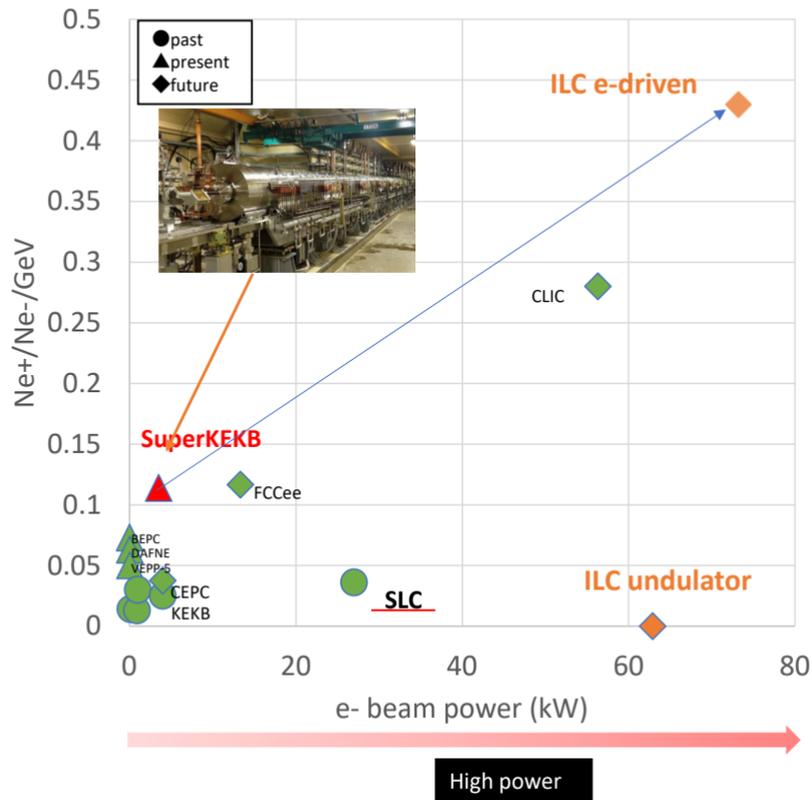
- Linear colliderはCircularと比べて、粒子が一度しか衝突しないため、たくさんの粒子が必要
過去唯一建設されたLinear colliderであるSLC
→最も大強度の陽電子源。パワーでは未だ破られず。
- SLCとのLuminosity ~x5000の差があり、主に
 - バンチ数 x 繰返して ~ x50 → **粒子源開発**
 - Vertical beam size ~ x80 → **ナノビーム開発**
 これら2つが必要。

$$\mathcal{L} = \frac{f_{rep} n_b N^2}{4\pi\sigma_x \sigma_y} H_D$$

陽電子開発としては、
現在、世界最大の陽電子源であるSuper KEKBでの粒子生成の経験を活かし、開発を行う（後述）が、さらにSuper KEKBよりも効率の良い陽電子源の開発が必要。

固定ターゲットから熱負荷が少ない**回転ターゲット**へ

High efficiency



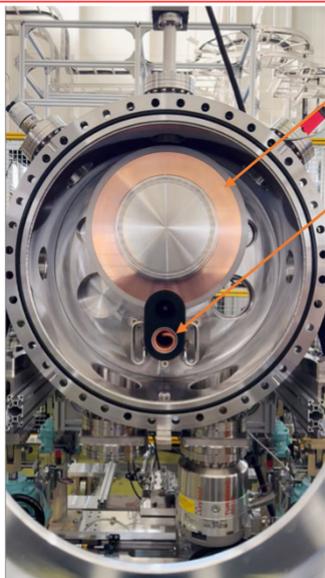
*Since it's not possible to evaluate Ne+/Ne- for ILC(undulator), the value set to 0

The latest development of positron source (in KEK)

口頭発表 FRO704 「大強度陽電子生成標的の開発」 森川 祐、他、（他陽電子関係発表参照）



- 回転ターゲット diskの製作
- FCの組み立てinstall
- ピローシール付きコリメータの製作
- ソレノイドの製作
- 加速管の製作テスト

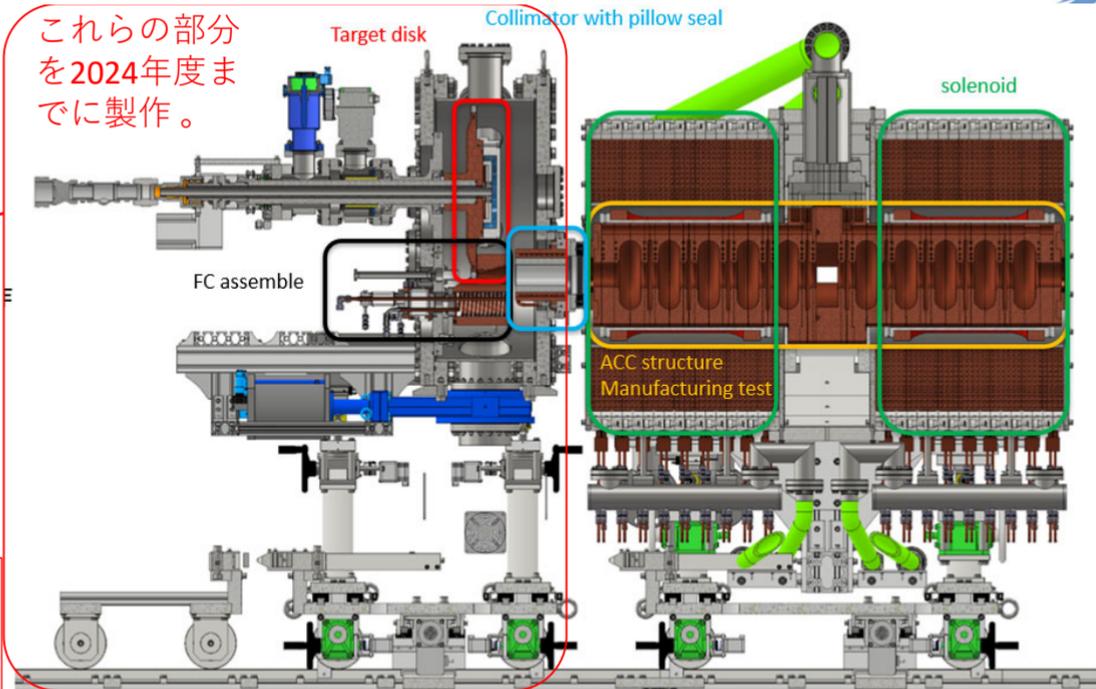


回転ターゲット
Flux
concentrator
(FC)

陽電子生成に必要な200 rpmの回転数を冷却水を流して達成。真空度は 10^{-6} Pa level. で動作確認。

Movie

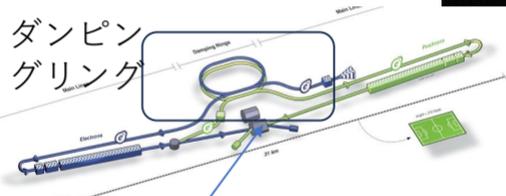
回転ターゲットは真空条件下で安定して回転 → 将来のe+e- collidersに対して、大きなマイルストーンを達成。



これらの部分を2024年度までに製作。

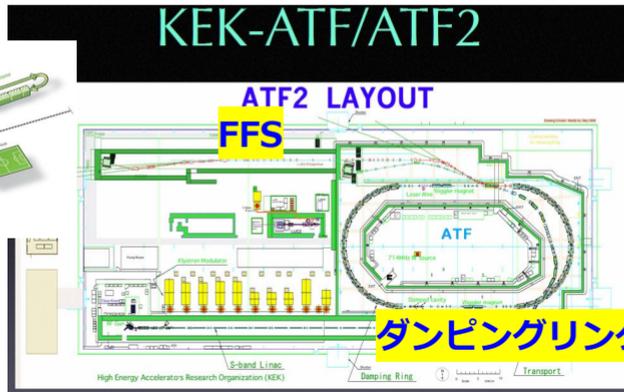
2024年度で陽電子テストのインフラ整備を進めた。W-Cuのターゲット部の冷やしはめテスト。加速管製作テスト、FCのinstall、などを進めた。

③ ナノビーム開発 (ATF)

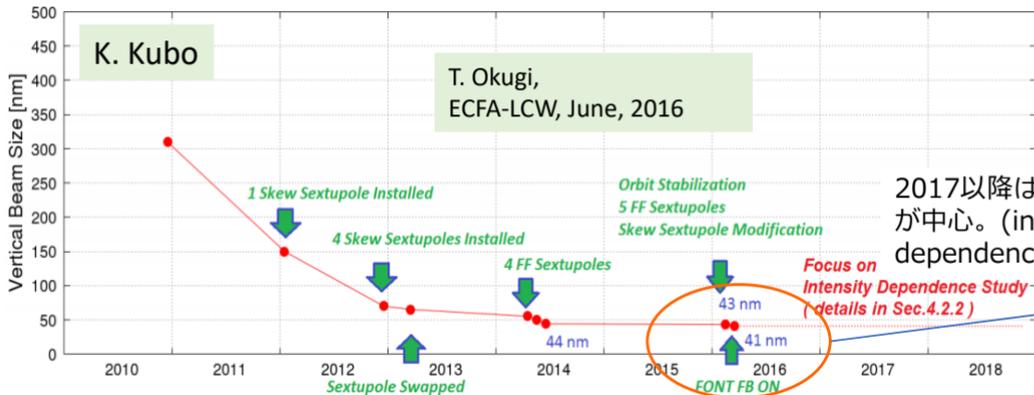


最終収束系

ダンピングリングと最終収束系の開発を行うためにATFでテスト

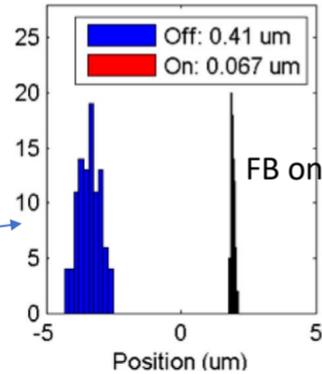


1.28 GeV



2017以降はWake studyが中心。(intensity dependence)

Focus on Intensity Dependence Study (details in Sec.4.2.2)



衝突点での安定性

Goal 1:

Establish the ILC final focus method with same optics and comparable beamline tolerances (opticsの詳細設計と調整)

- ATF2 Goal : 37 nm (1.28GeV) → ILC 7.7 nm (125 GeV)
- Achieved 41 nm (2016) →

Goal 2:

Develop a few nm position stabilization for the ILC collision by feedback

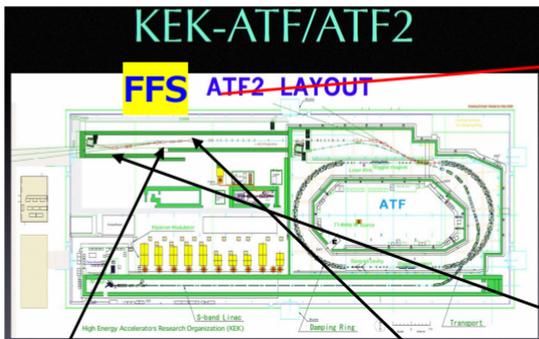
- FB latency 133 nsec achieved (target: < 300 nsec)
- positon jitter at IP: 410 → 67 nm (2015) (limited by the BPM resolution)

ナノビーム開発の目標と最近のナノビーム開発 (ATF) (JFY2023-2024)



施設報告 WHP012「KEK先端加速器施設(ATF)におけるナノビーム技術開発の現状」奥木 敏行、他（他ナノビーム開発参照）

安定なナノビームを創る



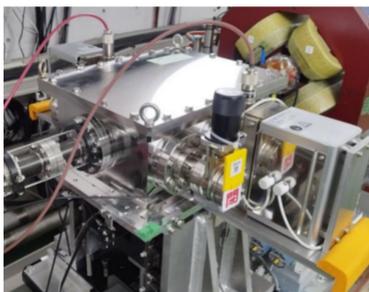
1.28 GeV

- ◆ ATF2ビームラインは、リニアコライダーの最終焦点システム（FFS）をテストするための**世界で唯一のテスト加速器**である。
- ◆ 以下の3つの研究テーマは、ATFで進めるべき重要なテーマである。
 - ◆ ウェークフィールド緩和
 - ◆ 高次収差の補正
 - ◆ ビームチューニング（**機械学習**）
- ◆ 今迄のナノビーム開発(IP測定、FONT)とさらにこれらをもとにした**ナノビーム (37nm)の生成と長期安定化**が最終目的。
- ◆ ATF2ビームラインでの技術研究は、ATF国際コラボレーションで進められている。
- ◆ 2023年度は14週運転。2024年度は20週運転。2025年度は14週を予定。

■ ATF2 final focus magnet installed in beam line

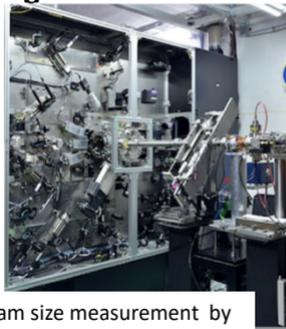


■ Wakefield effect for nanobeam (see next)



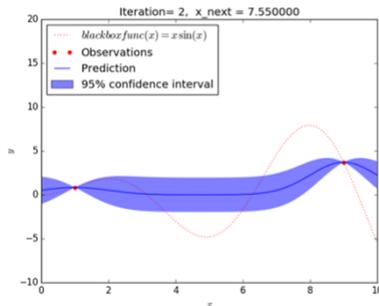
Test chamber prepared.

■ Improvement of nano Beam measurement Systems by using laser interference



Beam size measurement by laser interference pattern

■ Stabilization beam size by optics tuning and machine learning.

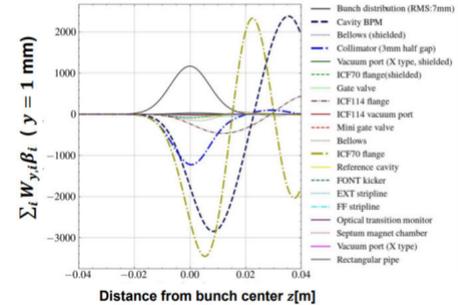
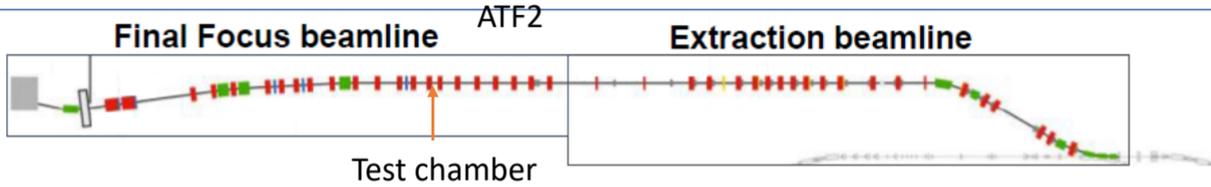


ナノビーム高度化対策実施、ウェークフィールドの評価（**2023年度 総研大博士論文：阿部優樹**）

ATF2におけるfinal focus pointへのwake fieldの抑制



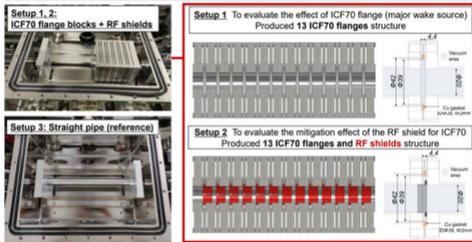
Wake function of each components



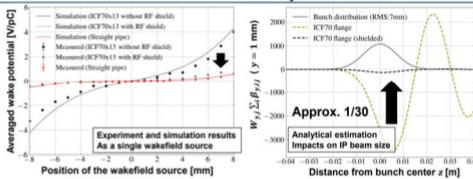
• ICTF70 flange, bellows, screen monitorなどを並べられているが、これらがATF2 ビームラインでの wakefield の要因になっている。

- **2023年度**：ICF70フランジが与えるWakefieldの影響およびRFマスクによる軽減効果を、テストチェンバーで検証。
- **2024年度**：試験結果を踏まえ、低インピーダンスフランジとベローズの設計・製造し、ビームラインを更新。
- **2025年度**：更新した真空部品のナノビームに対するwakefieldの低減効果を検証する。

The experimental setups to evaluate the wakefield mitigation



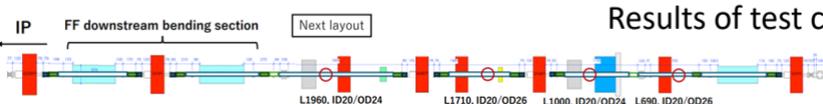
Evaluation results of wakefield effects by ICF70



- Conversion pipe (NW25-ICF70)
- New clamp chain type bellows (NW25)
- Tapered pipe
- Clamp chain type vacuum port
- Clamp chain type pipe



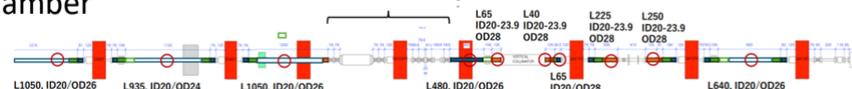
Test chamber for evaluation of wake field



Results of test chamber

Replacement of bellows and flange

Wake correction & wake study section





(C)

- A) ILC概要とITN(ILC Technology Network)について
- B) ILC加速器に必要な最先端技術とその開発について(JFY2023~2024)
- C) まとめと今後

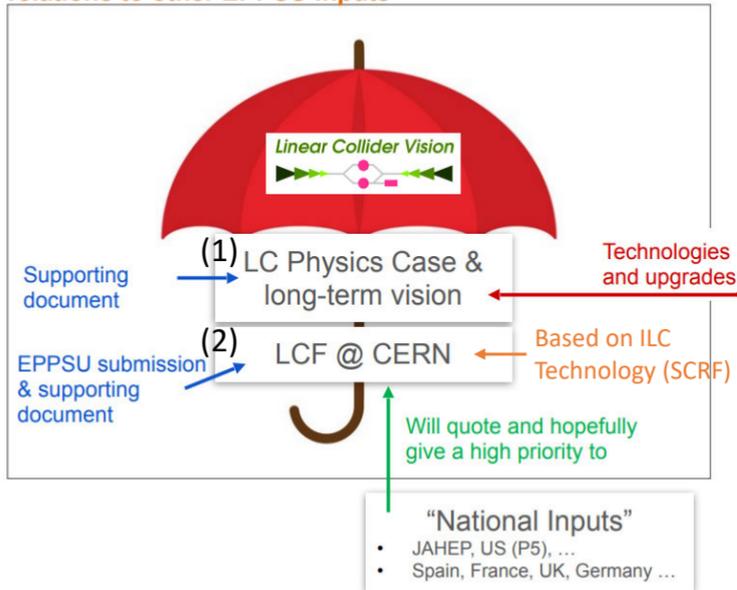
LC vision (To discuss more future LC)



We only show that the LC vision is undergoing to gather future possibilities LC for TeV region (1) all over the world.

LC Vision Documents

and their relations to other EPPSU inputs



大電流ビーム加速可能な超伝導空洞 (SCRF)の観点からは将来右のようなupgradeは期待される。

Baseline technology

ILC in Japan (IDT)

CLIC at CERN

Advanced SCRF

C³

ERLs

HALHF

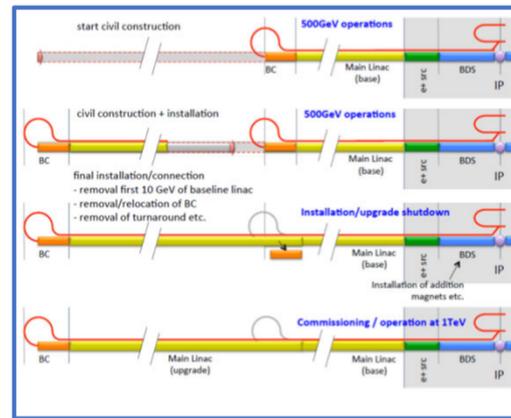
10 TeV Wakefield

$\gamma\gamma / e\gamma$ collider

Beyond Collider

Energy upgrades:

- 500GeV (31.5 MV/m $Q_0=1 \times 10^{10}$)
- 1TeV (45 MV/m $Q_0=2 \times 10^{10}$, 300 MW)
- more SCRF, tunnel extension



Further energy upgrades can be realized by

- Nb₃Sn cavity (>80MV/m ?)
- Nb Traveling Wave (TW) structures (HELEN) (>70MV/m)

更に更に将来 $1 \times 10^{36} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 以上の luminosityとして超伝導ERL技術を用いたLCも提案されている。

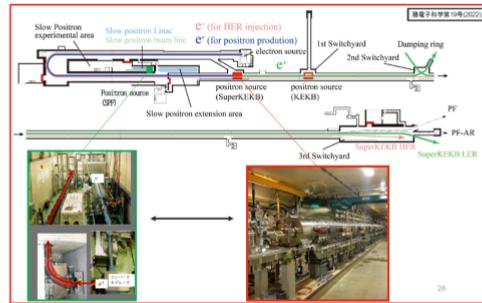
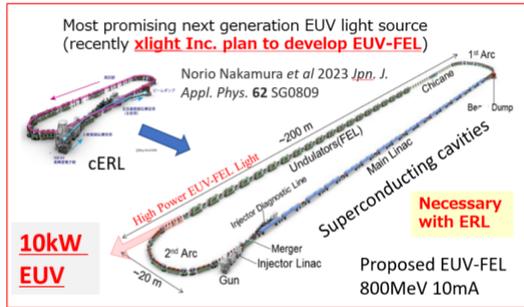
Future e+e- colliders using recycling Energy-Recovery Linacs
- Vladimir Litvinenko, MOCD2 (IPAC25)

詳細は 8月6日 企画セッション② WEKO06
「電子陽電子ヒッグスファクトリー計画の物理と展望」
末原 大幹

まとめと今後



- ILCは、250GeV以上のコライダーを実現する次世代加速器として、非常に有望なプロジェクトです。
- ILC加速器開発は、ITNの下で国際的な協力を通じて実施されており、特に、日本では、文部科学省の補助金により、ILC実現に重要な超伝導空洞、ナノビーム、陽電子といった3つの重要な加速器技術の開発を5か年計画で2023年度から行っている。開発は順調に進んでいる。
- このプログラム後、ILCの実現加速を期待するとともに、本プログラム後は、本技術を活用して、様々な加速器への応用が期待される。将来的な応用分野としては、超伝導空洞技術の応用（X-FEL、EUV-FELなど）、陽電子技術の応用（FCC-ee、CEPC、低速陽電子など）、およびナノビームの応用（次世代光源、機械学習などのビーム調整技術の高度化など幅広い加速器への活用。）において、多くの相乗効果が期待される。また、新たな次世代加速器研究者の若手育成にも貢献している。



EUV-FEL by advanced SRF technology
 M.Yamamoto, "Development for Various Applications at Compact ERL as a high-power CW SRF linac in KEK", IPAC25 Monday

Slow positron facility by advanced source technology

Synergy about new-generation light source (ex. Diamond Light source)

KEK ITNメンバーと謝辞



KEK ITNメンバー(2025年度現在)

阪井 寛志、梅森 健成、佐伯 学行、山本 康史、道園 真一郎、山本 明、オメット マチュュー、道前 武、山田 智宏、片山 領、井藤 隼人、荒木 隼人、有本 靖、植木 竜一、クマール アシーシ、シャナブ サフワン、原 隆文、後藤 剛喜、新井 宇宙、江木 昌人、加古 永治、久保 毅幸、荒川 大、片桐 広明、松本 利広、中島 啓光、明本 光生、松本 修二、三浦 孝子、中西 功太、原 和文、清水 洋孝、仲井 浩孝、本間 輝也、平木 雅彦、渡辺 勇一、照沼 信浩、奥木 敏行、阿部 優樹、荒木 栄、アリセフ アレクサンダー、久保 浄、倉田 正和、黒田 茂、中村 英滋、ポポフ コンスタンティン、榎本 嘉範、福田 将史、森川 祐、佐藤 幹、横谷 馨、リジャブ バジパイ、エリックビクルンド、結束 汐織



iCASAメンバーを中心とした現在のKEKのILC開発メンバー(+α) (picture on 2025.April)

- 本研究は、文部科学省「将来加速器の性能向上に向けた重要要素技術開発」事業 JPMXP1423812204の助成を受けたものです。
- また本研究は一部、日米科学技術協力事業（高エネルギー物理学）（2022-19-3、2025-04-3）のサポートを受け、開発が進められております。
- またITNに関係する国内（大学、研究機関関係者）、国外の研究者に感謝いたします。