

日本のコライダーの系譜と将来展望 国際リニアコライダー (ILC)

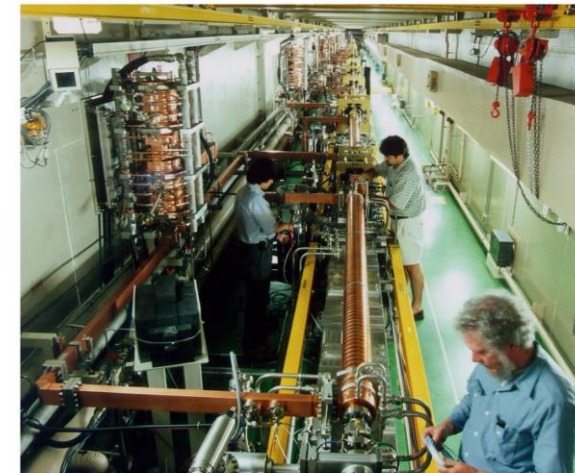
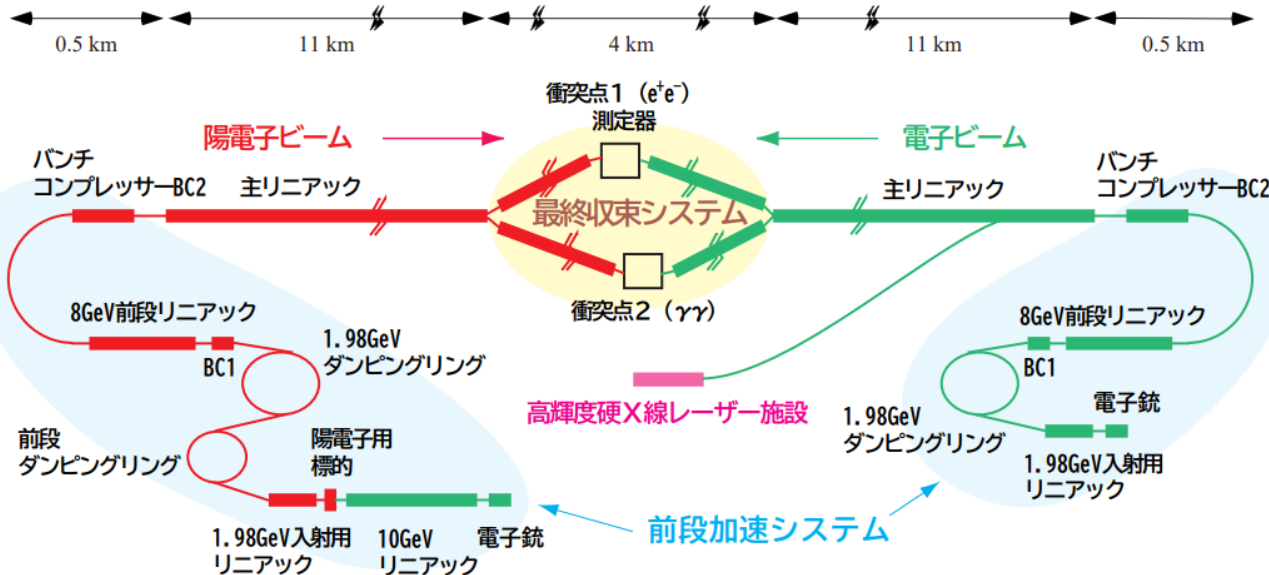
KEK・加速器研究施設
/IDT-WG2

道園真一郎

- リニアコライダーの歴史
- ILCの取り組み
- 250GeV ILC
 - 粒子源
 - 超伝導高周波加速
 - ナノビーム
- ILC テクノロジーネットワーク 国際協働による加速器開発
- まとめ

リニアコライダーの歴史

- 1965年: 米コーネル大学のモーリー・ティグナー がはじめてリニアコライダーのアイデア提案
 - 1984年: 日本でのリニアコライダーの開発研究スタート(JLC)。はじめはS-band (2856MHz, 常伝導)まもなくX-band (11.4GHz)
 - 1987年: 日米協力によるリニアコライダー研究スタート(米国はNLC)
 - 1987年-1998年: 最初のリニアコライダーSLC(SLAC)運転。偏極電子ビーム(～80%)を使用
 - 1988年: 欧州合同原子核研究機関(CERN)で、2ビーム方式を採用した「コンパクト・リニアコライダー(CLIC)」の設計を開始
 - 1990年: TESLA(1.3GHz、超伝導) 参入
- (参考) <https://www2.kek.jp/ilc/ja/whatsilc/history/> (by 白形さん、横谷さん)

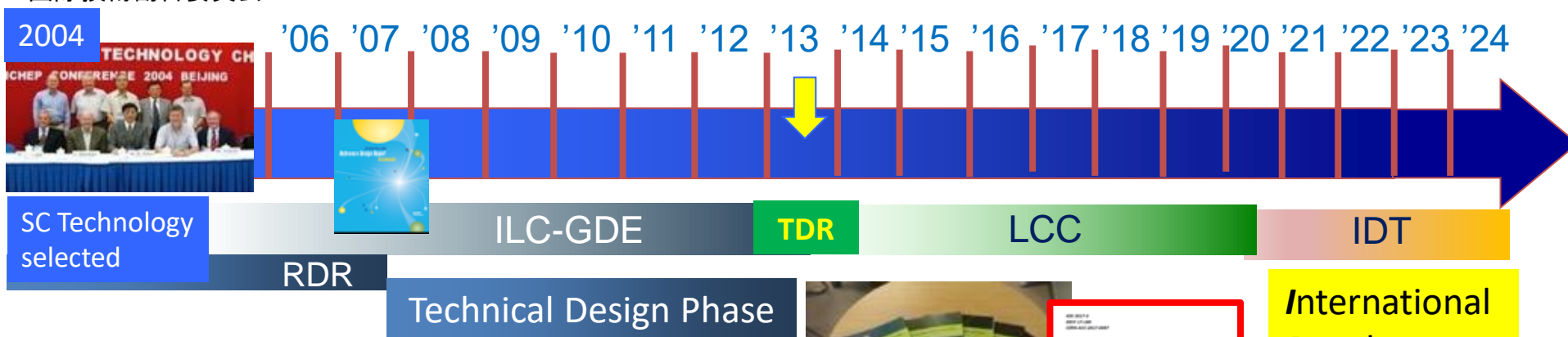


<https://www-jlc.kek.jp/licopo/documents/JLC.project.pdf>

国際協力によるILC研究開発

ITRP: International Technology Recommendation Panel

国際技術勧告委員会



TDR: Technical Design Report

技術設計報告書

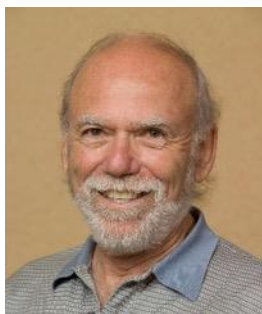
参加国: 49、参加機関: 392、参加者: >2,400



International Development Team



執行部(EB)議長 中田達也
(スイス連邦工科大学ローザンヌ校)



バリー・バリッシュ

GDEディレクターとしてRDRおよびTDRをまとめる。2017年に重力波観測でノーベル物理学賞受賞



リン・エバンス

LCCディレクター
元LHCプロジェクトマネージャー
LHCの完成にリーダーシップを発揮



European XFEL

LHC

LCLS-II

ILC国際推進チーム(IDT)

国際将来加速器委員会
(ICFA)

ILC 国際推進チーム (IDT)

執行部

執行部議長・作業部会1部会長	中田 達也(スイス連邦工科大学ローザンヌ校)
欧州地域代表	スタイナー・スタップネス(CERN)
米州地域代表	アンディ・ランクフォード(カリフォルニア大学アーバイン校)
アジア太平洋州地域代表	ジェフリー・テイラー(メルボルン大学)
作業部会2部会長	道園 真一郎(KEK)
作業部会3部会長	ジェニー・リスト(DESY)*
KEKリエゾン	岡田 安弘(KEK)

作業部会1
準備研究所設立

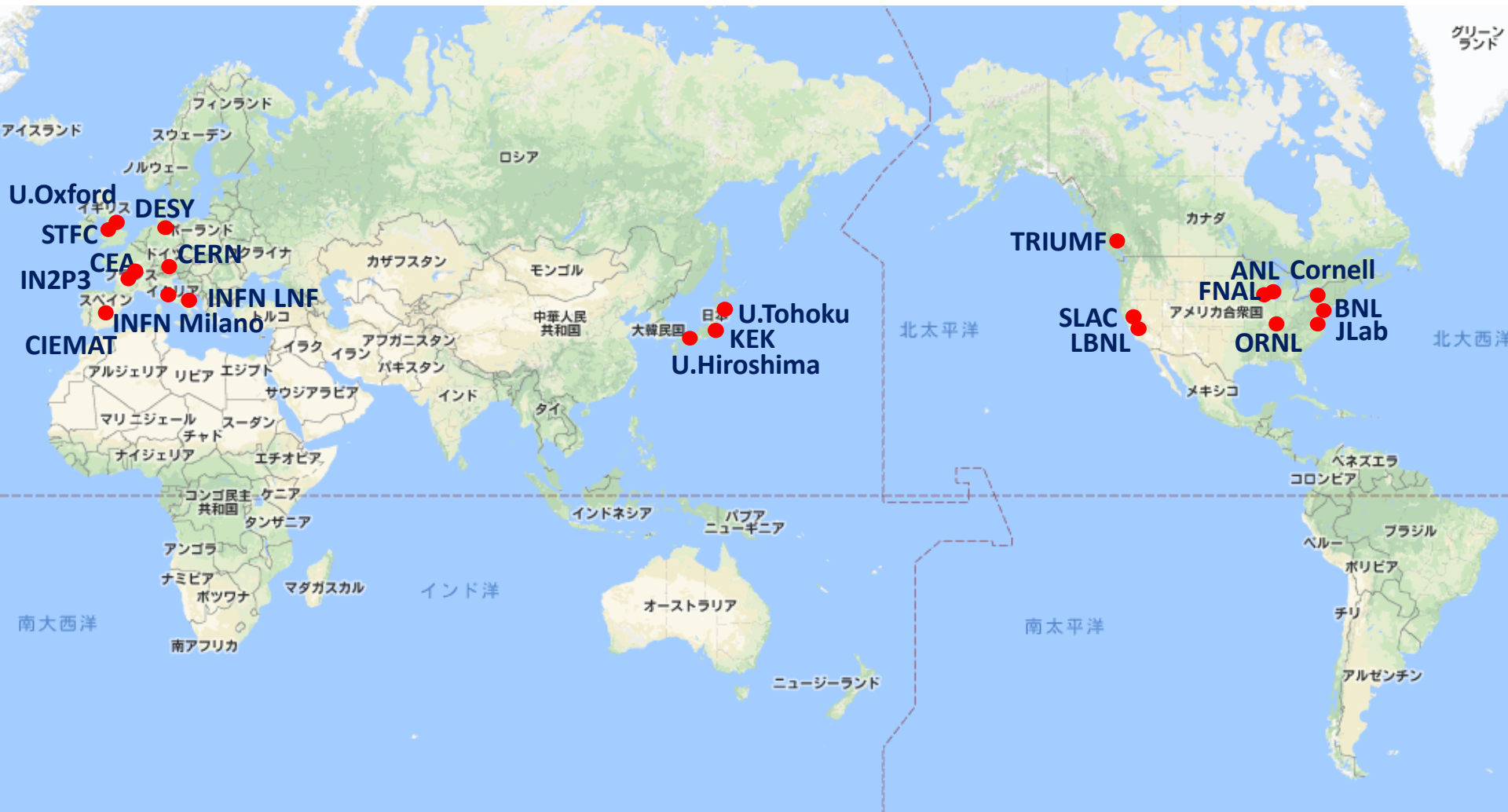
作業部会2
加速器

作業部会3
物理・測定器

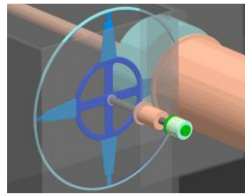
*IDT設立時の村山斉IDT-WG3部会長は、P5議長就任に伴い2022.9に交代

IDT-WG2

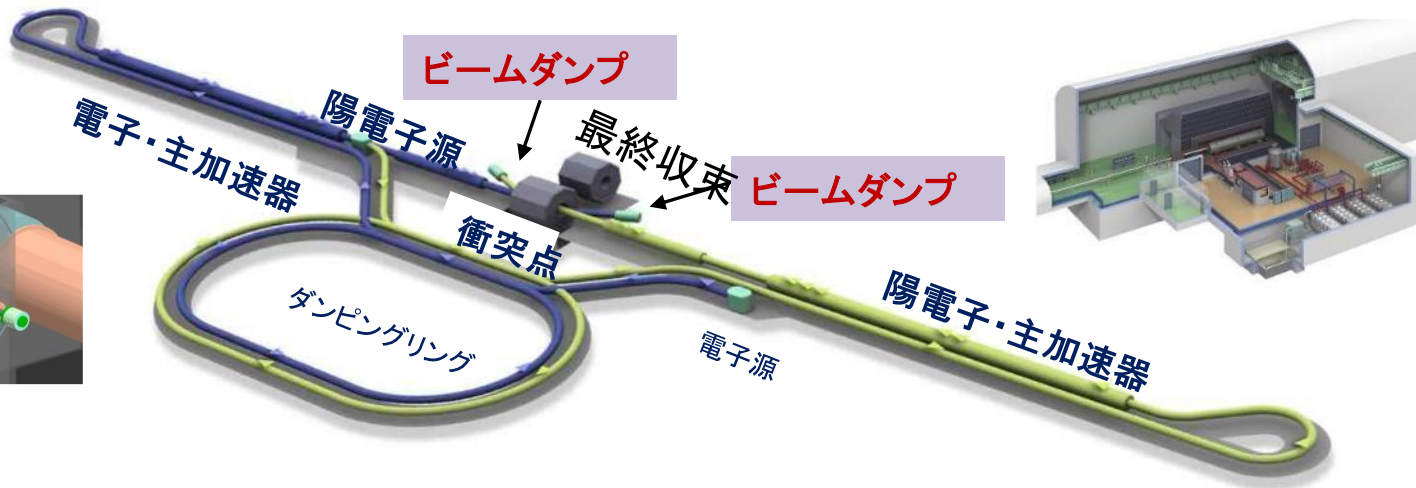
国際推進チーム (IDT) の加速器部門 (WG2) は、世界の約50名の加速器研究者が参加し、ILC加速器開発研究の議論を行っている。



250GeV ILC概略



陽電子源

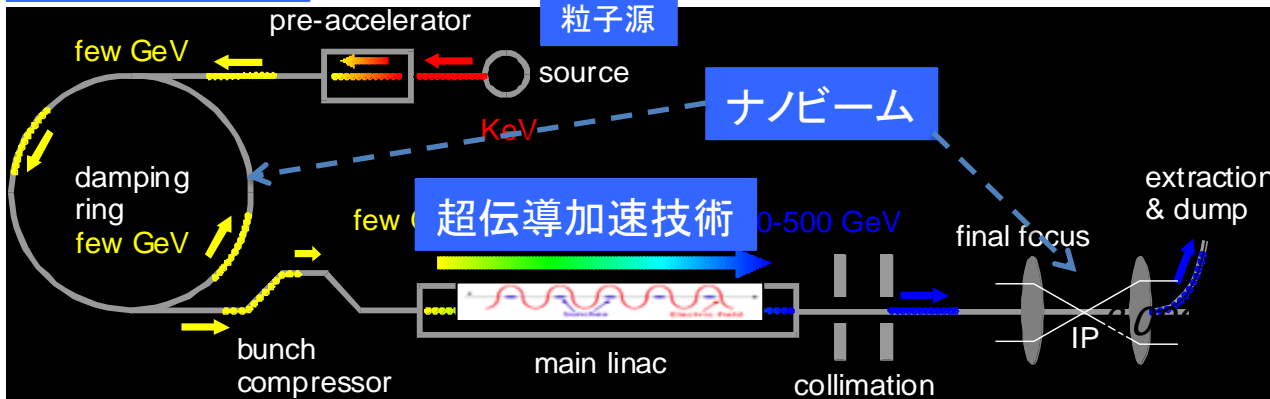


加速器システムはエリアごとに独立にモジュール化
 電子・陽電子源、ダンピングリング、主加速器、ビーム伝送(最終収束)、ビームダンプ



~9,000台の空洞を製造

重要な技術



項目	パラメータ
衝突エネルギー	250 GeV
長さ	20 km
ルミノシティ	$1.35 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
繰り返し	5 Hz
ビームパルス幅	0.73 ms
電子・陽電子/バンチ	2×10^{10} (3.2nC)
ビーム電流	5.8 mA (in pulse)
衝突点ビームサイズ	7.7 nm@250GeV
超伝導空洞の電界	31.5 MV/m (35 MV/m)
空洞のQ値	$Q_0 = 0.8 \times 10^{10}$

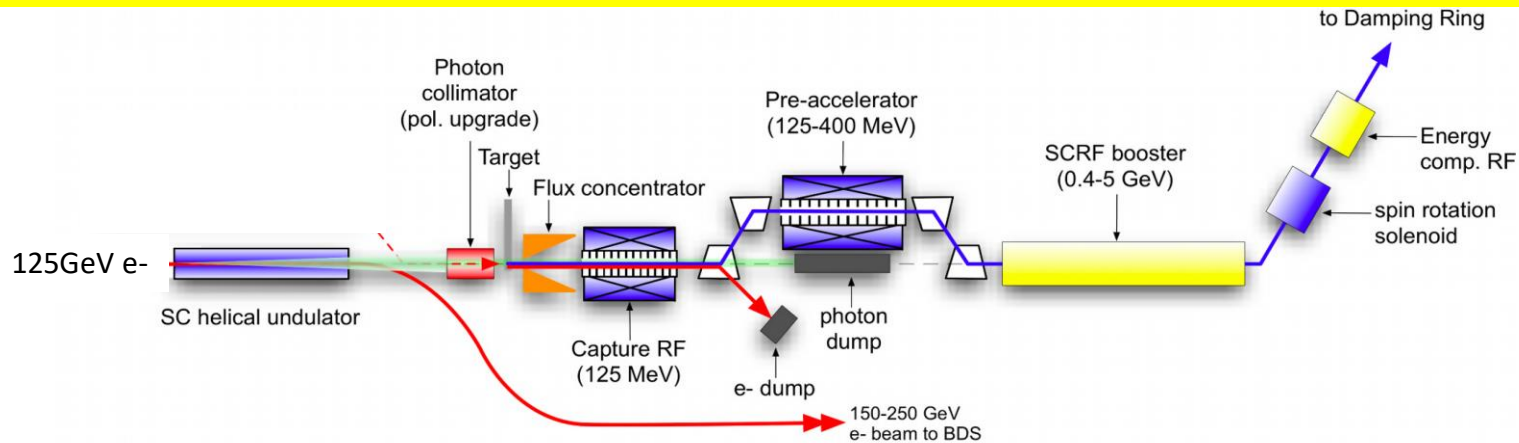
ビームを創る 粒子源 (Sources)

衝突型加速器を実現するには、十分な量の電子と陽電子が必要。

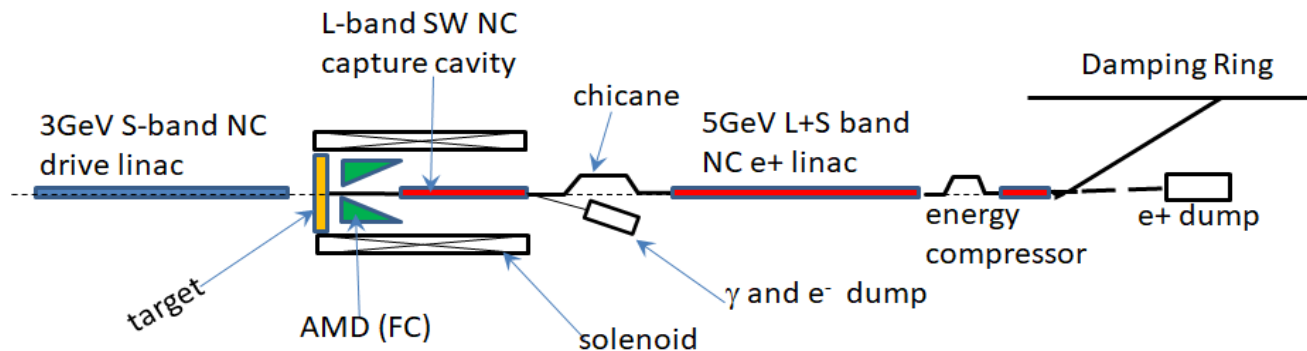
陽電子源

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



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。



ビームを加速する 超伝導高周波(SRF)

ヒッグス粒子生成には125GeVの電子・陽電子が必要。
ここまできちんとビームを加速する必要がある。

超伝導加速空洞の電磁場の様子

青い部分が温度2Kの液体ヘリウム

ぐるっと回っているのが磁場

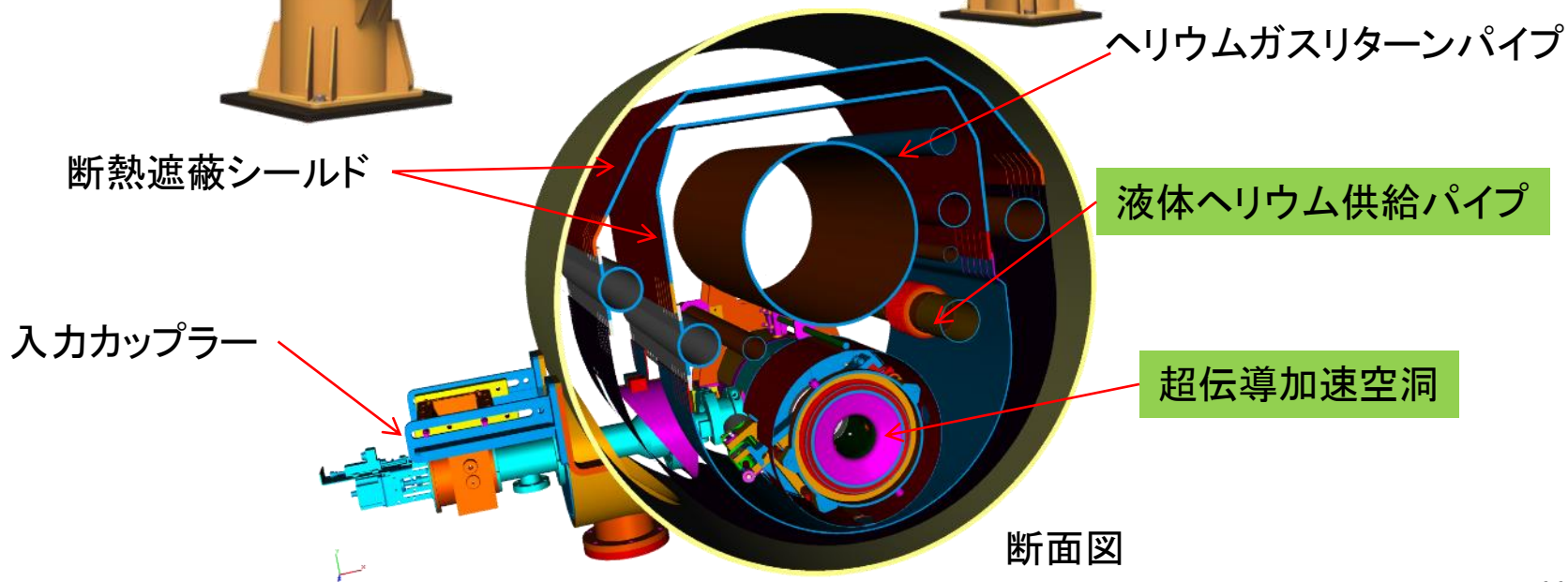
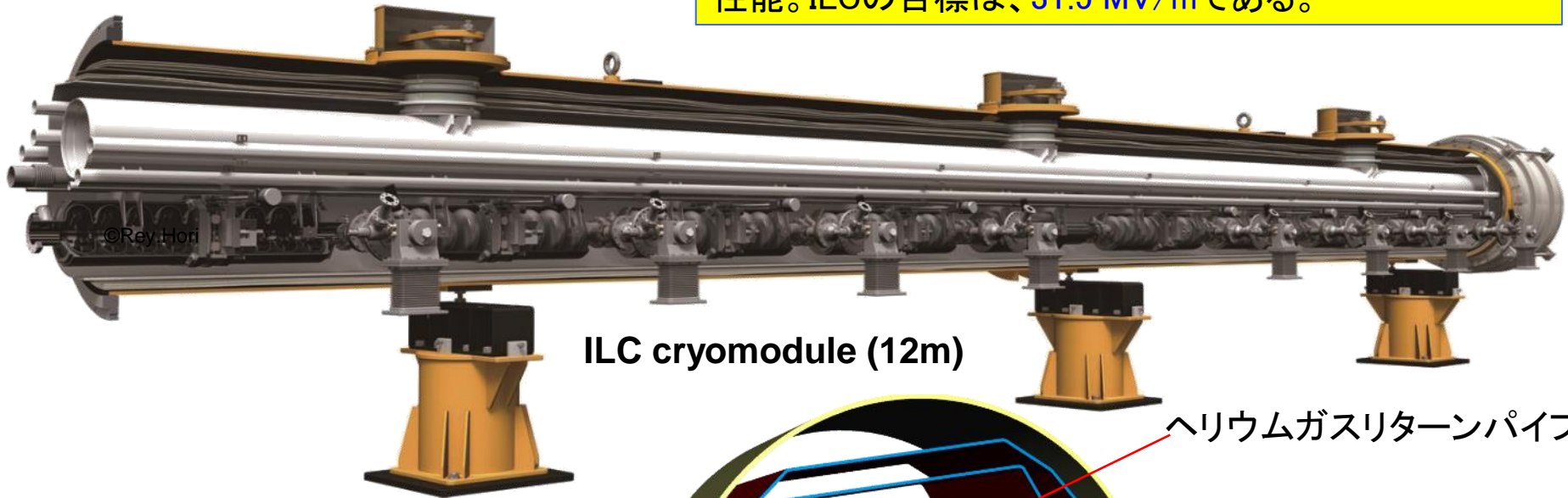
糸巻き状に中心軸上にできるのが電場
この電場で粒子を加速する。

大電力クライストロンからのマイクロ波パワー
を導入する入力カップラー。

ILC 主リニアックの鍵となる技術

9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

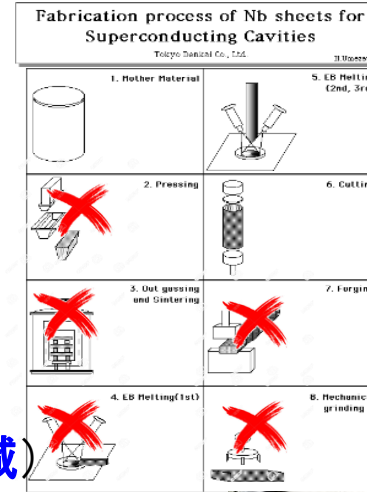
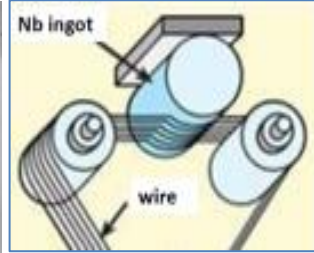
運転性能(加速勾配)とは、空洞をクライオモジュールに組み込み、ビームを加速をする時(運転時)における性能。ILCの目標は、**31.5 MV/m**である。



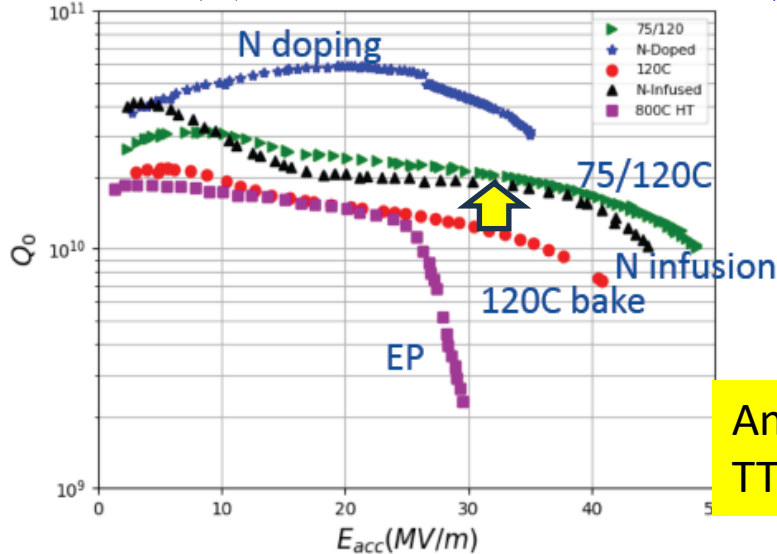
超伝導空洞の高性能化

2018年度から超伝導空洞の高性能化(コスト削減、性能向上)に取り組んできた(日米協力)

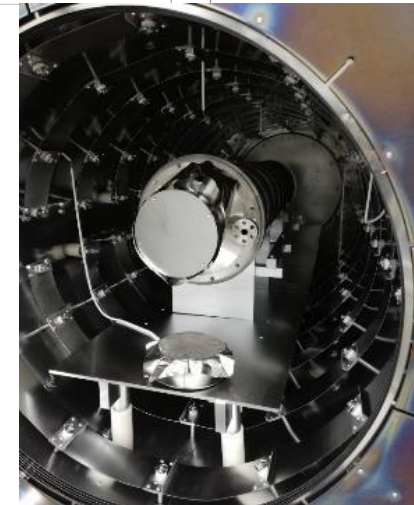
ダイレクトスライスによるニオブ材料のコスト削減



表面処理の改良による空洞性能の向上(熱負荷低減)



Anna Grassellino
TTC2019 Vancouver



→ILCテクノロジーネットワークでは世界協働で空洞製造・表面処理による性能向上を実証

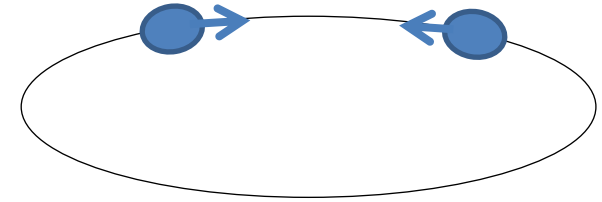
ビームを絞る ナノビーム (Nanobeam)

ヒッグス粒子を効率よく作るためにはビームを細く絞って電子と陽電子を衝突させる必要。
線形加速器は一度しかすれ違わないので、できる限り細く絞り衝突させる。

円形加速器とリニアコライダー

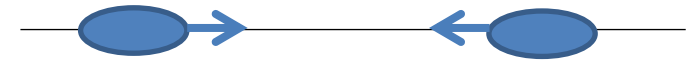
円形加速器

- ・周回毎に衝突する機会がある。
- ・しかし、衝突点ではビームが周回できる限界までしか絞れない。
(強く絞り過ぎると周回できなくなる)



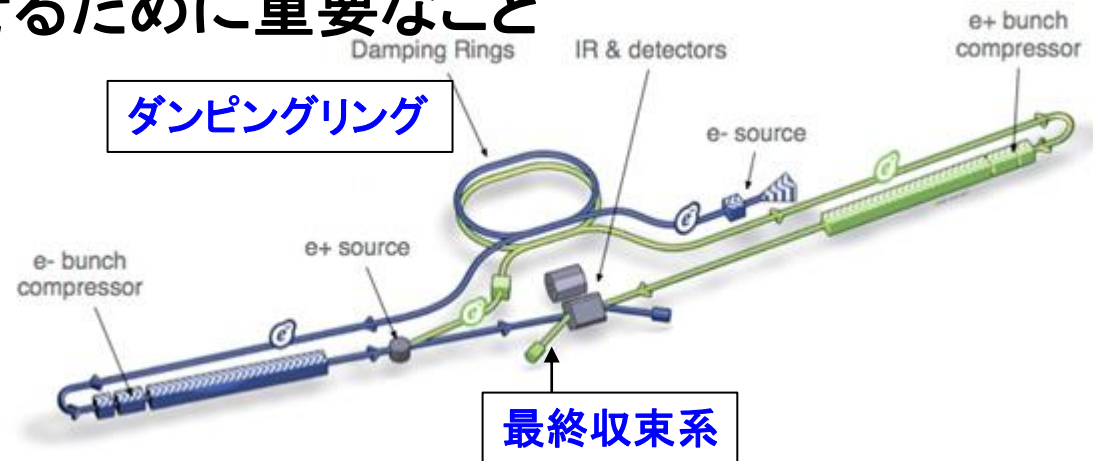
リニアコライダー

- ・1回作ったビームは衝突の機会が1回しかない。
- ・しかし、極限までビームを絞ることができる。
⇒ リニアコライダーでは衝突点でビームを小さく絞って衝突させることが重要。



ILC でビームを絞り衝突させるために重要なこと

1. 平行性の良いビーム
⇒ **ダンピングリング**
2. 性能の良いレンズ系
⇒ **最終収束系**



KEK-ATF2での国際協力によるナノビーム試験



Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences

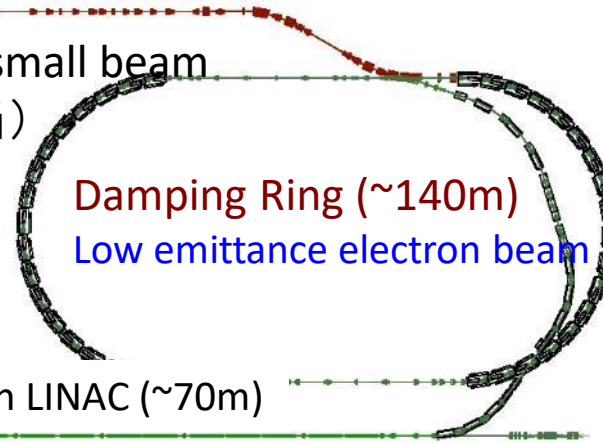
ATF2: Final Focus Test Beamline

Goal 1: Establish the technique for small beam

37nm (250GeV ILCの7.7nm相当)

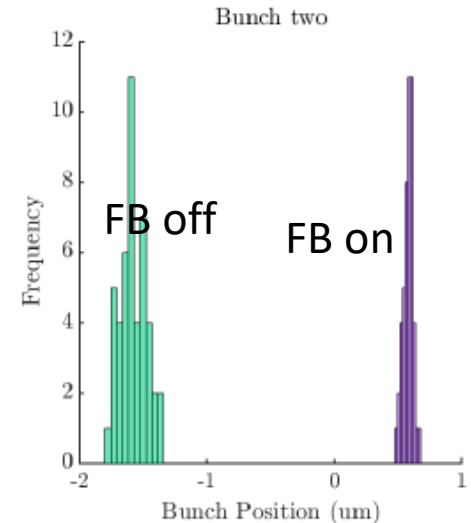
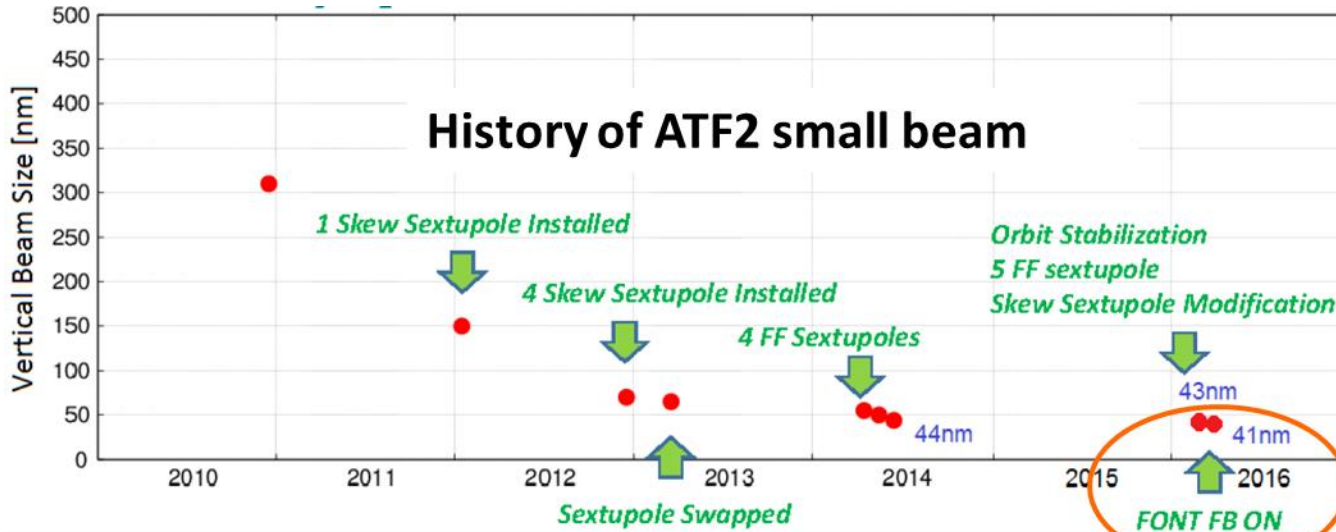
Goal 2: Stabilize beam position

300ns以内にフィードバック



133nsでフィードバック
安定度はBPMの分解能で制限

Bunch	Position jitter (nm)	
	Feedback off	Feedback on
1	106 ± 16	106 ± 16
2	96 ± 10	41 ± 4



現在の状況：国際協働による加速器開発 (ILCテクノロジーネットワーク)

世界で協力してILCの技術課題を解決

ILC実現に向けてのIDTのスコープ

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もの
(コロナ等の)大きな事象がなくすべて順調に行った場合の想定

テクノロジー・ネットワーク
フェーズ

準備フェーズ

建設フェーズ
(建設および試運転で10年間)



R&Dと共通の見解と理解を得るための活動

ILC準備研究所および政府間
ディスカッション

現在は、準備研究所を目指す**テクノロジーネットワーク**段階。
国際協働で加速器研究開発を推進 !

2021年5月

ILC準備研究所の
ワークパッケージ
(WPs)



2022年6月～

ITN

喫緊を要する
重要項目
WP-プライム



ILC テクノロジーネットワーク (ITN)

— 国際コラボレーションプログラム —

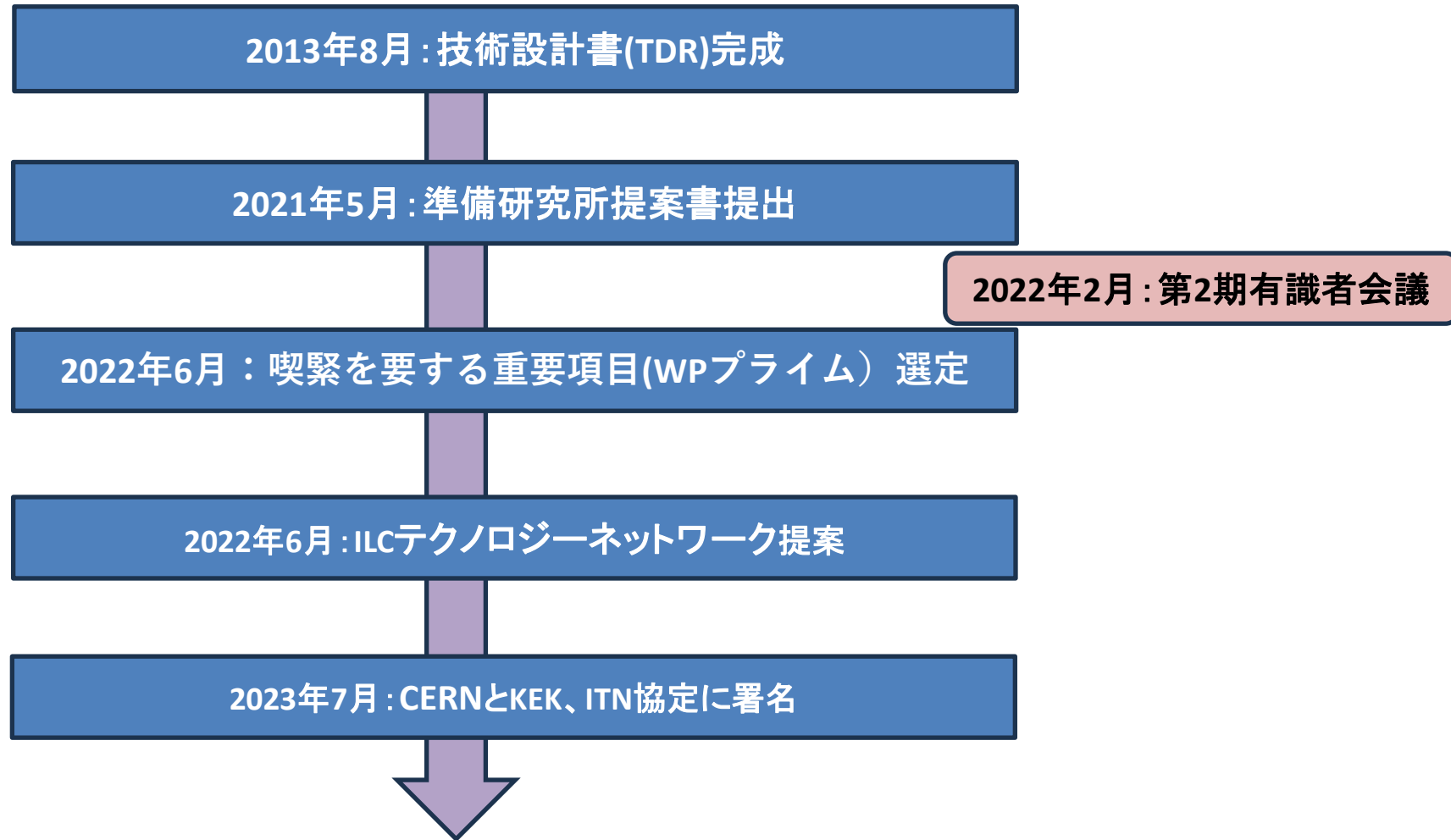
・ **加速器 R&D**

- ・ 超伝導RF
- ・ 電子・陽電子源
- ・ ナノ・ビーム

他のコライダー計画
とのシナジー

KEK は、2023年4月からR&D 予算を取得・執行

テクノロジーネットワークフェーズに至るまで

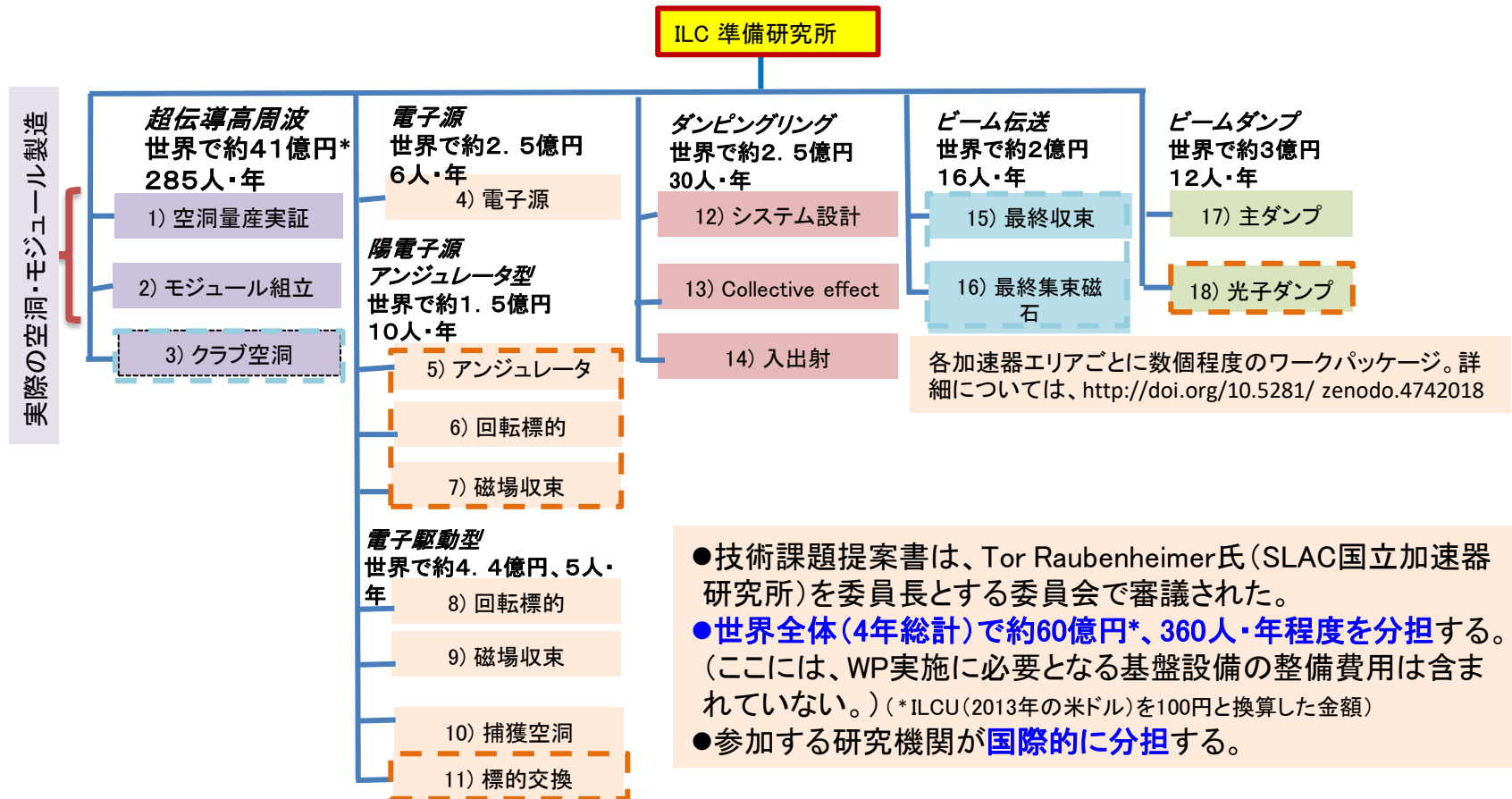


ILCの技術的な現状

- ILCは2013年、技術設計書(TDR)を完成・出版し、ヒッグスファクトリーに向けた基盤技術を実証
- CLIC(CERN)、CEPC(中国) FCC-ee(CERN)、C3(米国)等、追従し競い合う計画は、概念設計書(CDR)からTDR完成を目指す段階(CEPCは、2023年内にTDR出版)
- ILCは、更なる技術高度化・コスト削減等に向けた課題が指摘されているが、ヨーロッパFEL等の超伝導加速器の普及やATFでのナノビーム収束研究などもあり、ILC実現に大きな影響を及ぼす技術的障壁は無い。

準備研究所での技術課題に関する取り組み

2021年5月、技術的課題などについてIDT-WG2で、「**技術課題提案書**」に世界で分担するワークパッケージ(WP)としてまとめた。(準備研究所提案書)



ILCの技術課題と有識者会議

- 学術会議や有識者会議でこれまでに指摘された、**実現に向けた更なる技術高度化、信頼性向上の実証に取り組む**には、適切な予算規模と期間が必要で、かつ、国際協働のもとに進めることが大切
- 2021年の準備研究所提案書*1で、これらの技術課題を含め準備研究所で実施することを以下のように提案
 - 技術高度化への取り組み(18のワークパッケージ)
 - 建設実施に向けた詳細技術設計書(Engineering Design Report:EDR)
 - 現地調査(加速器土木設計、環境調査等)
- 2022年の有識者会議報告(国際リニアコライダー(ILC)計画の諸課題に関する議論のまとめ)*2では、準備研究所のスタートは時期尚早としつつも、次世代加速器に求められる技術開発課題について、各研究機関との**国際協働によって、更なる研究開発を展開していくべきとの答申を受けた**

*1 準備研究所提案書: <https://linearcollider.org/wp-content/uploads/2023/09/IDT-EB-2021-002.pdf>



*2 有識者会議報告: https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/shinkou/064/toushin/220214.htm



ILCテクノロジーネットワーク

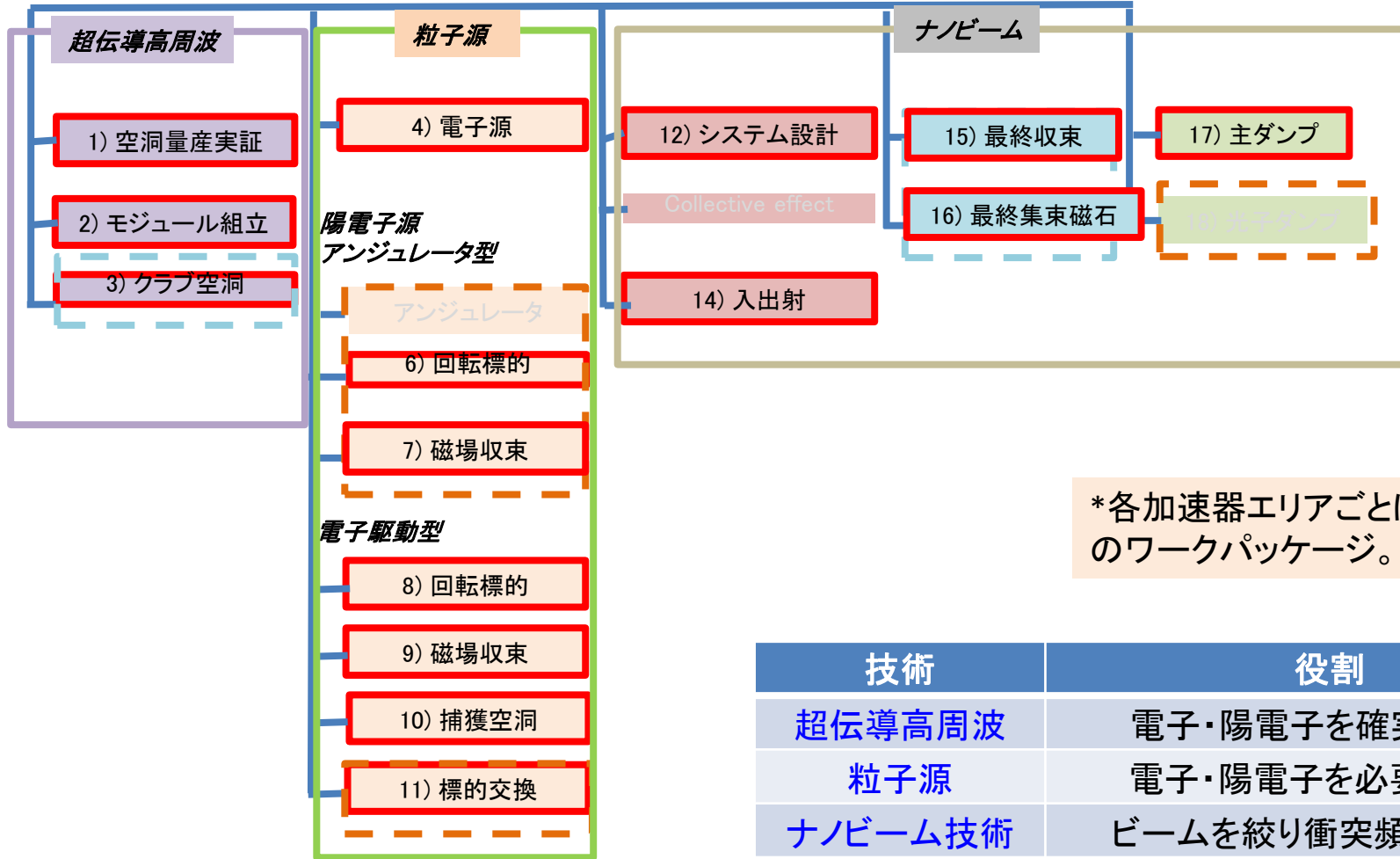
- 有識者会議での議論を受けて、IDT は、技術課題から特に重要で時間を要する課題(WP プライム)を再度洗い出し、選択されたワークパッケージにまとめた*1
- IDTはKEKと共同で、WPプライムを国際協働で実施する枠組み「ILCテクノロジーネットワーク:ITN」を提案*2
- ITNは、KEKと参加研究機関の二機関協力協定により構築される

*1 ITNとワークパッケージ: <https://linearcollider.org/wp-content/uploads/2023/09/IDT-EB-2023-002.pdf>

*2 ITNの枠組: <https://linearcollider.org/wp-content/uploads/2023/09/IDT-EB-2023-001.pdf>



ILCテクノロジーネットワーク



*各加速器エリアごとに数個程度のワークパッケージ。

技術	役割
超伝導高周波	電子・陽電子を確実に加速
粒子源	電子・陽電子を必要量生成
ナノビーム技術	ビームを絞り衝突頻度最大に

<https://linearcollider.org/wp-content/uploads/2023/09/IDT-EB-2023-002.pdf>

ILCテクノロジーネットワークでの取り組み目標例

① 超伝導高周波

ILCでは従来加速器よりも一桁多い約9000台の超伝導空洞製造を必要とし、**世界三領域での製造分担**が想定されていること、また超伝導空洞は高圧ガス圧力容器として扱われるため、ホスト国と製造する各国での**高圧ガス安全規則を満たす設計・製造が必須**となる。これまでの超伝導空洞高性能化の成果実装を含め、ILCを国際協働で建設するための技術課題をILC テクノロジーネットワークで取り組む。

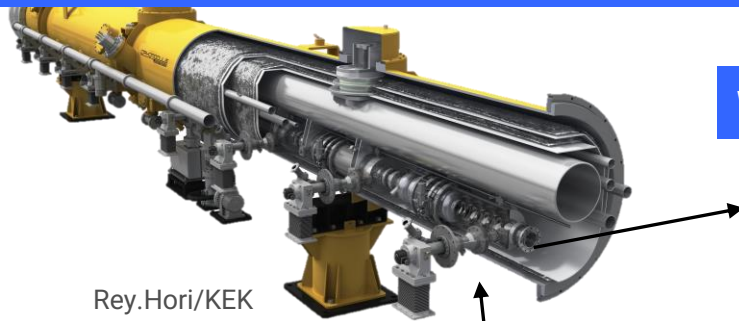
② ナノビーム

現在までに達成ずみのビームサイズに加え、ILC が求める**長期間に亘る安定した高輝度ビーム衝突を実現する技術実証**が必要。

KEKの先端加速器試験施設(ATF)では**41nmのビーム収束**を達成。その上で、さらに確度高いビーム調整を実証するために、**長時間安定性を含め、更に技術開発を進める必要**があり、これをワークパッケージとして取り組み、推進する。

ワークパッケージとKEKの貢献

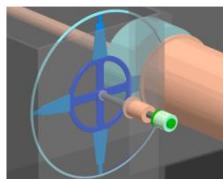
WP-prime 2: クライオモジュール組立・試験・設計決定



WP-prime 1: 空洞量産実証



Rey.Hori/KEK



陽電子源

WP-prime 15: 最終収束系

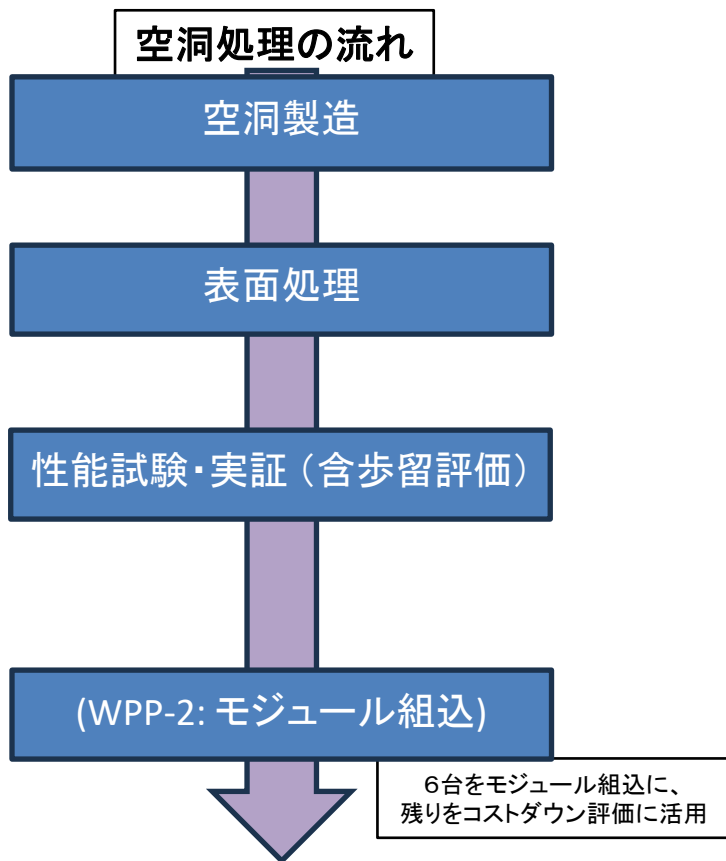


WP-prime 8~10: 陽電子源開発

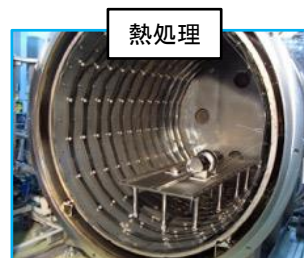
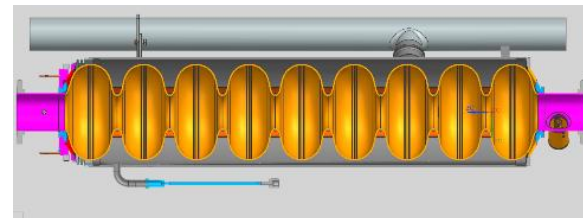
WPプライム 1: 空洞量産実証

高性能空洞を確実に作る

超伝導高周波技術は同タイプの空洞を利用しているEuropean XFELの運用中で成熟してきている。近年は日米・日欧協力で空洞高性能化・コスト削減に取り組む。これらを含めた歩留まりを評価。



Cavity design based on TESLA/LCLS-II
(空洞デザインは世界共通とする)



◆ ILC超伝導空洞量産技術実証: 9,000空洞の0.4%に
当たる30空洞以上を世界で製造

(課題事項)

◆ 空洞性能(35MV/m)・成功率(歩留まり)90%

(最終確認事項)

◆ 世界3極の高圧ガス保安法への整合

◆ 性能/費用効果の高い製造法実証(TDR後の成果)

◆ 超伝導材(Nb)製造: 不純物混入無し(直接スライス)+コストダウン

◆ 新表面処理方法: 空洞の高電界・低損失による性能向上

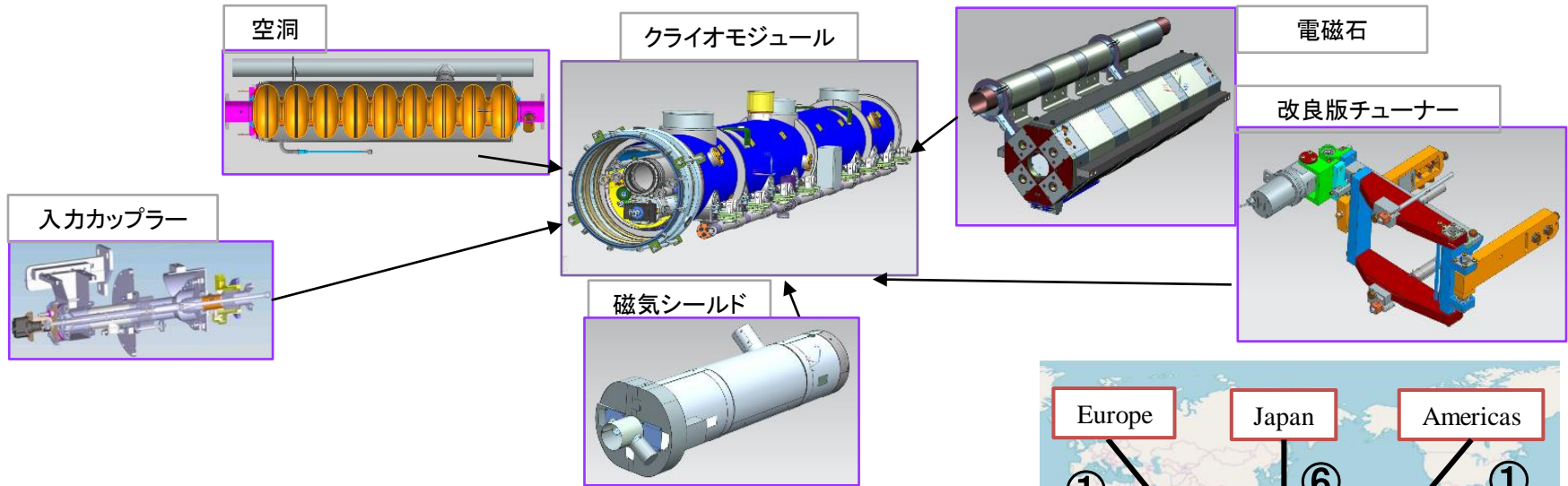
◆ プラグ互換性の確認: 最終設計の確認

◆ 最適表面処理方法(レシピ)を確認

WPプライム 2: クライオモジュール組立・試験・設計決定

共通設計によるILC初のCMを完成させる

空洞を収納するクライオモジュールの組立・試験を行う。一部は海外から持ち込まれた空洞も使用する。



- ◆ 国内で1台のクライオモジュール(CM)を製造
- ◆ WPP-1で製造された空洞のうち8空洞を実装(海外からの持込含む)
- ◆ 日本の高圧ガス保安法に整合

(最終確認事項)

- ◆ 付属部品(入力カップラー、チューナー、超伝導電磁石、磁気シールド材)実装
- ◆ 設計変更(Change request)の検討

日米欧各領域から空洞を持ち寄り、一つのモジュールに入れて試験を行う

KEKでの超伝導空洞開発

1980年代から超伝導空洞の開発をしており、TRISTAN/KEKB/SuperKEKBでの実績がある

空洞製造・処理

空洞性能試験

クライオモジュール製造・試験

CFF(2011-)超伝導空洞製造の拠点



STF (2005-)超伝導空洞試験評価の拠点

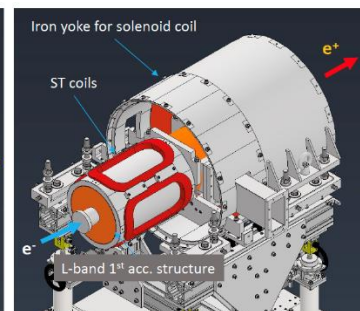
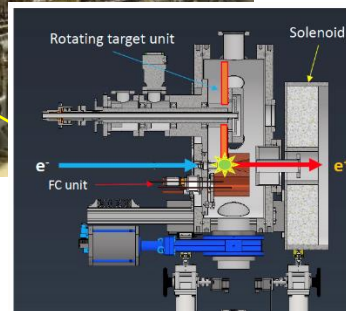
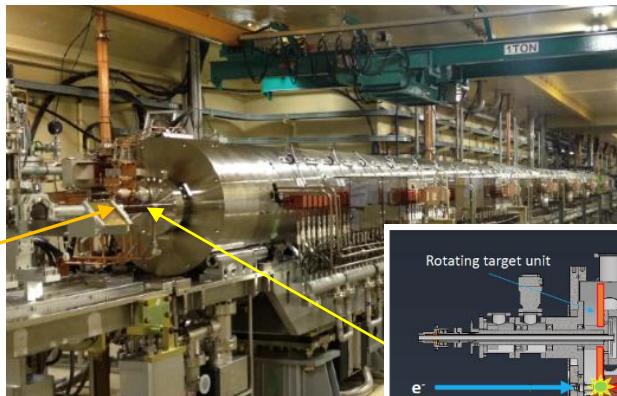
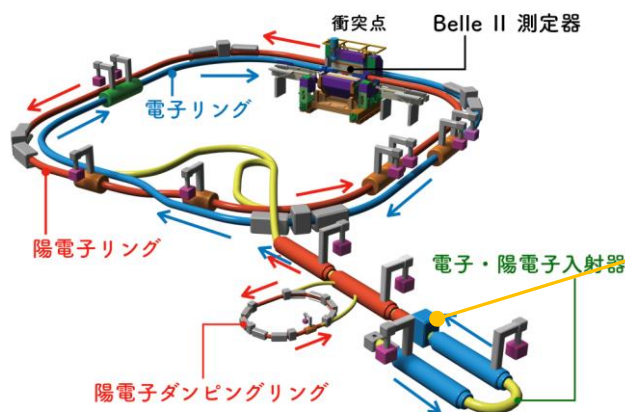


WPプライム8~10 陽電子源開発

陽電子は人工的に作る必要があり、ターゲット(WP-prime 8)、磁気収束(WP-prime 9)、陽電子捕獲(WP-prime 10)が重要部品

KEKでの陽電子源開発

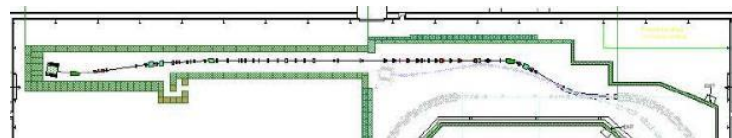
- 電子駆動型は、KEKBやSuperKEKB陽電子源で実績のある方式。
- SuperKEKBは現在稼働する世界最大の陽電子源を持つ。
- 詳細設計を進め重要部品の評価を進める。



WPプライム 15: 最終収束系

安定なナノビームを創る

- ◆ 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。



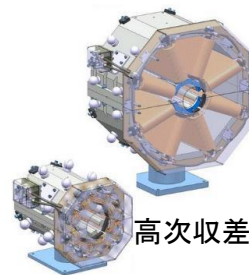
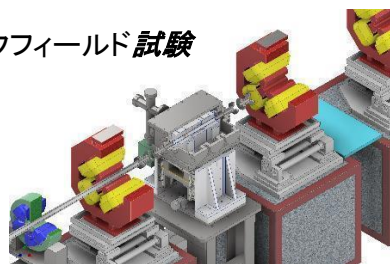
ATF2 beamline



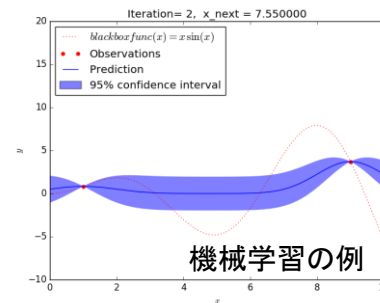
- ◆ 以下の3つの研究テーマは、ATFで進めるべき重要なテーマである。
 - ウエークフィールド緩和
 - 高次収差の補正

ビームチューニング(機械学習)

ウエークフィールド試験



高次収差補正用磁石



- ◆ 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。



KEKとCERN、国際リニアコライダー研究開発に関する協定に署名



山内正則KEK機構長（左）とファビオラ・ジャンノッティCERN所長（CERN提供）



山内正則KEK機構長（左）とファビオラ・ジャンノッティCERN所長（CERN提供）

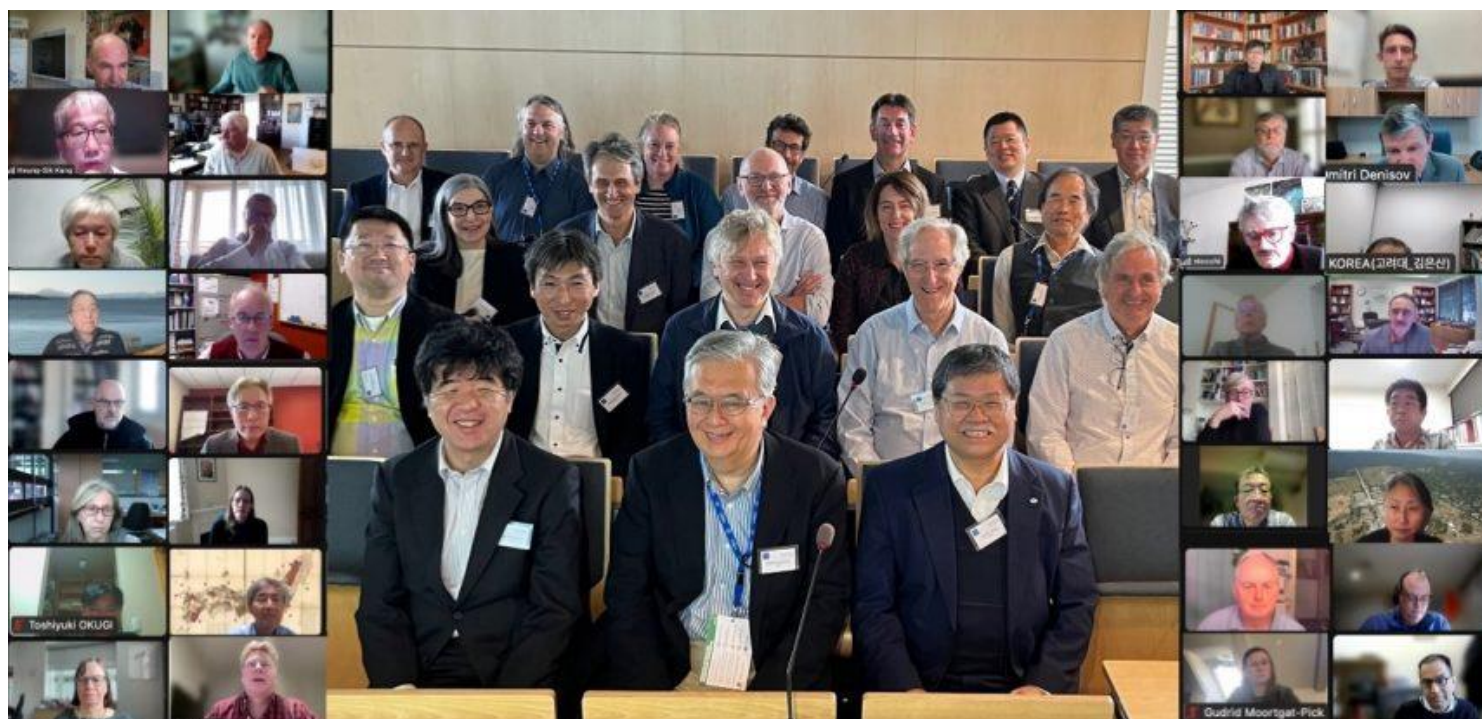
- 2023年7月、KEKとCERNは、[ILCテクノロジーネットワーク\(ITN\)に関する協定に署名](#)
- CERNを訪問中の山内正則KEK機構長とファビオラ・ジャンノッティCERN所長が署名
- [CERNはITNの研究に協力するとともに、欧州の他の研究機関のハブとしての役割を果たすことが述べられている](#)
- 今後同様の協定を他の研究機関とも締結し、ITNの枠組みを拡大していく

<https://www.kek.jp/ja/topics/2023070801100/>

ITNインフォメーション会議

- 2023年10月16日～17日ITNの会議が、欧州合同原子核研究機関（CERN）で開催
- オンラインも含め、10カ国の28研究機関から68名が参加
- 米州、欧州、アジア・オセアニア地区の21研究機関から関心のある技術項目についての発表があった

<https://www.kek.jp/ja/topics/202310191530/>



- 現在は研究機関からの具体的な提案をIDT-WG2で取りまとめているところ。（一部のWPについてはすでに開始されている。）

まとめ

- リニアコライダーの歴史は**1960年代**までさかのぼる。
- **ITRP**国際技術勸告委員会が、GLC(JLC, NLC), TESLAから超伝導技術を選択(=国際リニアコライダー、ILC)
- ILCは線形加速器で、**電子と陽電子**を**125GeV**まで加速して**ヒッグス粒子**を生成。
- 加速器は**モジュール**ごとに開発・設置し、総合調整するのが一般的。
- 重要な技術：
 - 粒子源(特に**陽電子源**): 電子・陽電子を一定量生成させヒッグス粒子を十分生成する。
 - **超伝導加速**: 125GeVまできちんと加速しヒッグス粒子を生成する。
 - **ナノビーム**: ビームを細く絞り効率よくヒッグス粒子を生成する。
- 有識者会議等で指摘された技術課題のうち、時間がかかる重要なものをワークパッケージとしてまとめた。
- これらのワークパッケージを、**ILCテクノロジーネットワーク**での国際協働を通じて実施し、加速器技術の完成度を高めていきたい。

ご清聴ありがとうございました