



# ILC (International Linear Collider) の加速器

**阪井 寛志**

高エネルギー加速器研究機構(KEK) 加速器研究施設  
応用超伝導加速器イノベーションセンター(iCASA)

30分(発表)

39 pages (目次など含む)

# 私の研究歴について（簡単に自己紹介）

- **京都大学 修士・博士課程(1997-2001) & KEK博士研究員(2001-2002)**

- Linear collider用laser wire beam profile monitorの開発 (博士論文):  
**KEK-ATF damping ring**内の7 $\mu$ mの垂直ビームサイズ測定に成功。

- **東京大学 物性研究所 助教(助手) (2002-2009.5)**

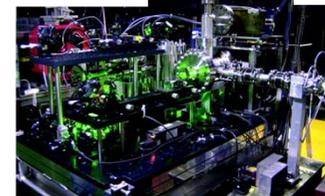
- 第3世代VUV-SX放射光源の設計・開発(2002-2005)  
 入射器、真空システム開発、**X線SRモニターの開発** (KEK-ATFにて実用化)
- ERL (Energy Recovery Linac) (2006-2009.5)  
**cERL主加速器超伝導空洞の開発** (with KEK, JAEA)、**KEK-STF**で縦測定。

- **KEK 加速器研究施設 助教・准教授・教授 (2009.6-現在)**

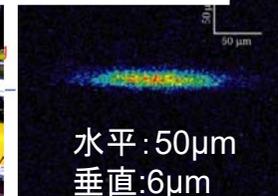
- 引き続き、**cERL主加速器超伝導空洞開発**。2016年にはcERLで1mAのエネルギー回収達成。
- 2016年4月から1年間**EURO-XFEL(DESY)**で800台超伝導空洞のクライオモジュール建設に携わる。
- 2017年4月帰国後、ILC用高加速勾配、高Q値に向けた超伝導空洞開発に従事。その一環で、**KEK-STF**での高勾配超伝導空洞のモジュール組立てを行い、31.5MV/mのビーム加速達成。
- 2018年4月から、超伝導加速器利用推進チームのチームリーダーとして、**cERL**を中心に超伝導空洞を用いた産業応用展開(cERL-FEL開発、照射実験)、新たなNb<sub>3</sub>Sn空洞開発等を行っている。
- 現在、**iCASAセンター長**。TTC(Tesla Technology Collaboration) Technical-Board co-chair、AAA(先端加速器科学技術推進協議会)の技術部会長を担い、国内外の超伝導加速器開発を推進中。

- 修士以降、ILCなどの先端的な低エミッタンス電子ビーム加速器の研究開発に従事。
- 現在まで、15年以上超伝導加速空洞開発に従事し、さらに産業応用展開を実施中。(5.Jan.28)

ATF Laser wire



ATF XSRモニター



cERL Main linac



クリーン組立  
STF cryomodule



Slow pumping system KOACH 着替えブース

EURO-XFEL



# 目次



- ILCで何を目指しているのか？（新しい物理を切り開く加速器）
- ILC加速器って何？
- ILC加速器に必要な最先端技術とその開発について
- まとめ



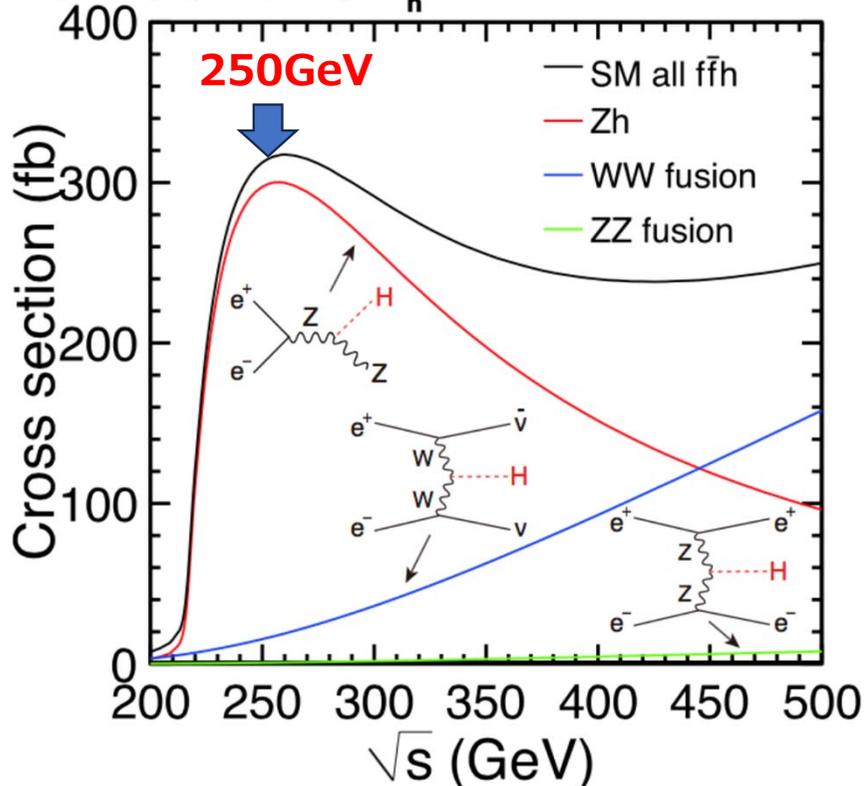
- **ILCで何を狙っているのか？（新しい物理を切り開く加速器）**
- ILC加速器って何？
- ILC加速器に必要な最先端技術とその開発について
- まとめ

# ILCで狙う物理 (狙うべきエネルギーと精度)

Jorge de Blas, "Physics case for e+e- Higgs/Electroweak factories" LCWS2024.

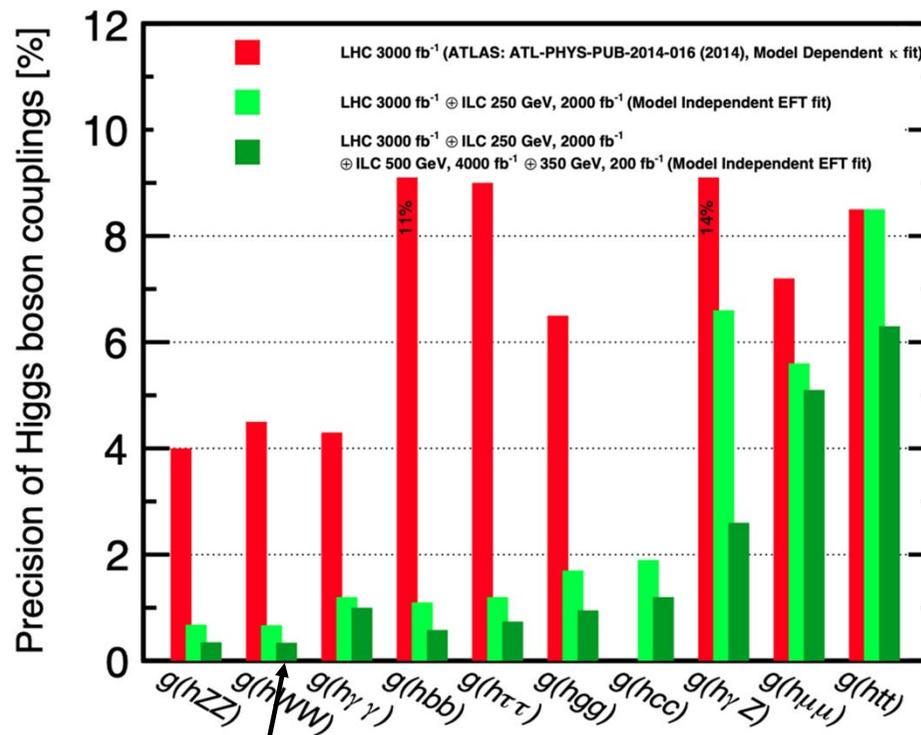


$P(e^-, e^+) = (-0.8, 0.3)$ ,  $M_h = 125 \text{ GeV}$



**250GeV**より上のe- e+のCMが必要。  
将来的には350GeV、500GeVでのphysicsも視野に。

By 石野さん LHCとILCでの Higgs coupling 例



この差異を捉えて、新しい物理の正体を察するには、ILCが必要

**e+e-コライダーを使ってHiggs粒子の性質を精密に測定する。**

(高輝度LHCで到達できない世界)

京都大学 ILCセミナー (2025.Jan.28)



- ILCで何をを目指しているのか？（新しい物理を切り開く加速器）
- **ILC加速器って何？**
  - 加速器intro
  - **ILC加速器の概要(線形加速器の重要性)**
  - **近年の国際的なILC加速器開発の枠組み**
    - **ITN(ILC Technology Network)**
    - **重要加速器開発項目について**
- ILC加速器に必要な最先端技術とその開発について

加速器を使って何をする。何ができるのか？

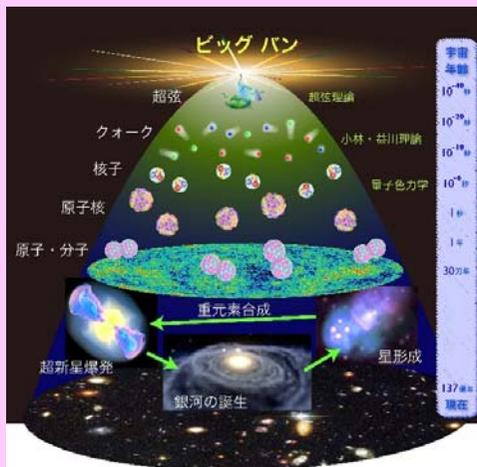


加速器を使って電子や陽子などの粒子を加速し、衝突。  
→素粒子実験（新粒子探索）

高エネルギー粒子を用いて生成されるX線や放射光で  
→新物質構造解析やたんぱく質、細胞の構造解析。

粒子線治療などの医学応用

宇宙の起源・新粒子探索  
(素粒子実験)

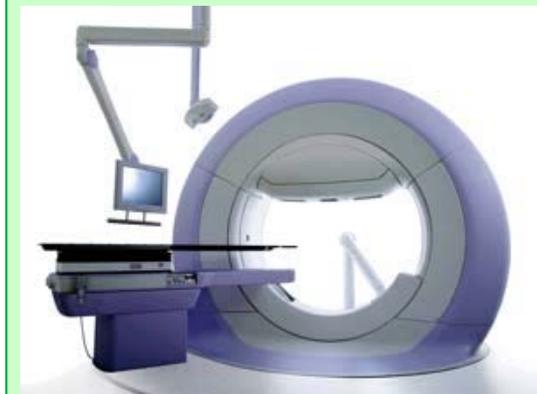


放射光

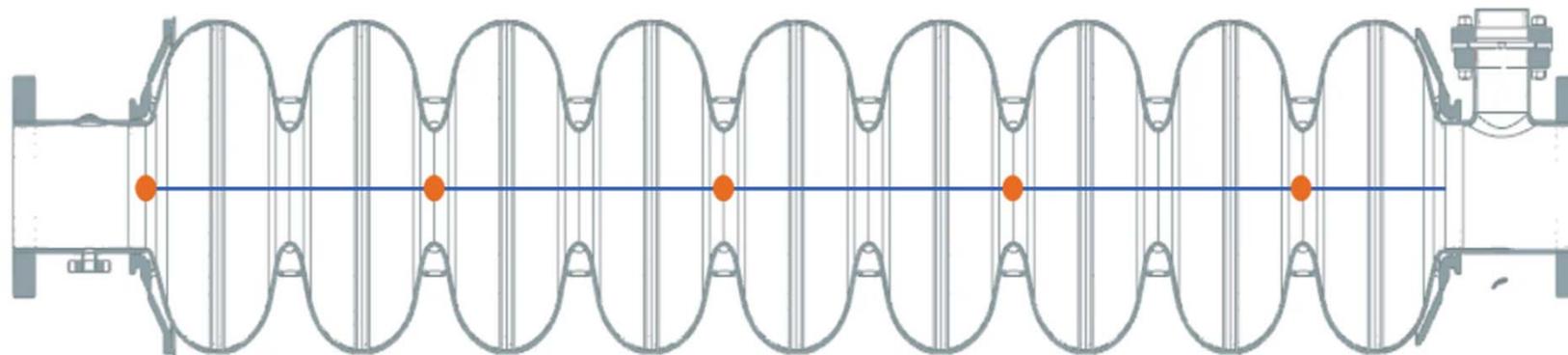
たんぱく質の構造解析

京都大学 ILCセミナー (2025. Jan.28)

医療用加速器PET用の薬剤  
ガン治療用陽子線加速器など

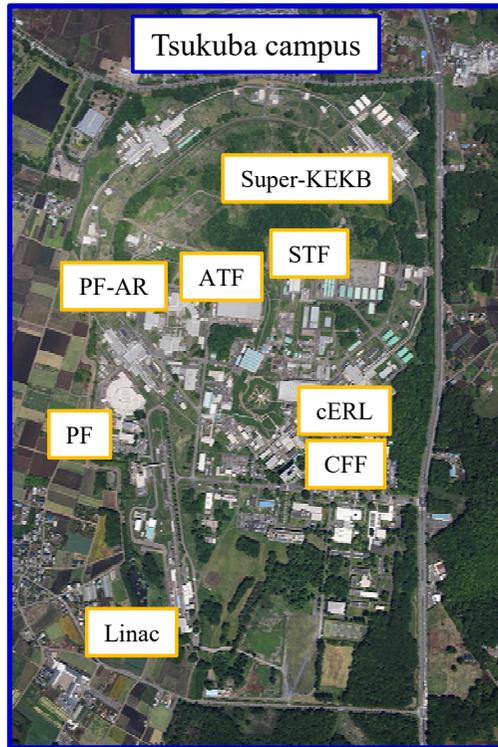


# ビームの加速

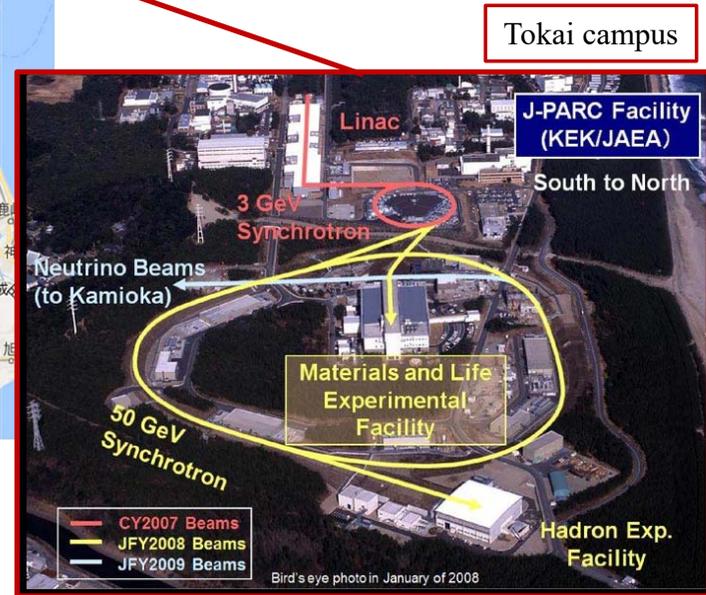


# KEK-高エネルギー加速器研究機構-

応用超伝導加速器イノベーションセンター



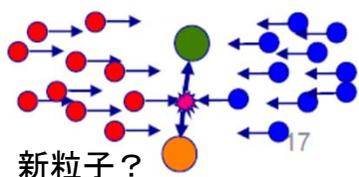
Tokyo



東京ディズニーリゾートと同じ大きさ

電子 $e^-$

陽電子 $e^+$



# 高エネルギー加速器(Collider)

電子陽電子などを高エネルギーで新粒子の探索生成を行う。



より高エネルギー(高加速勾配)でより大電流ビームの加速が重要

高エネルギーで衝突頻度を上げたい。

衝突エネルギー



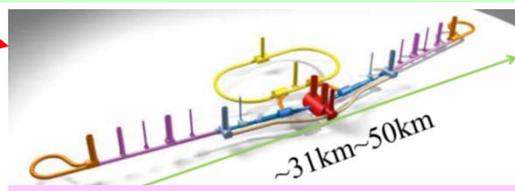
ノーベル物理学賞:  
 2008年: 小林益川理論の証明  
 クォークが3世代以上。  
 (KEKB加速器が実験で証明)  
 2013年: LHC加速器でHiggs粒子発見。



周長3km

Super KEKB

LHC: CERN(ジュネーブ)周長27km



(将来) Linear collider (LC)

LHCでは超伝導電磁石を  
KEKB, LCでは超伝導空洞を使用。

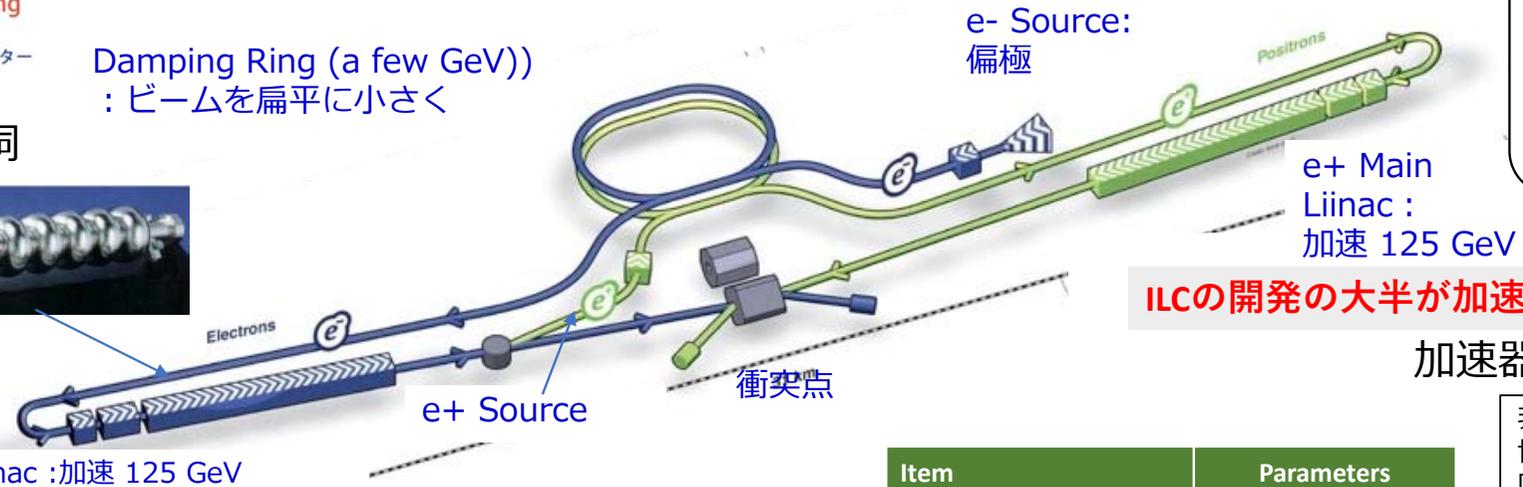
LCセミナー(2025.1.28)

# ILC 加速器の概要

## 超伝導加速空洞



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



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

**ILCの開発の大半が加速器の開発**

## 加速器開発のポイント

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	<b>516 nm/7.7 nm</b>
SRF Cavity G. Q <sub>0</sub>	<b>31.5 MV/m</b> Q <sub>0</sub> = $1 \times 10^{10}$

非常に高い世界一を走るKEKBと同じくらい。

**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  
 σx\*, σy\*: 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

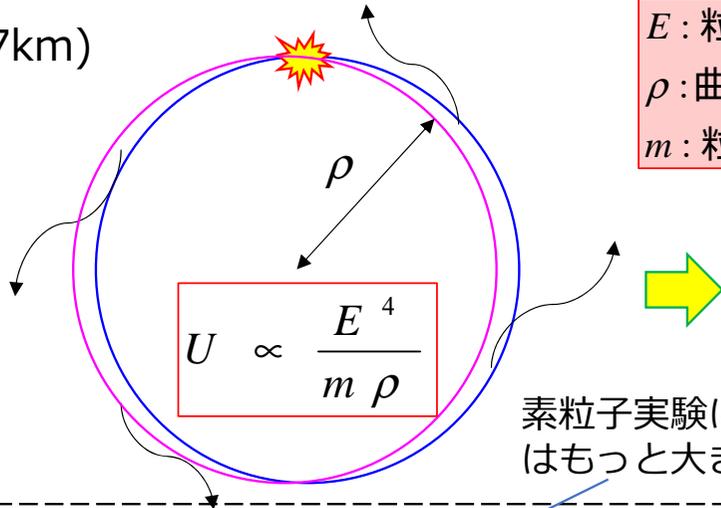
## (ILC加速器開発の具体的課題)

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**ダンブ**するか?

- ILCは20~30km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)。

U:放射光によるEnergy loss

LHC (周長27km)  
ρ=4.3km



Why LC (Linear Collider)

E : 粒子のエネルギー  
ρ : 曲率半径  
m : 粒子の質量

半径を無限大  
Innovation Center for Applied Superconducting Accelerators  
イノベーションセンター

$\rho \rightarrow \infty : U \rightarrow 0$

放射光によるEnergy lossなし  
加速 加速

線形加速器(linear collider)

素粒子実験にとって放射光は不要。(陽)電子の場合円形加速器ではもっと大きな加速器を作らない限り、エネルギーを上げれない。

(円形加速器の将来計画例) FCC-ee (previous talk)  
周長90kmの加速器を提案。Pをより大きくして、Uを抑えて高エネルギーを狙う。

放射光ロス (電子の場合)

$$\Delta E[\text{keV}] = 88.5 \times \frac{(E [\text{GeV}])^4}{\rho [\text{m}]}$$

For FCCee ZH operation (125 GeV, 26.7 mA)

$\Delta E[\text{keV}] \sim 1.89\text{GeV} \rightarrow$  Total RF : 2GV/turn

Power loss

$P = 2 \times \Delta E \times I_e = 100 \text{ MW}$

~100MWもの放射光ロスを補う必要あり。

リニアコライダー (ILC) の場合。

Repetition frequency of pulses:  $f_{rep}$

Pulse length:  $L_{pulse}$

For ILC250 (125 GeV, 5.8 mA, 5 Hz, 0.73 ms)

Duty cycle  $5 \times 0.73 = 0.36\%$

Power loss (beam dump)

$P = 2 \times E \times I_e \times f_{rep} \times L_{pulse} = 5.3 \text{ MW}$

Totalのインフラの電力で細かい比較は必要だが、エネルギーが4乗で放射光ロスは効いてくるので、高エネルギー実験としては将来はLCが圧倒的に有利。

# Compare ILC and FCCee (and others...)

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

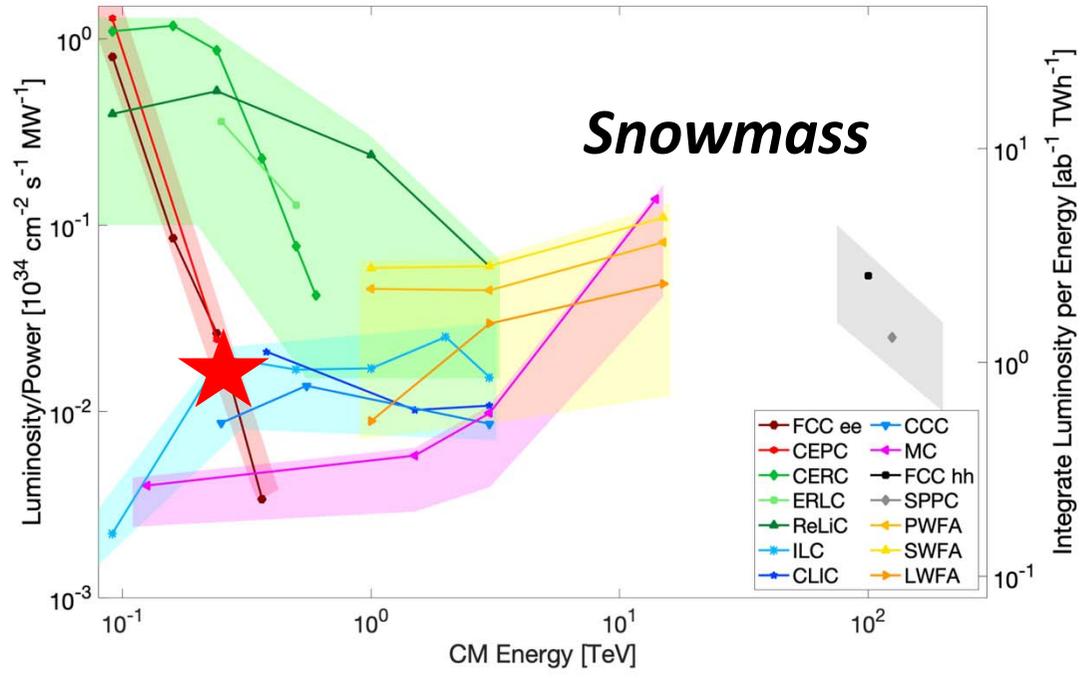

  
 ILC  
 Center



A. Miyazaki, LCWS2024 pre-school

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

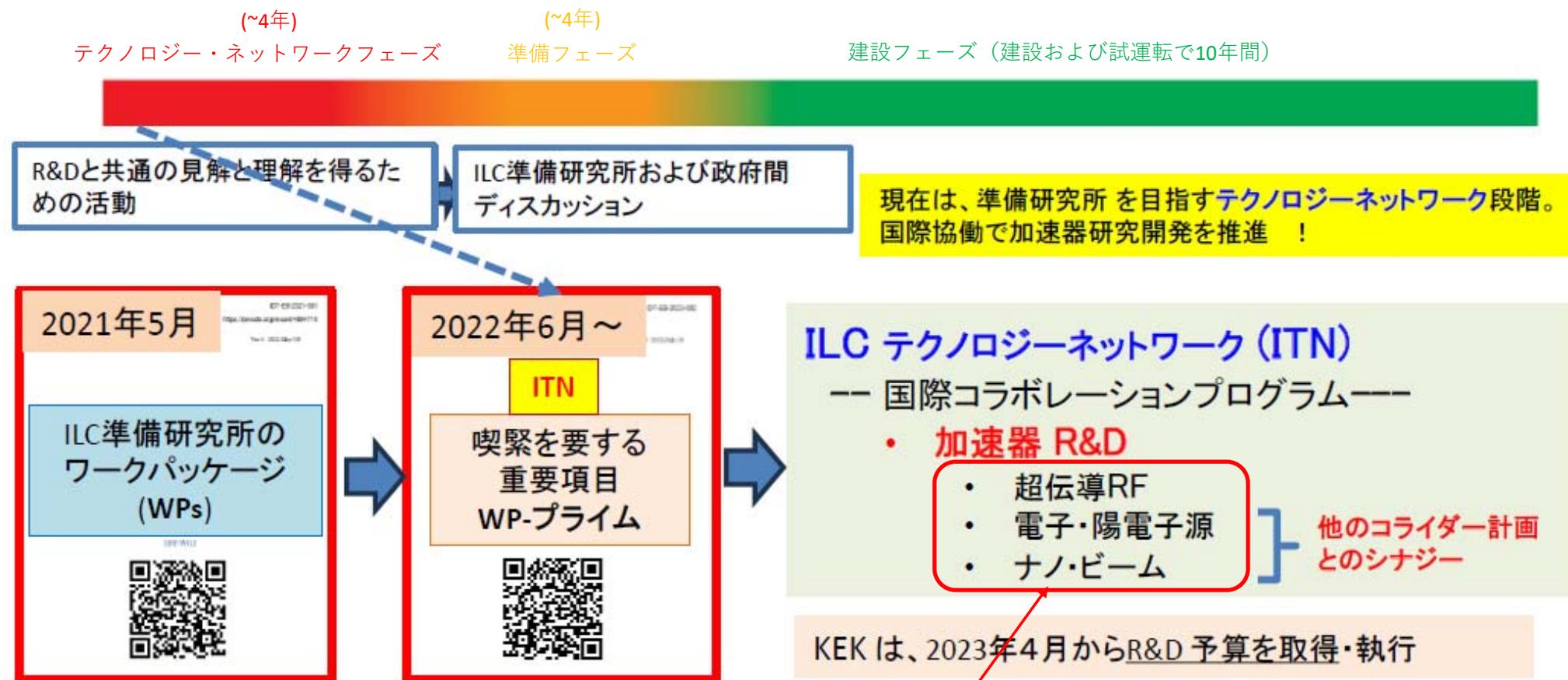
Report of the Snowmass'21 Collider Implementation Task Force  
 Thomas Roser for the Snowmass Implementation Task Force  
 P5 committee meeting April 13, 2023



- 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) → FCC-ee, CEPC
- Linear colliders are more advantageous for higher energy (ttbar, HHH) → ILC (as Future collider)
- For even higher energy: FCChh, MuCol, Plasma (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)<sup>14</sup>

今日はこの重要な3つの加速器開発 (①超伝導空洞、②陽電子開発、③ナノビーム) についてお話しします、



- ILCで何を目指しているのか？（新しい物理を切り開く加速器）
- ILC加速器って何？
- **ILC加速器に必要な最先端技術とその開発について**
  - **KEKで取り組んでいる5か年計画での加速器開発現状**
    - ① **超伝導加速器技術**
    - ② **陽電子生成技術**
    - ③ **ナノビーム技術**
- まとめ

# 2023年度から5年での具体的なILC加速器開発目標

WP-prime 2: クライオモジュール組立・試験・設計決定

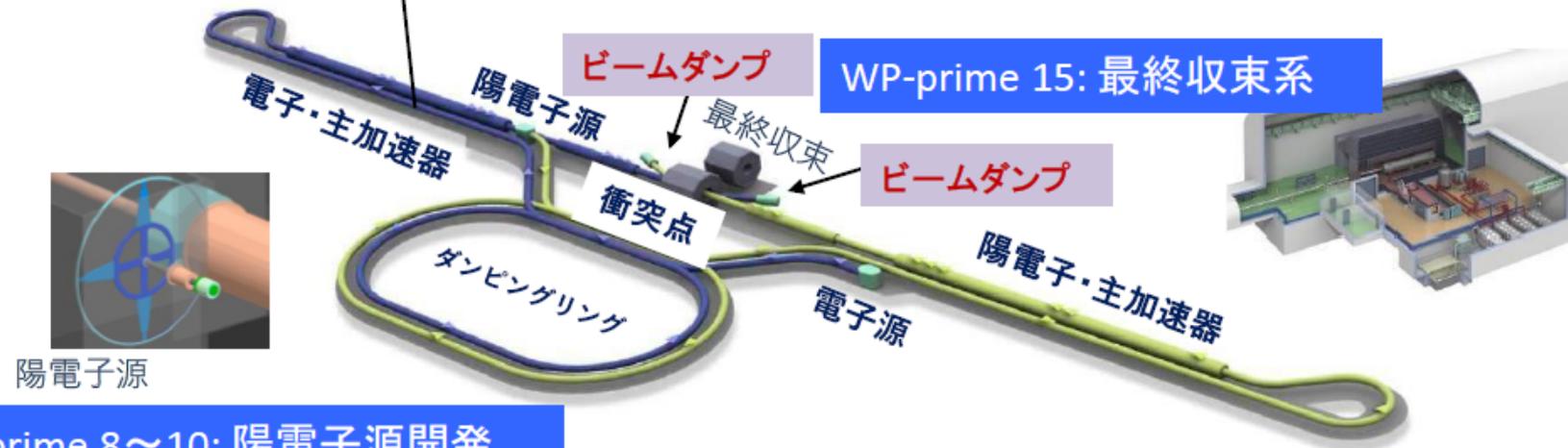
2023年度からKEKでは  
文科省補助金で実施。

WP-prime 1: 空洞量産実証



Rey.Hori/KEK

WP-prime 15: 最終収束系

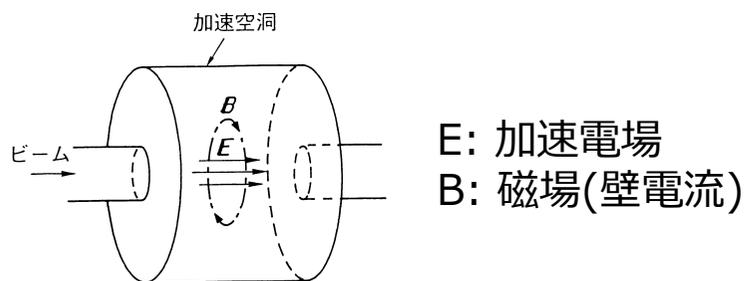
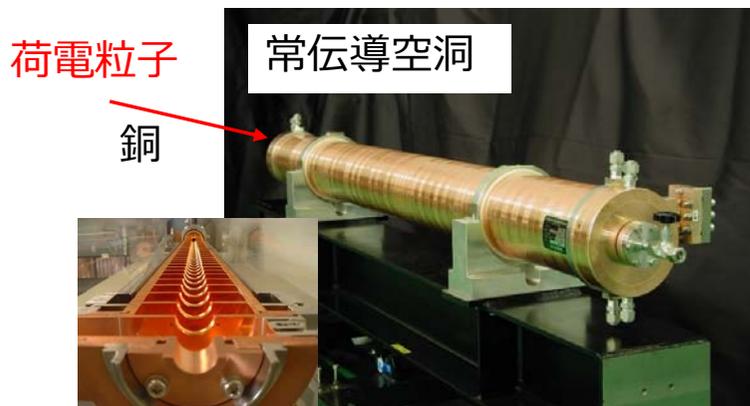


陽電子源

WP-prime 8~10: 陽電子源開発

# ①超伝導加速空洞の魅力とILCの超伝導空洞開発

普通の加速空洞は銅でできている。(通常、低加速か、パルス運転。)小電流ビーム加速



壁電流が空洞壁でロスする。銅では投入パワーの約半分が壁でロス。→連続加速不可

抵抗を0にすれば空洞内に大きな電場を立てることができる。省電力  
(大電流で高加速勾配のビーム加速が可能)



省電力でILCに必要な大電流で高エネルギーのビームの加速が可能。

KEK鳥観図



新しい超伝導材料の空洞開発もやってるよ!



CFF 空洞製作



STF 超伝導空洞開発

KEKではSTFを中心にILCの超伝導空洞開発を行っている。

超伝導空洞加速器(技術)開発は現在、世界的にも開発が盛んで、その中で最先端の研究開発をKEKで行っている。

# 超伝導加速空洞 & モジュール概要



$$P_{in} = P_{beam} + P_c + P_{ref} + P_t + (P_{other})$$

$P_{in}$ : 必要な入力パワー  
 $P_{ref}$ : 空洞からの反射パワー  
 $P_c$ : 空洞壁でのloss  
 $P_t$ : 空洞モニター用パワー ( $P_{in} \gg P_t$ )  
 $P_{beam}$ : ビームを加速するためのパワー

必要なビームパワーに投入パワーの match ( $P_{ref}=0$  &  $P_{in} \sim P_{beam}$ ) が best. 但し、空洞に加速電圧を立てるために空洞壁loss ( $P_c$ )が生じる。

$$P_{beam} = V_c * I$$

$$P_c = \frac{V_c^2}{R_{sh}}$$

高勾配加速のためには  $P_c$  を減らしたい。

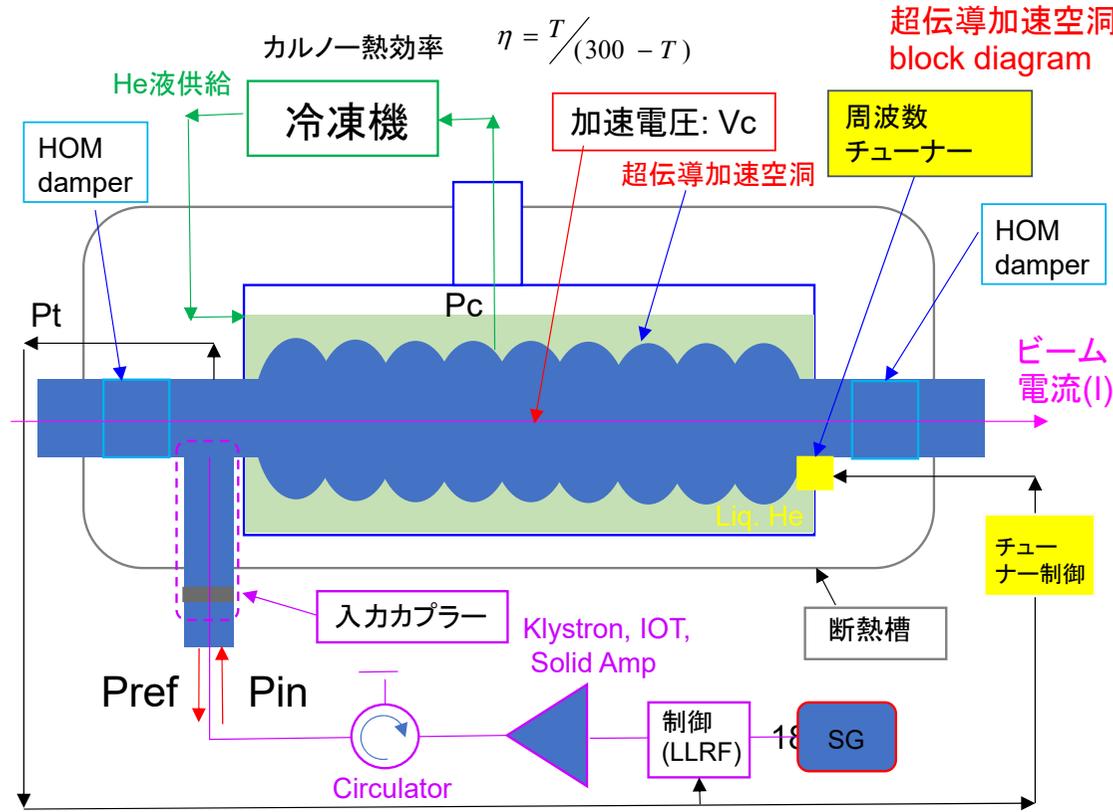
Shunt impedance  

$$R_{sh} = R / Q * Q_o$$

超伝導：  
 $P_c \ll P_{beam} = P_{in}$   
 めっちゃ効率がいい  
 入れたパワーは100%  
 ビーム加速に使われる。

超伝導空洞: ビームを加速する役割。  
 入力カップラー: 空洞へのパワー供給口。セラミック窓で空洞真空と大気を分ける。  
 HOM damper: 有害な空洞高調波(後述)を吸収する。  
 周波数チューナー: 空洞の共振周波数を調整&制御する。  
 クライオモジュール: 上記を断熱槽で囲み、He温度を保つ役割をする。

空腔内にはある一定の共振周波数で高電場が立つ。  
 →どうやって?  
 (空腔設計が重要)



常電導  
 $P_c > P_{beam}$  ( $P_{in}$  がたくさん必要。)  
 効率悪い。

レーザー加速などは  
 $P_{beam} = \eta P_{in}$   
 $\eta < 1\%$  (エネルギー幅がそろっている条件) 高い加速可能かもしれないが、大強度レーザー必要。

# ILCへの高周波(RF)加速方式の比較まとめ (おさらい)



高周波のことをRF(Radio Frequency)といいます

加速方式	常伝導(normal conducting)	超伝導(super conducting)
主な加速器(稼働中、稼働していたもの)	SLC/PEP-II, J-PARC, SACLA, TRISTAN, SuperKEKB, 既存の放射光施設全般	LHC, LEP, HERA, TRISTAN, E-XFEL, CEBAF, SuperKEKB
材質	無酸素銅(Oxygen-free Copper; OFC)	ニオブ(Niobium; Nb)
冷却機構	純水、超純水	液体ヘリウム、液体窒素
運転温度	300 K	4.2 K, 2K
高周波損失	大きい (低効率) $Q_0 = 10^4$	小さい (高効率) $Q_0 = 10^{10}$ (1/1000000)
使用可能な高周波の周波数	X-band (12 GHz帯)まで	L-band (1.3 GHz)まで(BCS抵抗のため)
ここから下の欄では常伝導の方をX-band(12 GHz帯)、超伝導の方をL-band(1.3 GHz帯)で比較します		
ビームアパーチャ (ビームの通り易さ)	小さい	大きい
アライメント (加速器の設置誤差)	難( $\sim \pm 10 \mu\text{m}$ )	楽( $\pm 300 \mu\text{m}$ )
パワー源 (RFソース)	大きい	小さい
運転加速勾配	100 MV/m (X-band) @CLIC (CERN) 35 MV/m (C-band) @SACLA (理研)	23 MV/m (L-band) @E-XFEL (DESY) <b>31.5 MV/m (L-band) @ILC</b>

**小電力で大電流ビームを加速できるのが超伝導空洞のメリット  
Luminosity増大へ直結、またビームの扱いが容易→ILCへ採用。**

ここでは加速方式を取り上げましたが、同じことは電磁石にも当てはまります。  
すなわち、高い磁場を持たせたい時は、通常、超伝導電磁石が使われます。

ILCを超伝導加速技術で建設するという決定は2004年に国際諮問委員会 (ITRP)により決定された。

## 具体的な超伝導空洞の表面抵抗



超伝導空洞の場合の表面抵抗:  $R_s$

超伝導空洞のRF損失は100nm以下の表面が決定する。

$$R_s = R_{BCS} + R_{res}$$

$$Q_0 = \frac{\Gamma}{R_s}$$

$\Gamma$ : geometrical factor

BCS理論による:  $R_{BCS}$

残留表面抵抗:  $R_{res}$

$$R_{BCS} = A \frac{\omega^2}{T} \exp\left(-\frac{\Delta(0)}{k_B T_c} \cdot \frac{T_c}{T}\right)$$

Nb( $T_c=9.2K$ )においては半実験式が存在。

$$R_s = R_{BCS} + R_{res}$$

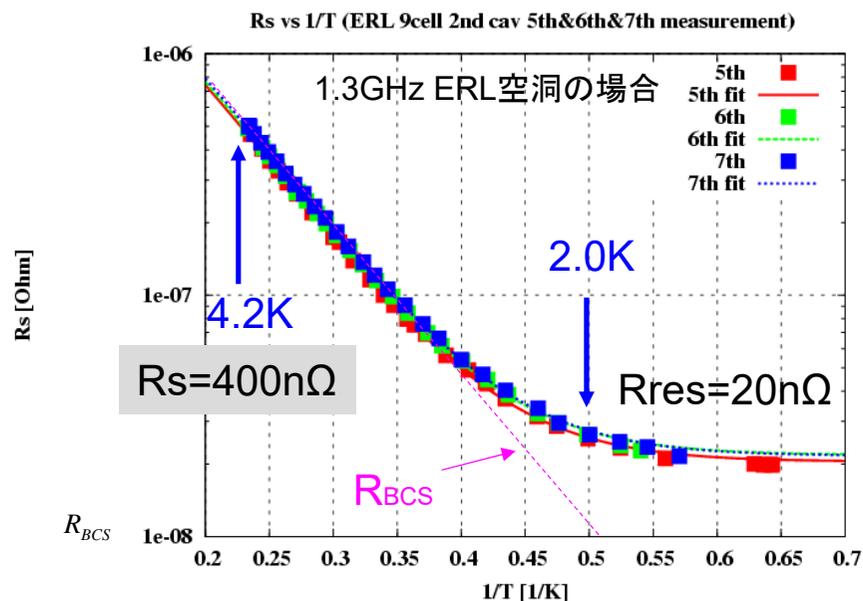
$$R_{BCS} = 2 \times 10^{-4} \frac{1}{T} \left(\frac{f}{1.5}\right)^2 \exp\left(-\frac{17.67}{T}\right)$$

$f$  [GHz],  $T$  [K]

$f$ : frequency in GHz

$T$ : temperature in K ( $T < T_c/2$ )

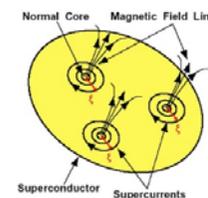
このRBCS及びRresを下げる事がHigh-Qへの道近年の大きな開発項目。



### Rresが決まる要因

#### ① 残留磁場による磁場トラップ (<10mG)

一本の磁束の周囲には  $\pi\xi^2$  の常伝導スポットができる。 $\xi$ はコヒーレンス長。その抵抗は  $R_n$



トラップ磁場が空洞口スになる。

#### ② 残留水素、酸素などによる表面劣化など Q-diseaseなど(後述)

# 超伝導空洞で電界 + Q値をlimitするもの

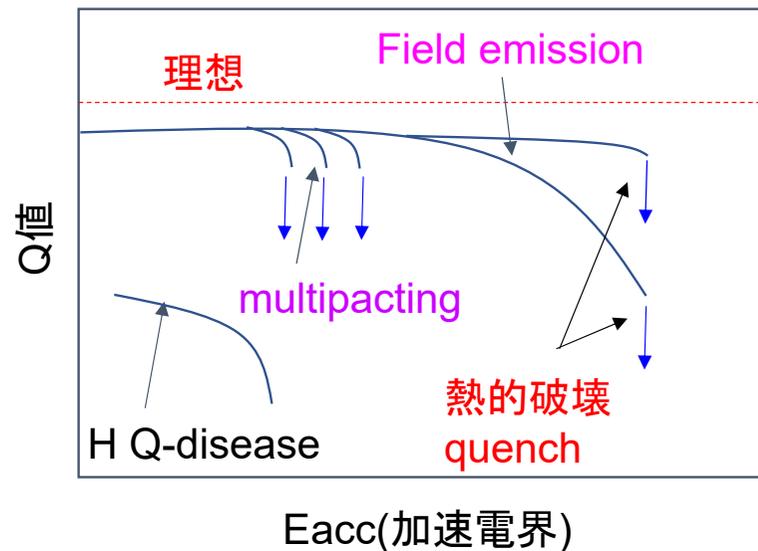


## 超伝導空洞性能劣化の主な原因(これらを起こさないように。)

1. マルチパッキングによる性能劣化。→設計上の問題と最初にprocess可
2. 局所的な空洞内面欠損などから生じる温度上昇による超伝導状態の破壊 (クエンチ) →材料や表面処理などの向上で、縦測定で判断可能。
3. 内面の突起や微小物から生じた電磁放射(field emission)によるQ値劣化またそれによる温度上昇。→埃が問題 (組立時の問題) **一番の敵(後述)**

いずれの場合も非常に局所的な(100 $\mu$ m—0.1 $\mu$ mの大きさ)場所から生じる。

測定の評価(縦測定)としてのQ-E curve



Rresが決まる要因から

A. 残留磁場による磁場トラップ (<10mG)

一本の磁束の周囲には $\pi\xi^2$ の常伝導スポットができる。 $\xi$ はコヒーレンス長。その抵抗は $R_n$

B. 残留水素、酸素などによる表面劣化など

Q-diseaseが起こる。

地磁気を抑え(磁気シールド)、いい表面処理を行う。

# 今までのKEKでの超伝導空洞開発

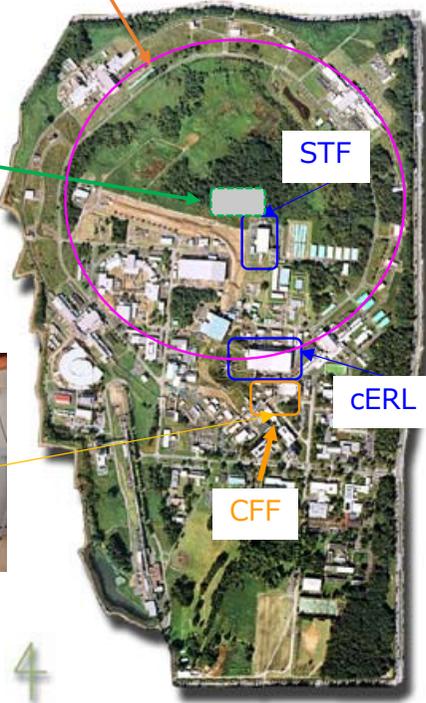


KEKつくばキャンパス

Super KEKB



COI棟  
真空炉等でhigh-Q開発  
Nb<sub>3</sub>Sn空洞開発



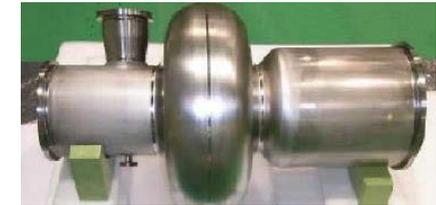
CFF 空洞製作

さらに超伝導空洞の製作、高Q値のためのR&Dや新しくNb<sub>3</sub>Sn空洞の開発を行っている。

1980年代から超伝導空洞開発  
TRISTAN/KEKB/SuperKEKB



508MHz TRISTAN (1989)



508MHz KEKB (1998) iCASA



STF (2005-)  
超伝導空洞開発、電界研磨、  
縦測定、モジュールテスト  
ILC用 Long-pulseビーム運転



Compact ERL (cERL)  
(2013-)  
モジュールテスト  
産業応用利用でCWビーム運転

KEK は TRISTAN以来の長年の豊富な超伝導加速器の開発の経験を持っている。

どうやって超伝導空洞の性能を上げる(た)のか？(KEKでの超伝導空洞開発活動)

鏡のような滑らかな空洞内面と半導体工場並みのクリーン環境。

(いい溶接、いい表面処理、いい組立) (KEKで研究の積み重ね)

ちゃんと表面滑らかになったかな？

加速器トンネルに入れる前に事前に性能チェック！！

小さなゴミも入りませんように！

さて、ちゃんと性能が出るかな？

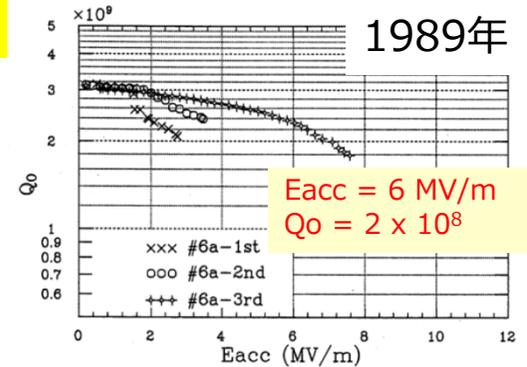
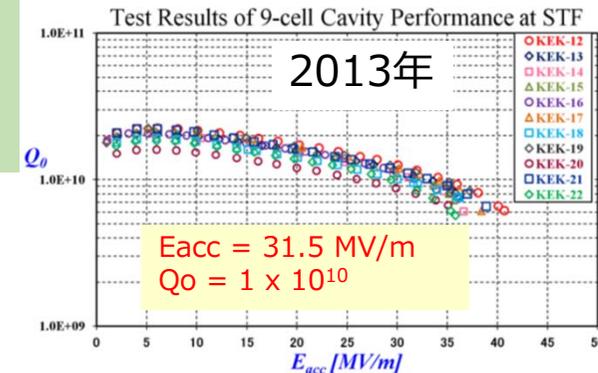


Figure 7: Q<sub>0</sub> and E<sub>acc</sub> of TRISTAN #6a cavity.

長年の技術の進歩

Y. Yamamoto, NIM-A (2013)]



1.3GHz 9セル空洞  
35MV/mで $1 \times 10^{10}$ のQ値。  
現在モジュール製作中



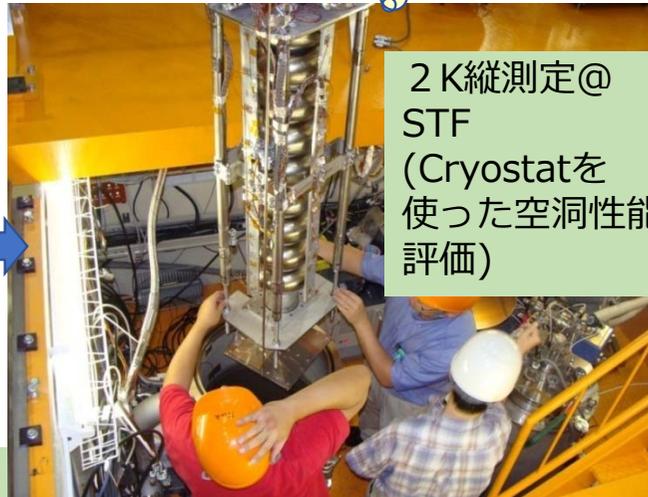
電解研磨



高圧超純水洗浄(HPR)



空洞アセンブリ@class 4



2 K縦測定@ STF (Cryostatを使った空洞性能評価)

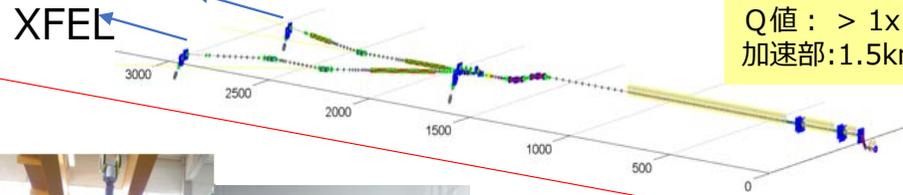
京都大学 ILCセミナー (2025.Jan.28)

Nb空洞製作(EBW) → 電解研磨 (100um) → アニール (750度,3h) → プリチューニング → 仕上げ電解研磨(20um) → 超音波洗浄(50度,1h) → HPR(8MPa,7h) → アセンブリ → バーキング(150度,48h) → 縦測定

世界の超伝導空洞開発現状 (EURO-XFELでの空洞生産の流れ (2016))

EURO-XFEL@DESY 概要

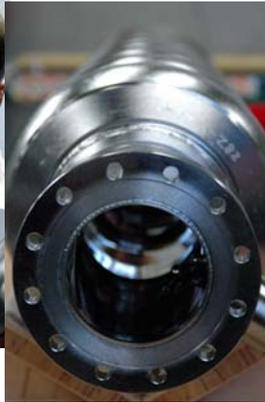
空洞:800台  
 加速勾配:23.6 MV/m  
 Q値: > 1x10<sup>10</sup>  
 加速部:1.5km



800台もの  
 超伝導空洞  
 開発の経験。  
 (私も参加)



Pure Nb sheets  
 (RRR > 300)  
 800台で約3年  
 (several tons) 作成  
 東京電解 (株)  
 Ninxia,



空洞製作(プレス、  
 電子ビーム溶接)  
 800台で3年 表面  
 処理含む  
 RI(独)、  
 ZANON(伊)



空洞表面処理(電  
 解研磨、化学研磨、  
 超純水洗浄(HPR))  
 クリーン  
 assembly  
 RI(独)、  
 ZANON(伊)



縦測定(VT)  
 (空洞単体での  
 性能評価試験)  
 DESY(独)  
 週に8台測定



cryomoduleに組  
 み入れ。クリー  
 ンルーム作業  
 (string-  
 assembly)  
 CEA-Saclay(仏)



Cryomoduleでの空  
 洞性能評価 (CM)  
 DESY(独)  
 1週間で1module



ビームラインへ  
 DESY(独)

KEKでの  
 開発も同  
 じモ  
 ジュール  
 を使用。

8 cavity fabrication per week of each company.

超伝導空洞性能劣化の主な原因

- 局所的な空洞内面欠損(10um程度)などから生じる温度上昇による超伝導状態の破壊 (クエンチ)  
 →縦測定で判断可能。材料や表面処理の向上で性能は向上。
- 内面の突起や微小物(0.1um程度)から生じた電磁放射(field emission)によるQ値劣化  
 →埃が問題 (組立時の問題)、埃レスのクリーンルーム作業が重要。

(いい溶接、いい表面処理、いい組立)

	N <sub>cavs</sub>	Average	RMS
VT	815	28.3 MV/m	3.5
CM	815	27.5 MV/m	4.8

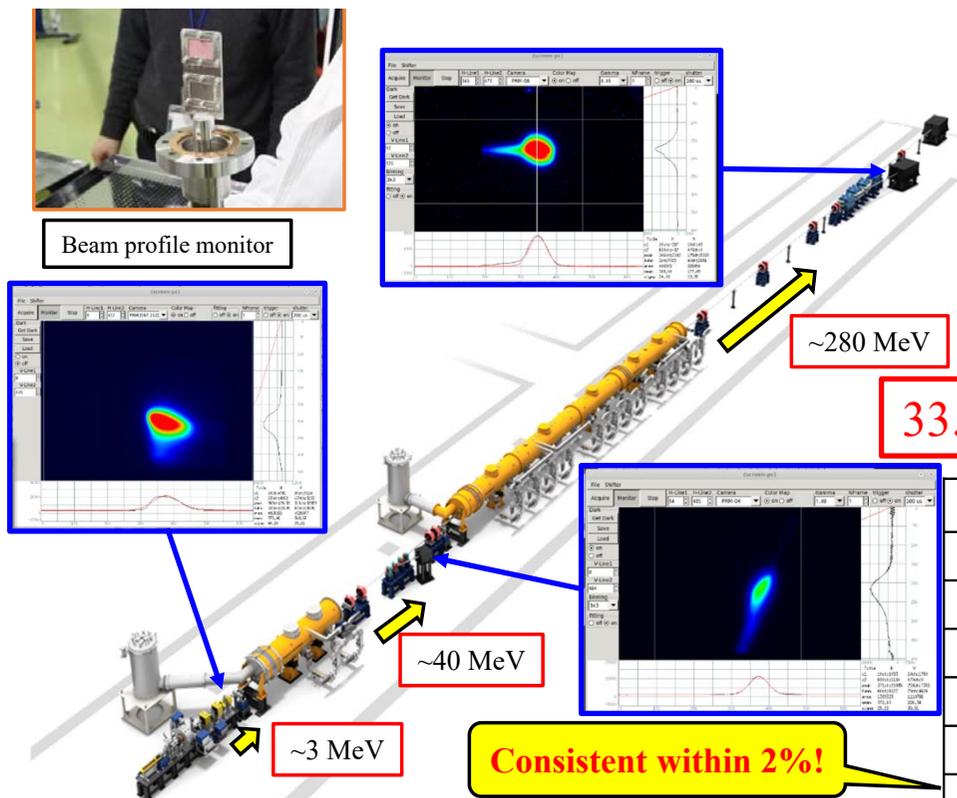
800空洞でCM量産化で  
 27.5MV/m±4.8MV/mの空洞性能がE-XFEL  
 に出ている。 京都大学 ILCセミナー (2025.Jan.28)

31.5MV/  
 mのILC  
 スペック  
 にかなり  
 肉薄。成  
 熟がさら  
 に必要。

# KEKでの今迄の開発状況 STF-2 high-G module study (2019 - 2021) STFでのビーム運転



高エネルギー加速器イノベーションセンター



Beam profile monitor

2018年度ビームライン建設→2019年ビーム運転



**33.1 MV/m (averaging for 7 cavities)**

Achievements in STF-2 beam commissioning	
Beam energy	280 MeV
Beam power	75 W
Beam current	275 nA
Charge	55 nC/pulse
# of bunches	1000 / pulse
Average gradient estimated from beam energy	33.1 MV/m
Average gradient measured by power meter	33.8 MV/m

STF-2加速器のビーム運転で、**ILCの仕様を実証** (KEK news)  
<https://www.kek.jp/ja/newsroom/2019/05/22/1700/>

GVをopenし、ビーム運転開始。組み替えた場所でのfield emissionによる劣化が見られなかった。そのため、31.5MV/m以上のfieldをkeepした。**モジュールでのfield emissionによる劣化のない組立方法を確立できた。**

**ITNに向けては国際協力でのILC用の冷凍機則に則った8空洞入りクライオモジュール開発が今後重要。**

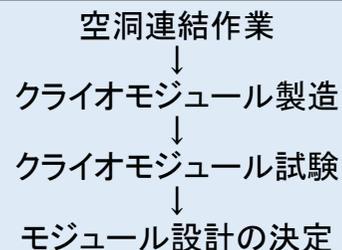
# WPP-1: 空洞量産実証 under ITN

# WPP-2: クライオモジュール組立・試験・設計決定 under ITN

## WPP-1: 空洞処理の流れ



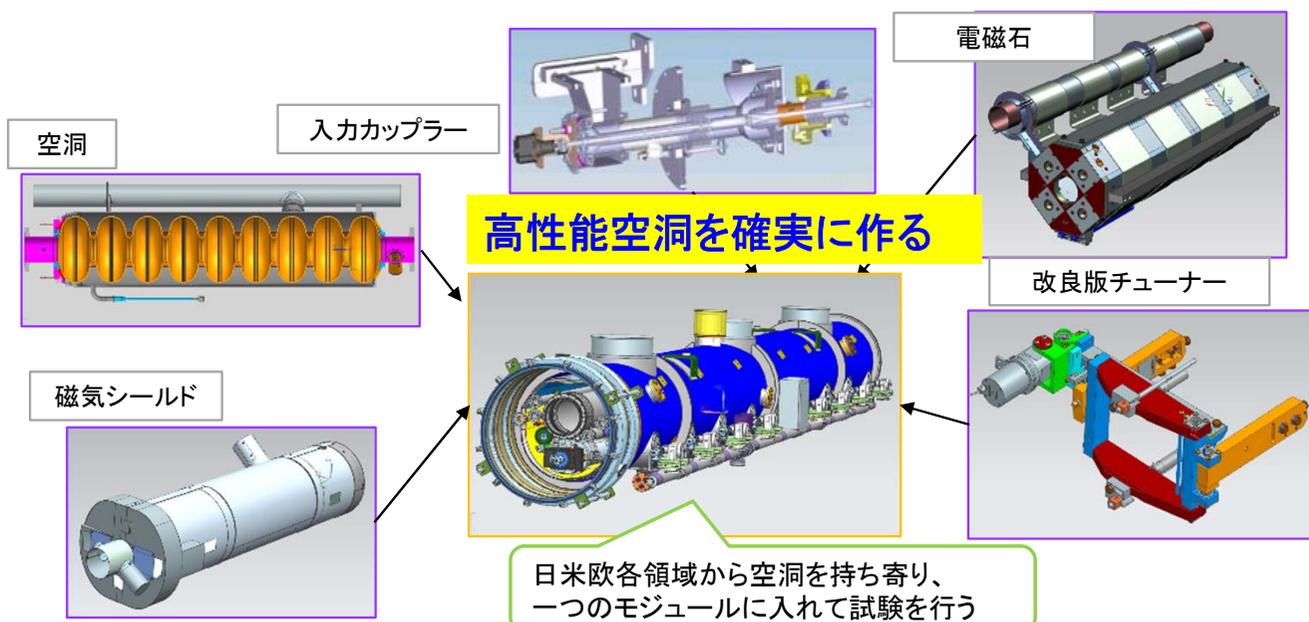
## WPP-2: CM製造・試験の流れ



- ◆ 国内で1台のクライオモジュール(CM)を製造 (WPP-2)
- ◆ 製造された空洞(WPP-1)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)

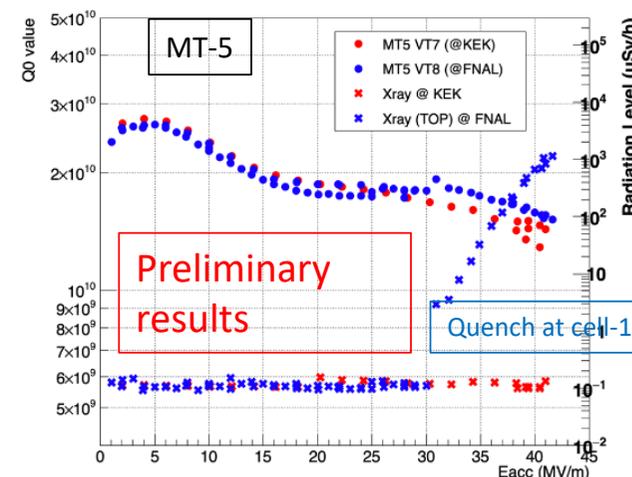
- ◆ 付属部品(入力カップラー、チューナー、超伝導電磁石、磁気シールド材)実装
- ◆ 設計変更(Change request)の検討



共通設計によるILC初のCMを完成させる

## 2023年度成果

2段階ベーキングを適用した  
Fine grain 9セル空洞で  
40MV/m以上の性能を達成



2024年度 COI棟で  
CMモジュールの開発を進めている。

# 超伝導高周波 (SRF) グループ (2024年度)



SRFグループ: 空洞グループ+空洞製造グループ\*

応用超伝導加速器イノベーションセンター



## 空洞グループ:

梅森健成(教授、リーダー)  
 阪井寛志(教授)  
 佐伯学行(教授)  
 山本康史(准教授)  
 道前武(准教授)  
 オメットマチュー(准教授)  
 後藤剛喜(助教)  
 クマール アシーシ(助教)  
 井藤隼人(助教)  
 片山領(助教)  
 久保毅幸(助教)  
 山田智宏(助教)  
 原隆文(特任助教)  
 リジャブバジパイ(特任助教)#  
 エリックヴィクルンド(特任助教)#  
 シャナブサフワン(博士研究員)  
 穴戸寿郎(前任技師)  
 江木昌史(専門技師)  
 荒木隼人(技術員)  
 新井宇宙(准技師)  
 加古永治(研究員)

## 空洞製造グループ:

(iCASA)  
 佐伯学行(教授、リーダー)  
 道前武(准教授)  
 クマール アシーシ(助教)  
 吉田孝一(研究支援員)  
 芳賀精三郎(研究支援員)  
 倉重雅一(研究支援員)  
 (機械工学センター)  
 平木雅彦(教授、副リーダー)  
 山中将(教授)  
 渡邊勇一(専門技師)  
 阿部慶子(技師)

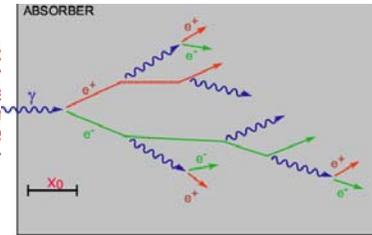
\*空洞製造施設(CFF)は機械工学センターとの共同運営

このグループが中心となって超伝導空洞開発をおこなっています。

阪大(RCNP)から  
 今年度特任助教で着任  
 総研大の学生(D): 2人

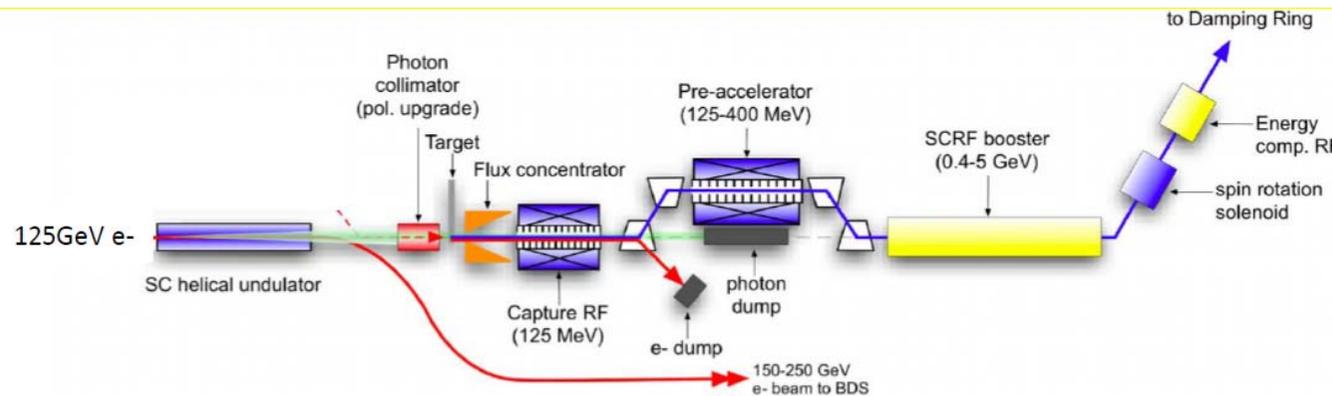
## ②陽電子源開発

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。



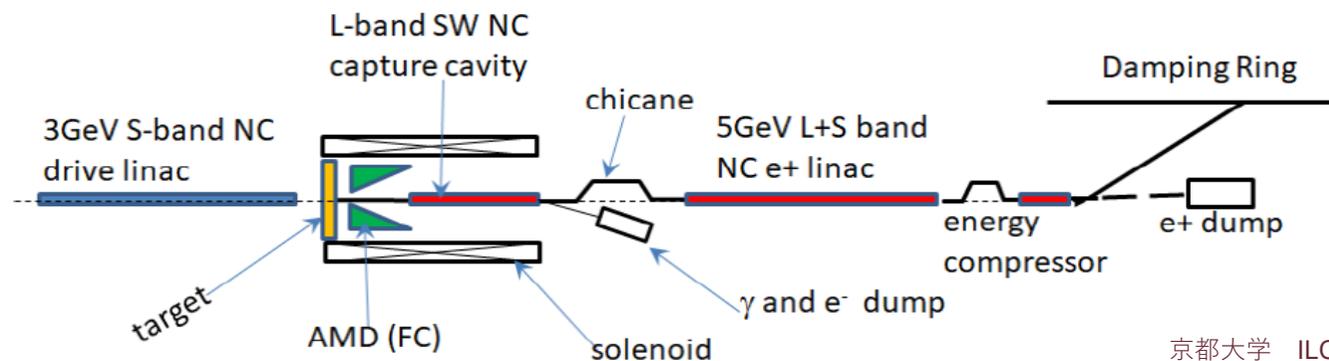
**アンジュレータ方式**：125GeVの電子をヘリカルアンジュレータに通し、発生したガンマ線をターゲットに当てて電子・陽電子対を生成させる。偏極陽電子（30%）が得られる。

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ニングが電子側に左右されない。

KEK中心で開発



京都大学 ILCセミナー (2025.Jan.28)

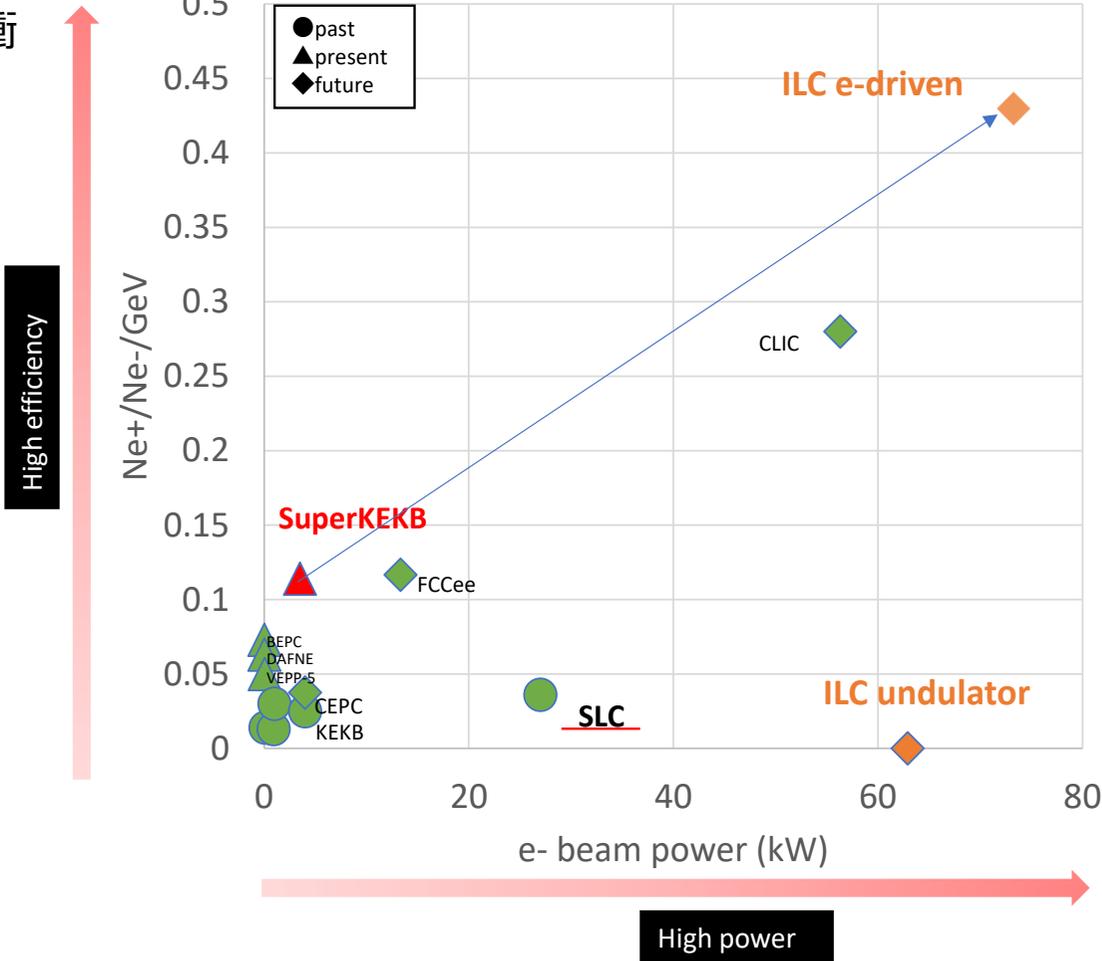
# 具体的な陽電子源開発の目標値



- 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。

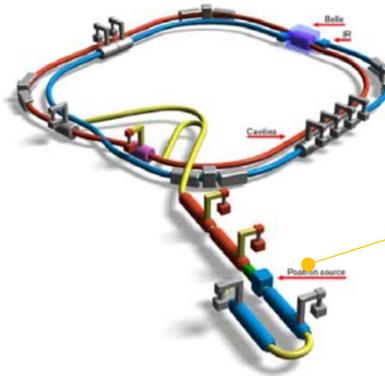
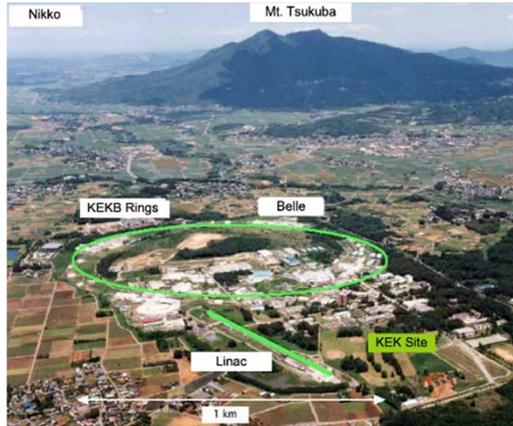
$$\mathcal{L} = \frac{f_{rep} n_b N^2}{4\pi \sigma_x \sigma_y} H_D$$

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。



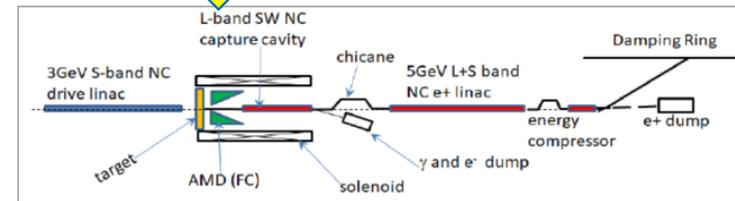
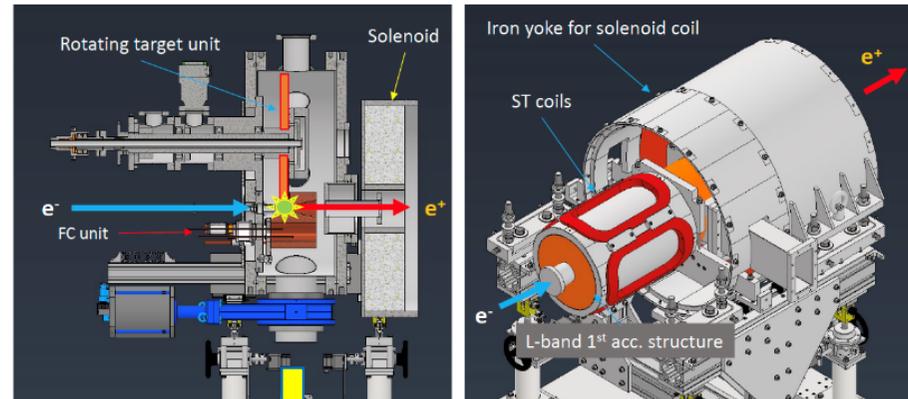
\*Since it's not possible to evaluate Ne+/Ne for ILC(undulator), the value set to 0

# WPP-8~11: 電子駆動型陽電子源



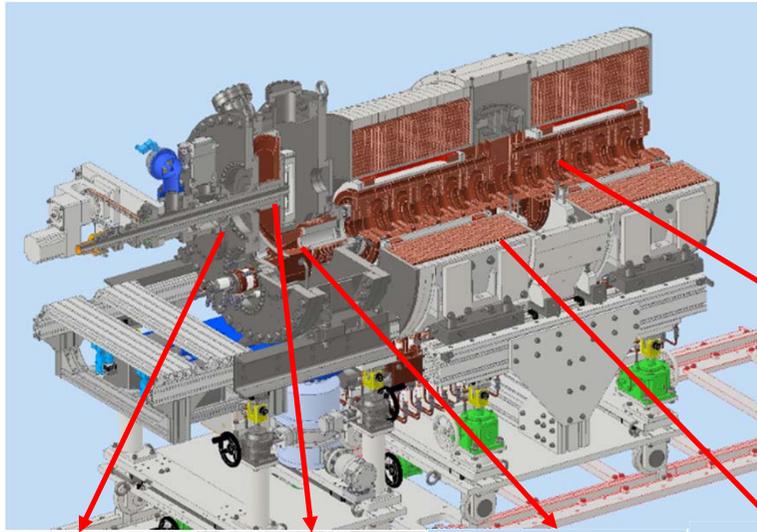
陽電子は**人工的に作る**必要があり、ターゲット (WPP-8)、磁気収束 (フラックスコンセントレータ) (WPP-9)、陽電子捕獲空洞 (WPP-10) が重要部品

- 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。

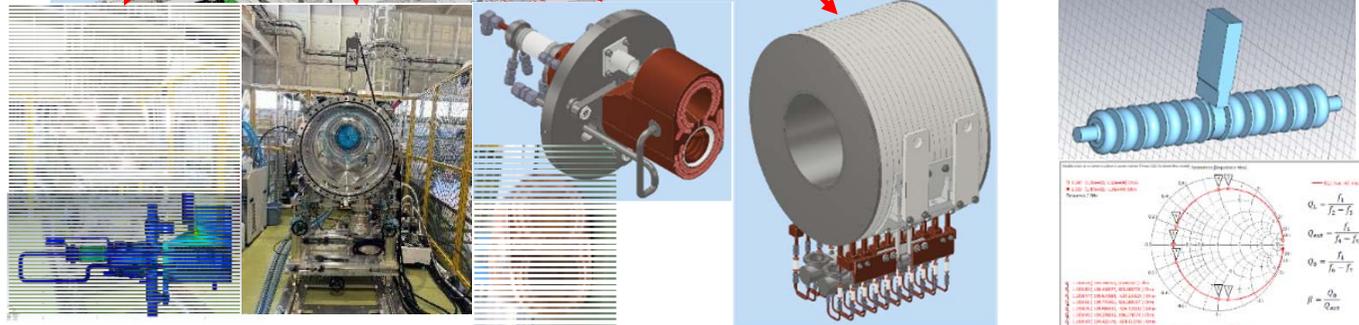


# 陽電子源 2023年度から現在の開発状況

2023年度から新しく佐藤さんが新人で助教として活躍中。  
もとは東大の原子核実験をされていたかた。



- 全体設計と3Dモデルの製作
  - 架台の製作
  - 真空チャンバーの製作
  - 回転ターゲット回転機構の製作
  - FC詳細設計と製作  
(2023年度は部品完成まで)
  - ソレノイド詳細設計
  - 加速管詳細設計
  - 実験室環境の整備
  - W-Cu接合試験
  - インフラ (電気、冷却水) の整備
- 2024年度完了予定

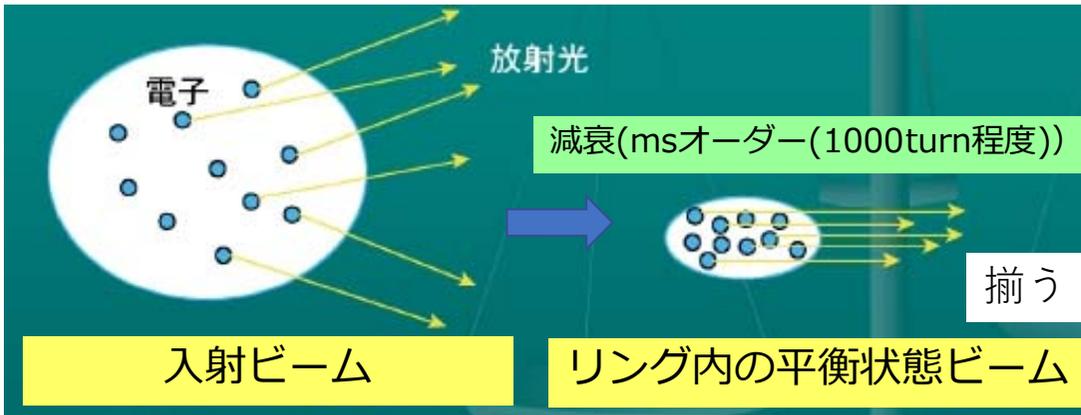
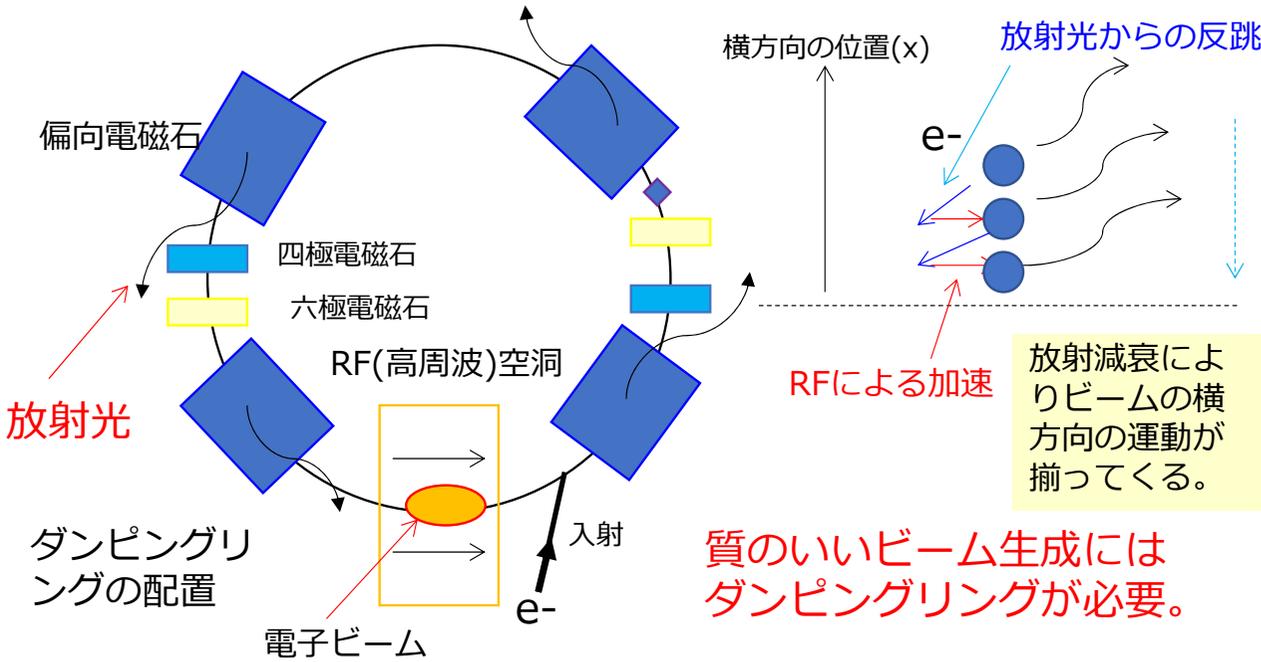


## 2023年度の開発 (陽電子) :

回転ターゲットの真空テストで無事に安定運転

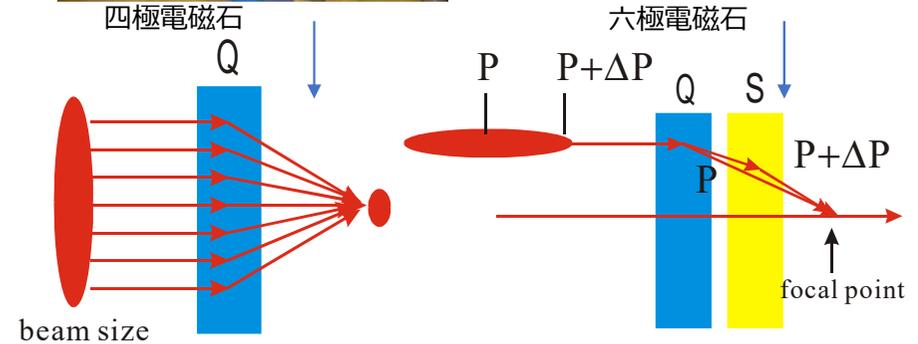
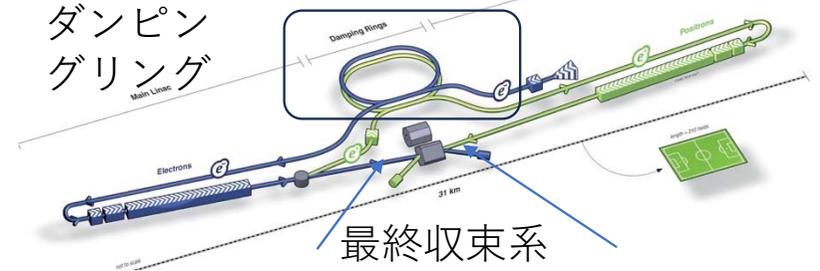
2024年度はインフラ整備およびW-Cu接合試験、FC設計製作を行っている。

## ダンピングリングの役割



## ③ナノビーム開発

Innovation Center for  
ダンピングリングで質のいいビームを作る  
最後に質のいいビームによってナノビームに絞る。



最後に、最終収束用の電磁石をきれいに並べ、衝突直前でさらに絞る。

京都大学 ILCセミナー(2025-Jan-28)

初期ビームはばらばらで動き、絞れない。ダンピングリングで質のいいビームを作り、最後に設計でナノビームへ。ATFで開発中。

# ATFでの今迄の開発



## Goal 1:

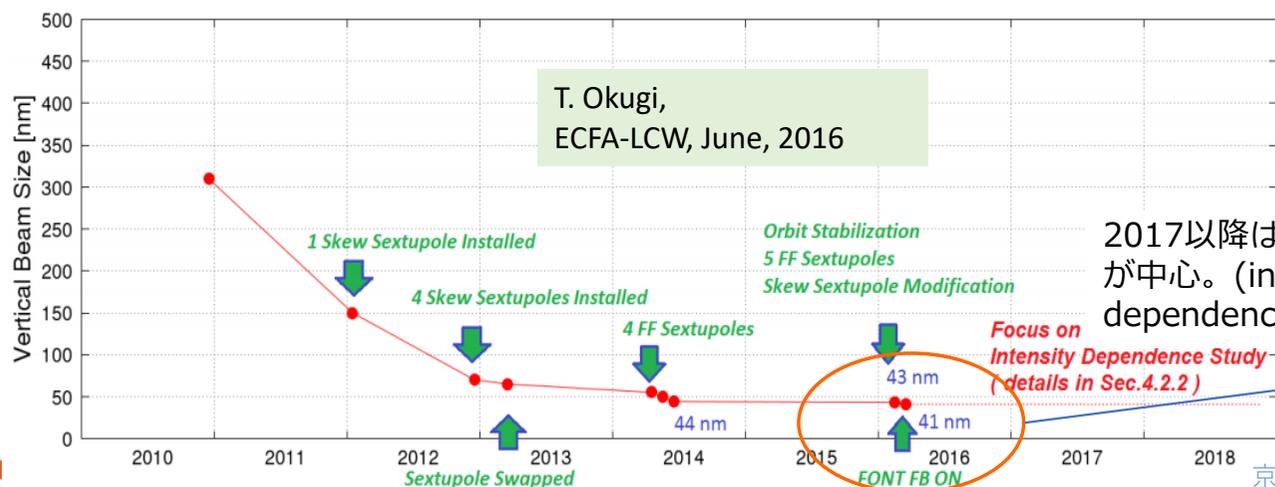
Establish the ILC final focus method with same optics and comparable beamline tolerances (opticsの詳細設計と調整)

- ATF2 Goal : 37 nm → ILC 6 nm
- Achieved 41 nm (2016)

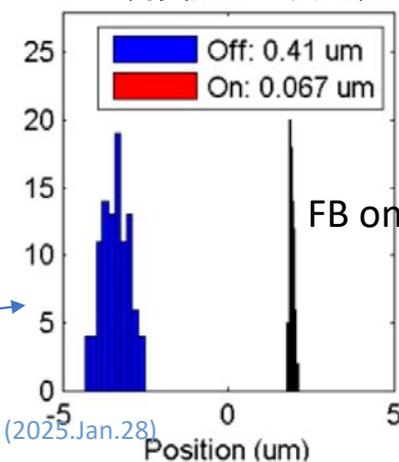
## Goal 2:

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)



衝突点での安定性

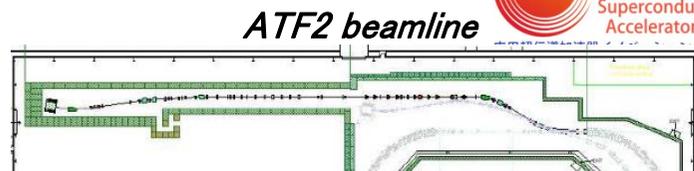


# WPP-15: 最終収束系 under ITN



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。



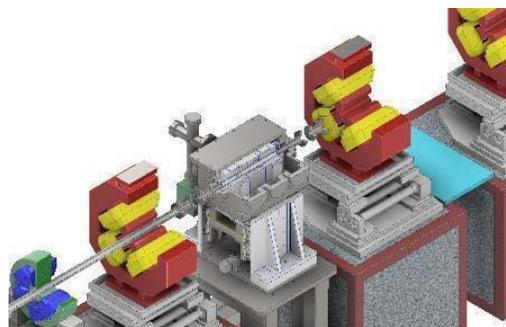
ATFの特徴はビームの光学設計を自分でできる。それをビーム調整して世界最先端の開発ができる。AIが大活躍 → この技術はJ-parc、S-KEKBにもいかされています。それで下記の学生が育っております。

ATF collaboration

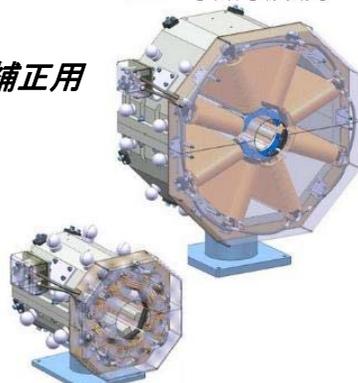


最近 (ここ1~2年の成果)

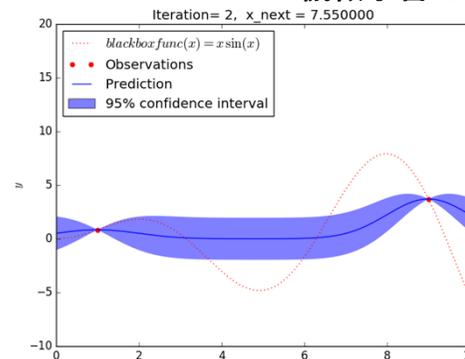
ウェークフィールド試験



高次収差補正用磁石



機械学習の例



ベイズ最適化

現在nmの安定化に向けてビーム運転中。

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)  
 ビーム安定化LLRF (2023年度 総研大博士論文: Popov Konstantin)

京都大学 iCASA セミナー (2025.Jan.28)

2023年度-2024の開発まとめと今後5か年の目標



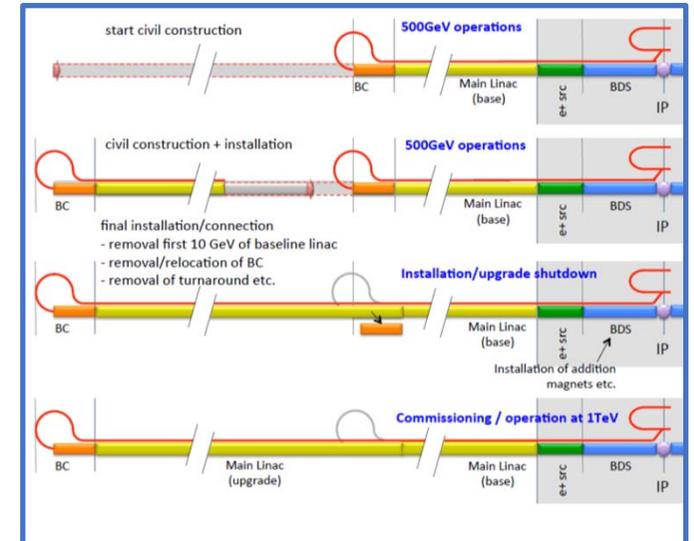
	5年間での開発目標	2023年度の活動	2024年度の活動
超伝導空洞 SRF	クライオモジュール (CM) 1台の評価 (冷凍則対応の空洞製造、カプラーなどのCM 部品の製作を含む)	空洞高性能化処理 (継続)	1空洞を用いた空洞高性能化処理の確立
		冷凍則を考慮した空洞製造	冷凍則を考慮した2相配管付きのヘリウムタンク込の9セル空洞製造
		CM評価設備準備	CM設計とその準備 (冷凍機/RF/バンカー)
陽電子	ターゲット、フラックスコンセントレータ (FC)、空洞の評価	部品設計、一部のプロトタイプ作成	ターゲット、FCのアセンブリ、ソレノイド、インフラ整備
ナノビーム	ATFでの長時間安定性実証	15週運転 (海外からも参加)	20週運転 (海外からも参加)
		ウエイク場評価	海外参加含めたナノビーム開発
		ATF高度化	昨年度製作した装置をビームラインに設置し性能試験を行った。

# (さらに将来) ILC Baseline and the Upgrades based on SRF technologies (more than 20 years)

Quantity	Symbol	Unit	Initial	$\mathcal{L}$ Upgrade	Z pole	E / $\mathcal{L}$ Upgrades		
Centre of mass energy	$\sqrt{s}$	GeV	250	250	91.2	500	250	1000
Luminosity	$\mathcal{L}$	$10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	1.35	2.7	0.21/0.41	1.8/3.6	5.4	5.1
Polarization for $e^-/e^+$	$P_-(P_+)$	%	80(30)	80(30)	80(30)	80(30)	80(30)	80(20)
Repetition frequency	$f_{rep}$	Hz	5	5	3.7	5	10	4
Bunches per pulse	$n_{bunch}$	1	1312	2625	1312/2625	1312/2625	2625	2450
Bunch population	$N_e$	$10^{10}$	2	2	2	2	2	1.74
Linac bunch interval	$\Delta t_b$	ns	554	366	554/366	554/366	366	366
Beam current in pulse	$I_{pulse}$	mA	5.8	8.8	5.8/8.8	5.8/8.8	8.8	7.6
Beam pulse duration	$t_{pulse}$	$\mu\text{s}$	727	961	727/961	727/961	961	897
Accelerating gradient	$G$	MV/m	31.5	31.5	31.5	31.5	31.5	45
Average beam power	$P_{ave}$	MW	5.3	10.5	1.42/2.84*)	10.5/21	21	27.2
RMS bunch length	$\sigma_z^*$	mm	0.3	0.3	0.41	0.3	0.3	0.225
Norm. hor. emitt. at IP	$\gamma\epsilon_x$	$\mu\text{m}$	5	5	5	5	5	5
Norm. vert. emitt. at IP	$\gamma\epsilon_y$	nm	35	35	35	35	35	30
RMS hor. beam size at IP	$\sigma_x^*$	nm	516	516	1120	474	516	335
RMS vert. beam size at IP	$\sigma_y^*$	nm	7.7	7.7	14.6	5.9	7.7	2.7
Luminosity in top 1 %	$\mathcal{L}_{0.01}/\mathcal{L}$		73 %	73 %	99 %	58.3 %	73 %	44.5 %
Beamstrahlung energy loss	$\delta_{BS}$		2.6 %	2.6 %	0.16 %	4.5 %	2.6 %	10.5 %
Site AC power *	$P_{site}$	MW	111	138	94/115	173/215	198	300
Site length	$L_{site}$	km	20.5	20.5	20.5	31	31	40

## 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

- $\text{Nb}_3\text{Sn}$  cavity (>80MV/m)
- Nb Traveling Wave (TW) structures (>70MV/m) **(see next)**

S. Michizono: LCWS2024 (LC upgrade session)

こんな感じでupgradeできるとうれしいな？

京都大学 ILCセミナー (2025 Jan-28)

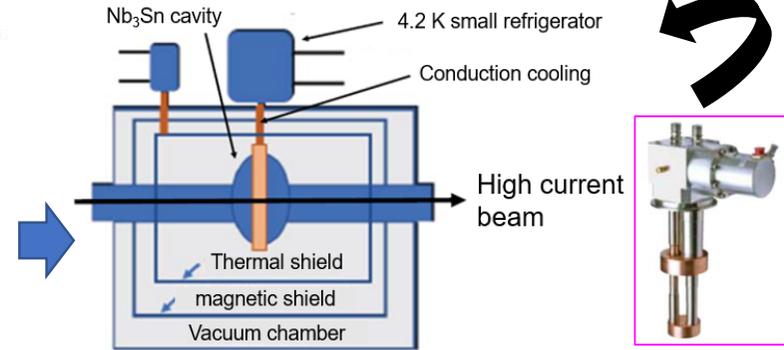
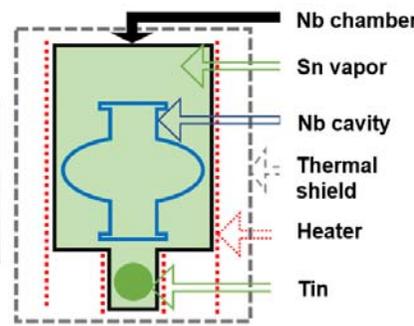
# The latest superconducting RF (SRF) technology (Nb<sub>3</sub>Sn cavity)



Nb<sub>3</sub>Sn cavity (coating by Vapor deposition)



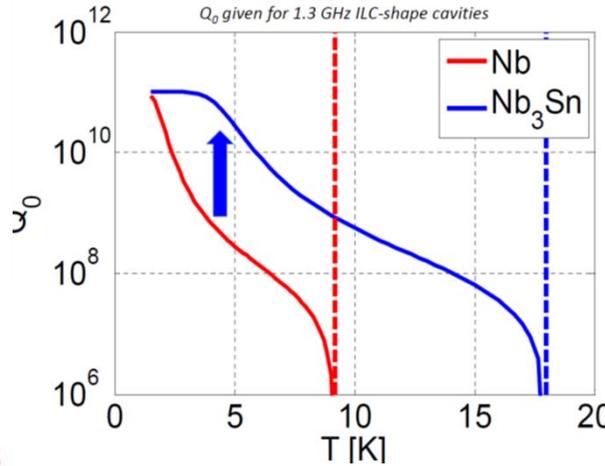
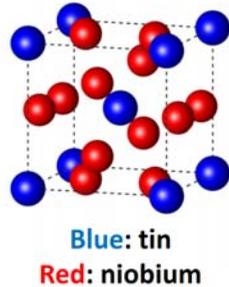
Nb cavity



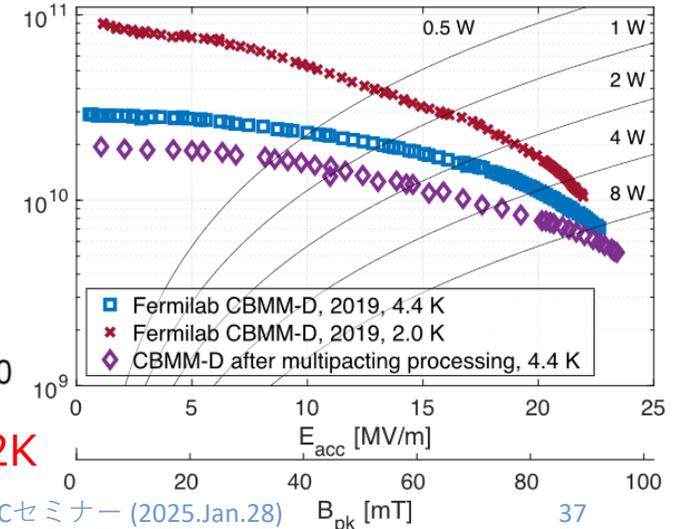
Reduce heat load lower than **1/5**. → Can **conduction cooling** by small refrigerator.

Nb<sub>3</sub>Sn cavity will be **without He tank**. Many R&D were conducted all over the world.

**Higher critical temperature**  
→ Operation at 4.2 K  
**Higher superheating field**  
→ Double the limit of niobium



**20MV/m m Q0~1e10まで達成**



Parameter	Niobium	Nb <sub>3</sub> Sn
Transition temperature	9.2 K	18 K
Superheating field	219 mT	425 mT
Energy gap $\Delta/k_b T_c$	1.8	2.2
$\lambda$ at T = 0 K	50 nm	111 nm
$\xi$ at T = 0 K	22 nm	4.2 nm
GL parameter $\kappa$	2.3	26

**Lower losses**

**Higher gradients**

40MV/m → 80MV/m ?

High T<sub>c</sub> → **can operate 4.2K**

S. Posen and D. L. Hall. *Superconductor Science and Technology*, 30(3):033004, 2017

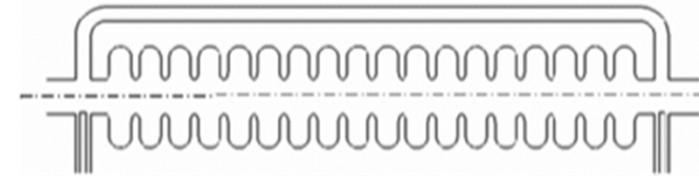
京都大学 ILCセミナー (2025.Jan.28)

et al 2021 *Supercond. Sci. Technol.* 34 025007

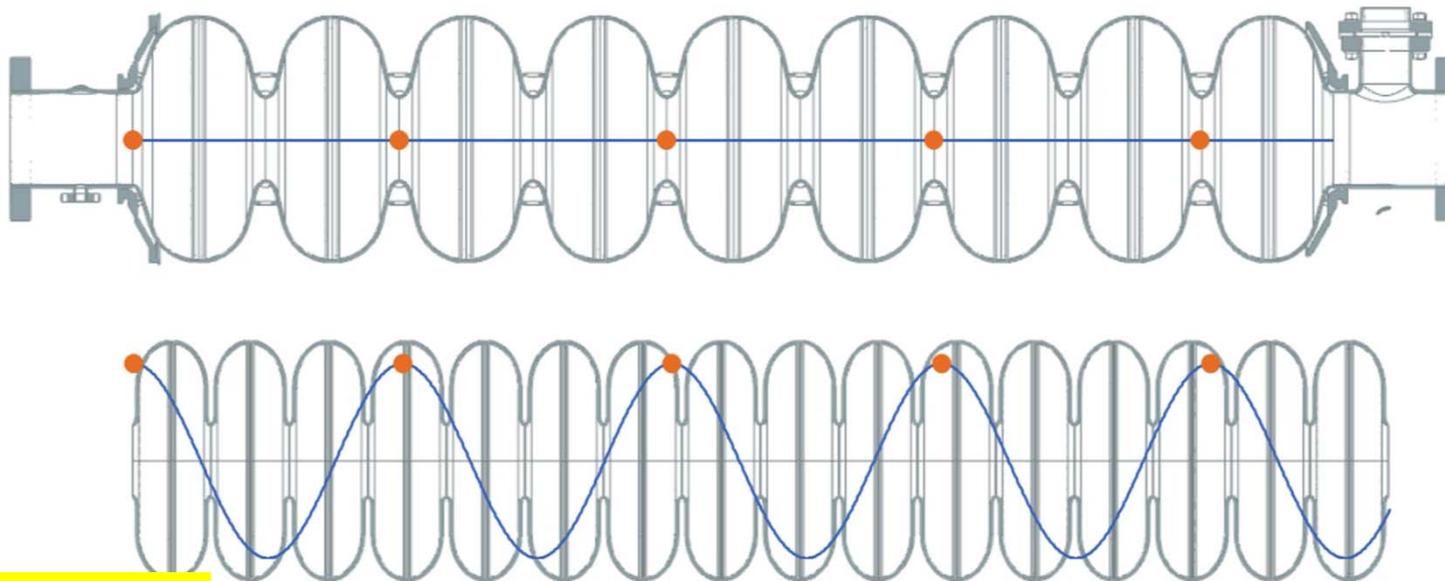
# Traveling waveでの加速

Standing Wave  
in 9-cell structure

Increase Transit Time Factor (TTF) for HG

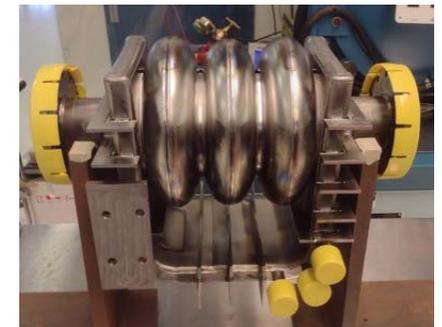


Conceptual design by Pavel Avrakhov



Traveling Wave  
in 16-cell structure

定在波(SW)に対してTWはずっと高いfieldで加速できる。



FY23 US-Japan  
“Developing high-gradient  
traveling wave SRF  
accelerating cavity” in  
collaboration between  
KEK-Jlab-FNAL is  
awarded

*Animations of accelerating field gradient profile in SW mode (Top, 9-cell structure) and TW mode (bottom, 16-cell structure). The points identify the amplitude of the field acting on the particle in sequential time-steps.*

# Summary



- 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。
- ILC実現にむけて、現在ITNが提案された。
- その枠組みの中で、**粒子源（特に陽電子源）超伝導加速空洞、ナノビーム**の開発を行っている。
- 3つの開発をメインに、ITNの下で**国際協働を通じて実施**し、加速器技術の完成度を今後高めている。

**本開発を2023年度からの5年計画で進めており、現在若手の方々のILC加速器開発の参加を募集中です。**

現在2025年4月24日目途にKEK加速器助教公募中

# 謝辞

- 本研究はILC関係者およびKEKでのiCASAのメンバーを中心として開発がすすめられましたここに深く感謝いたします。
- 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。



iCASAメンバーを中心とした現在のKEKのILC開発メンバー (+α)  
(2024.May)



# backup

# 今迄のILCの状況(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



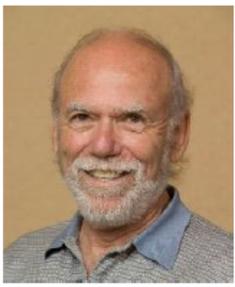
TDR: Technical Design Report  
 技術設計報告書  
 参加国: 49、参加機関: 392、参加者: >2,400



International Development Team



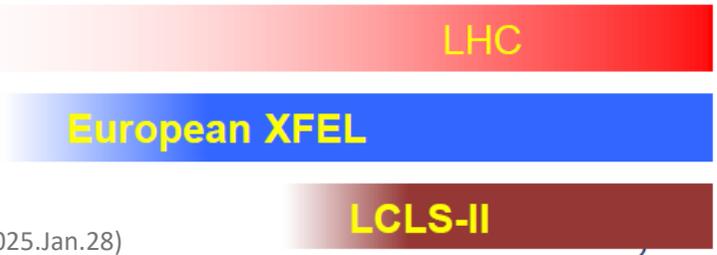
執行部(EB)議長 中田達也  
 (スイス連邦工科大学ローザンヌ校)



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の完成は京都大学シフトを発揮 (2025.Jan.28)



# ILC国際推進チーム(IDT)



\*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

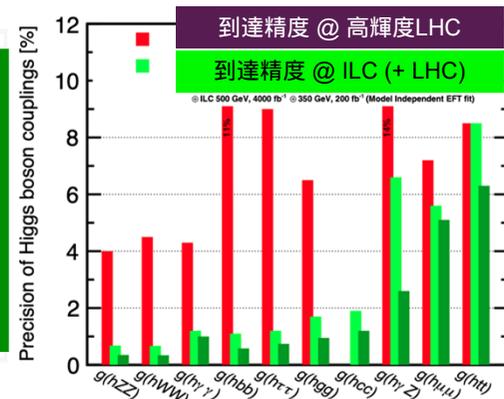
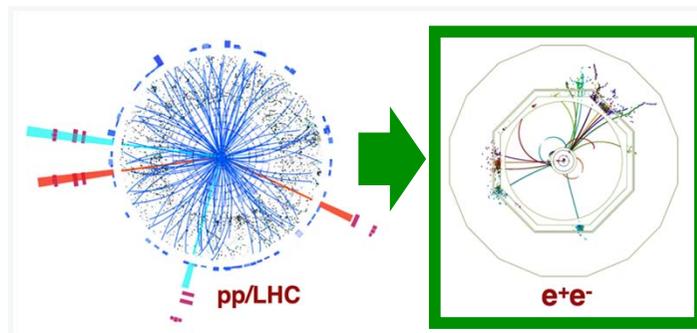
# IDT-WG2

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。

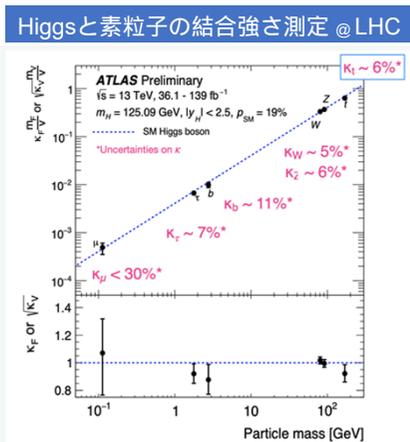


# 「Higgs粒子の精密測定は、新しい物理の扉を開く」

その実現には、ILC (e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>コライダー) が必要という話



By 石野さん



Higgs真空は (標準模型で、根拠なく仮定している通り) 質量だけを見ているのか?

素粒子の持つ別の性質を感じて結合強さを変化させていないか?

- up v.s. downタイプ
- クォーク v.s. レプトン
- 第2世代 v.s. 第3世代

e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>コライダーを使って Higgs粒子の性質を精密に測定する (高輝度LHCで到達できない世界)

$$\kappa = g_X / g_X^{SM} = 1 + \Delta\kappa$$

$$\Delta\kappa \sim O(v^2/\Lambda^2)$$

例えば、1TeVに新物理 → ~6%のズレとして表出

この差異を捉えて、新しい物理の正体を察するには、ILCが必要

# 高エネルギー実験での加速器利用 (コライダー)



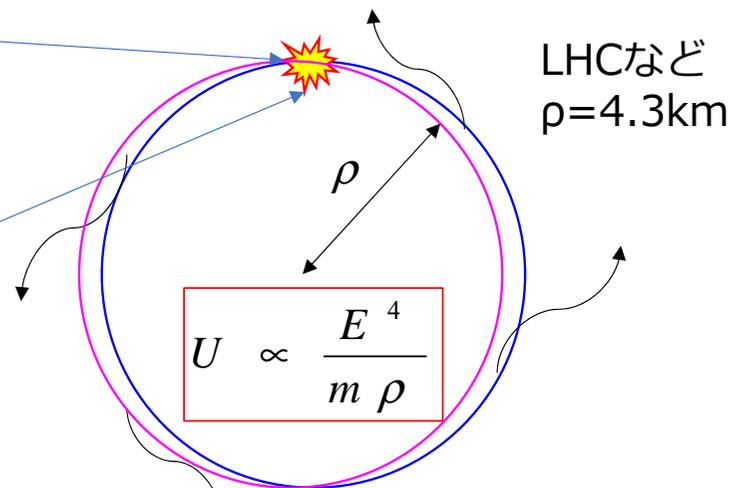
今まで見つかった素粒子は常に高エネルギーに存在している。



高い重心エネルギーを作る必要あり。また、衝突頻度を上げて、新粒子生成頻度を上げる。



$E_{CM}$ とLを加速器で決める。



U:放射光によるEnergy loss

E: 粒子のエネルギー  
rho: 曲率半径  
m: 粒子の質量

エネルギーを上げるほど  
周長は大きくなる。

物理解析の命は統計量 (= 単位時間あたりの反応数)

$$N [s^{-1}] = L [cm^{-2}s^{-1}] \times \sigma [cm^2]$$

L: Luminosity (輝度)

行き違う粒子の密度レート

$$L = \frac{fN^2}{4\pi\sigma_x\sigma_y}$$

f: 加速器の繰り返し周波数  
N: ビームバンチ内の粒子数  
 $\sigma_x (\sigma_y)$ : 横(縦)方向ビームサイズ

$\sigma$ : 反応断面積

~反応が生じる有効面積

神様が決める



コライダーの性能  
はLuminosity  
= 単位断面積あ  
たりの反応数

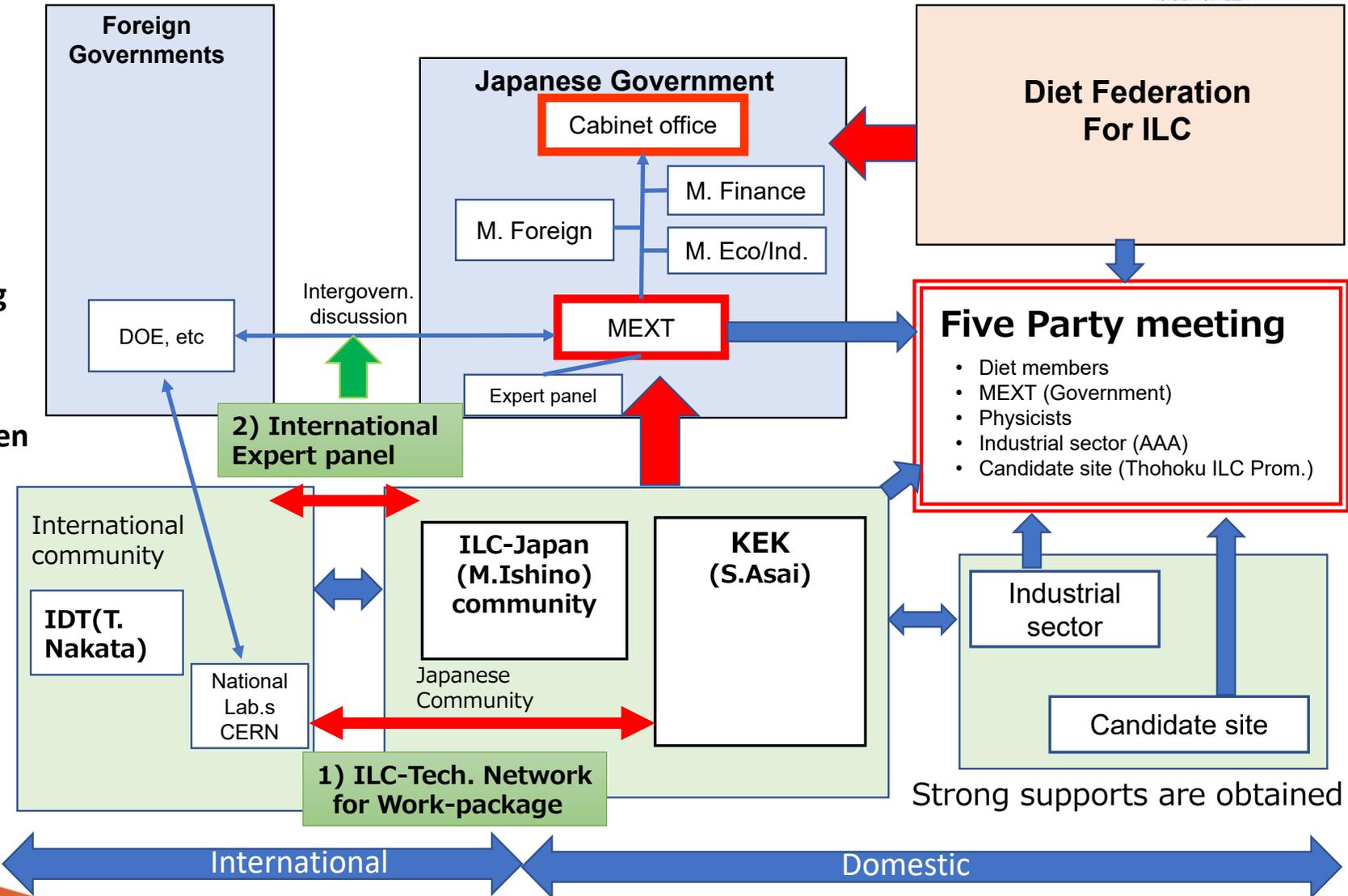
# Promotion scheme of ILC / relation of Stakeholder



1. KEK & Community & IDT

2. Five Party Meeting

3. liaison office between MEXT and Cabinet office starts



ILC is planned as the Global Project:  
Global vs International approaches  
causes “chicken and egg problem”.

Japanese Government considers ILC/the next collider is  
constructed with “Global” approach.

- 1) Cost is not affordable
- 2) Human resource

- A) sustainable developments  
on industrial invest and HR
- B) Diversity of Science

Let's discuss “Global Approach” for not only “ILC”  
but also LC(with Various ECM & technologies)

Let's have fruitful discussion !!!



## Future of CERN = FCC?

*“The cost estimates in the feasibility study are subject to a large number of **uncertainties**, the effects of which are still largely unknown. **The financing plan is extremely vague** and requires a high level of **commitment from external partners**, which is neither assured nor even in prospect at the present time.*

*Under the current economic conditions, **Germany is not in a position to provide the planned funding**. In view of all these points, the **FCC has to be considered as not affordable**.*

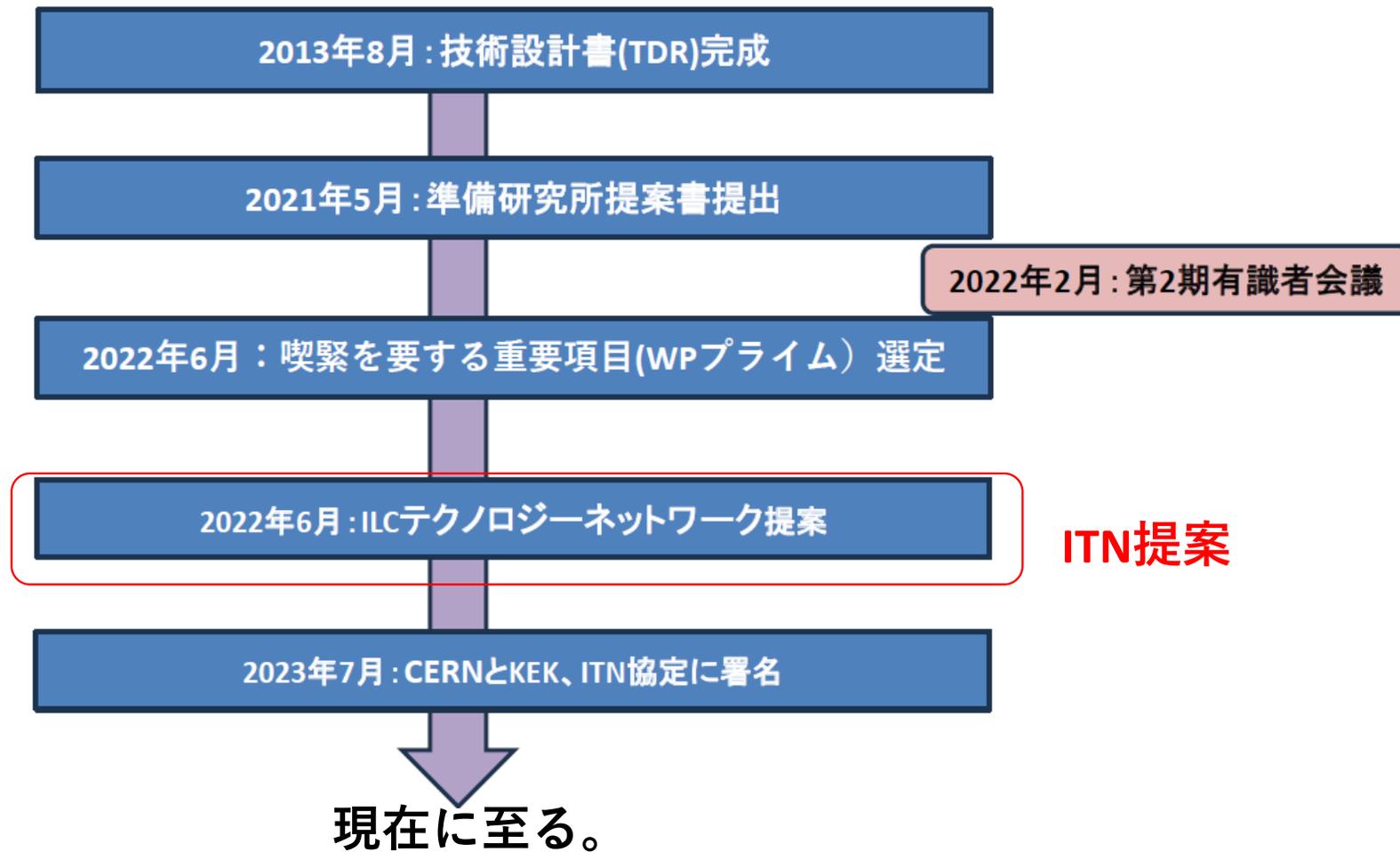
*Hence, CERN has to **diversify its efforts and prepare for different scenarios** including one without the FCC-ee.”*

BMBF Statement in CERN Council Meeting 02/2024

Bonn, 23.05.2024

4

# ITNが提案されるにいたるまで(\*)



## ILC Technology Networkと文科省補助金

ITN:

WPPの海外分担分  
いずれのWPPにも  
KEKの関与は必要で  
あろうが、WPPによっ  
ては海外の比重が高  
いものもある

補助金:

COI棟を中心としたSRF  
関連の基盤設備整備



CM1台の評価  
(CMIには欧米で製造した空洞  
各1台程度は入れたい。)

WPP-1  
WPP-2  
WPP-3  
...

文科省補助金について、**Advisory Board**を設  
置  
第二回会合を2024/3/27-29に開催  
今年度の成果と来年度以降の計画を説明  
評価を受けた(報告書提出済)  
(初回は2023/10に開催)

# ILCに向けた加速器研究開発の醍醐味

## (Mission) 加速器の性能向上に必要な装置を開発する。

- KEKでは、実際に学生・研究者・職員のアイデアに基づく革新的なシステムを提案・実現することで、**世界最高性能**の加速器を長年に渡り維持・運用している。

## 加速器の醍醐味は“ものづくり”

- 装置設計、開発が楽しい。
- 製作した装置が想定通り動くのが楽しい。
- 自分のアイデアがうまく動くとうれしい。

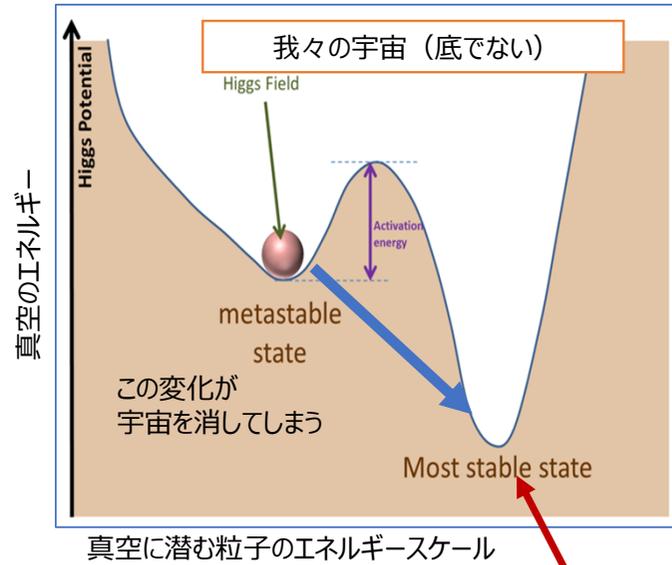
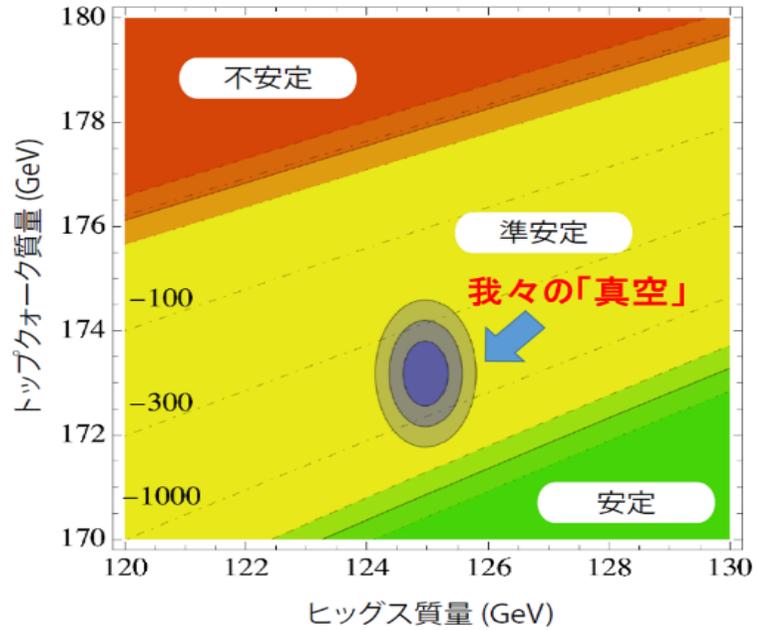
## ILC用の最先端加速器技術開発はKEKでしかできない開発

- 日本では超伝導空洞開発、ナノビーム開発はKEKでしかできない。
- 世界の最先端を走る加速器開発を一から行える。
- 特にKEKにあるインフラを最大限に生かし、自分なりのアイデアを生かし、将来の新しい加速器の設計・製作を行うことができる。
- 未来の加速器をみなさんが担うことになります。(いいすぎ?)



2022年度10月に総研大入学  
iCASAで超伝導空洞用の大電力入力カプラー開発（世界最高のパワーカプラー開発）を行っているPragya Namaさん

# 広げられた「知の地平線」 ヒッグス粒子の精密測定から見てきた新現象



真空に潜む粒子のエネルギースケール

**本当の底の存在 = 新現象の示唆**



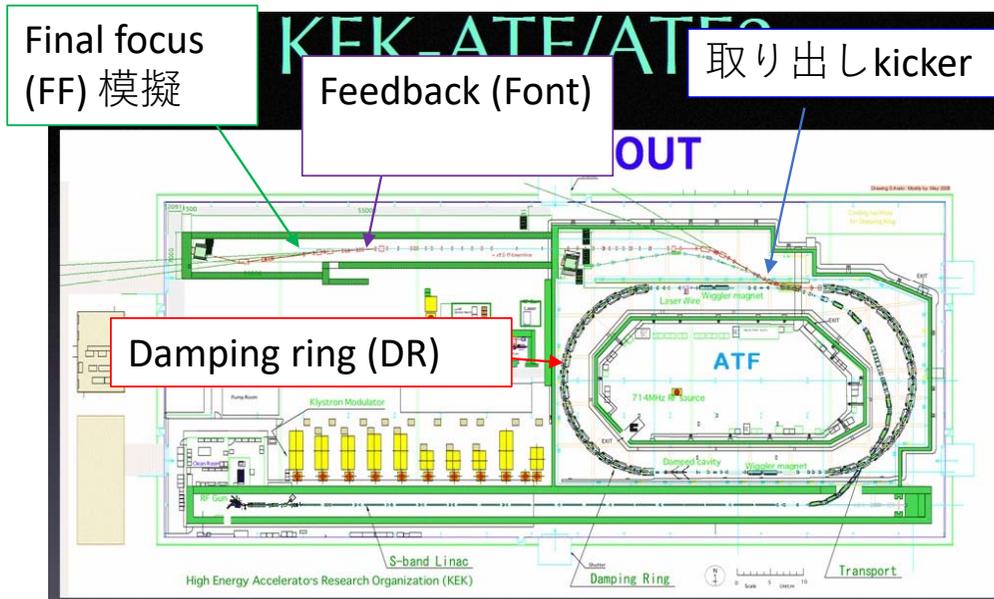
## リニアコライダー

- 衝突エネルギーの増強が可能
  - 衝突後のビームはビームダンプへ (再利用しない)
- つまり、**衝突点で極限まで絞ることができる。**  
**これで繰り返しの弱点をカバーする。**

## リング型のコライダー

- ビーム衝突の繰り返しが高い
- しかし、衝突エネルギー増強は困難
- また、周回を維持するため、ビームを絞ることに限界がある

# 1. Nanobeam開発 (KEK-ATF/ATF2)

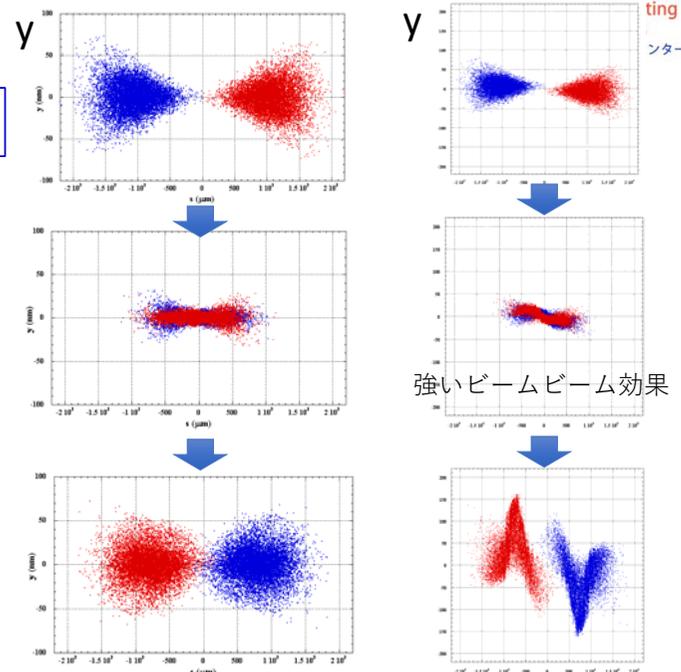


1995年から建設。1.28 GeVのダンピングリングによる低エミッタンス化とそこから安定なビーム取り出しそしてその取り出しライン(ATF2)でのfinal focusビームの生成と安定性の評価を行っている。

目標： $v$ : 37nmのナノビーム → ILCでCM 500GeVで6nm  
そのFFでの軌道安定化のためのfeedback systemの確立。

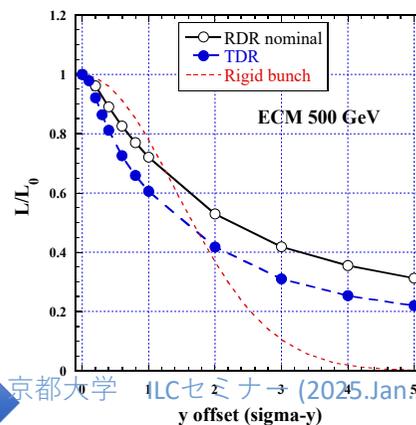
詳しくは<https://ilc.kek.jp/LCoffice/OfficeAdmin/Test/Seminar/Seminar.html>  
第五回ILCを学び考える会 久保 浄 「ILC Final Focusを考える」より

## 正面衝突@FF 位置のずれ $1\sigma$ @FF



ビームはoptics通り

ビームが衝突後発散



位置のずれによるLuminosityの減少効果。TDRでは $1\sigma$ で6割になる。角度のずれもほぼ $1\sigma'$ で同じ効果。

Nanobeamでかつ安定な衝突が重要



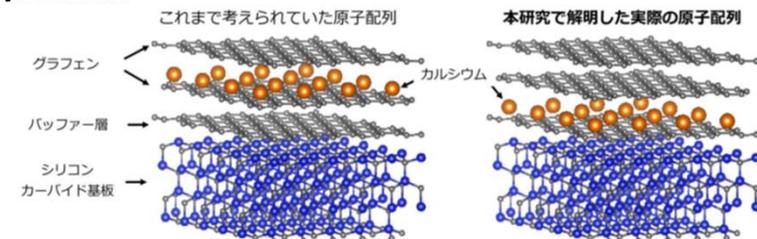
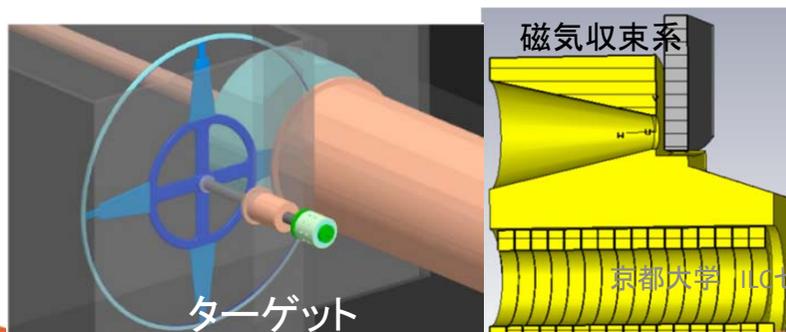
# 粒子源



- 陽電子は、高いエネルギーの光あるいは電子ビームを金属ターゲットに入射して生成。
- これまでSLC, SuperKEKB, DAFNE, CESRなどのコライダーに採用されており、将来では、FCCee, CEPCなどの円形コライダー、ILC, CLICなどの直線型コライダー、さらにはミュー粒子コライダー (LEMMA) などにおいても、さらに大強度の陽電子源が必要とされている。
- 陽電子は物性探索にも有用で、大強度の低速陽電子は表面構造解析などで期待されている。
- 陽電子源としては、熱負荷を分散する**回転ターゲット**、生成された陽電子を捕獲する**磁気収束回路**、その後の**ビーム加速**が重要な加速器要素技術。
- 陽電子源ターゲット**やビームダンプは、中性子発生用のターゲットや、産業医療応用で利用するビーム照射のターゲットとも密接に関連している。
- 超伝導加速器などの発達でビーム強度が増大しており、それを有効に活用できるターゲットの技術開発は、世界的にも関心が高い。

## 重点となる国際協力研究開発項目

- 回転ターゲットの詳細技術設計
- 磁気収束系の詳細技術設計
- 陽電子ビーム捕獲シミュレーション
- ターゲット交換系の詳細技術設計
- 最近の技術的な進捗を取り込んだ電子源の詳細技術設計

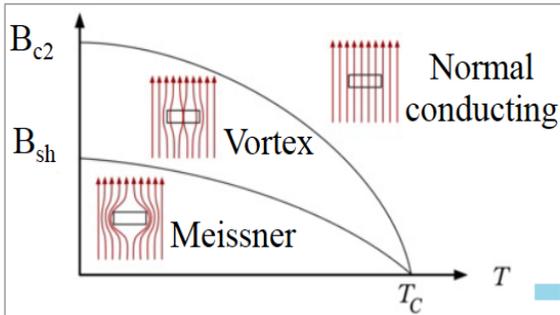


低速陽電子を活用した原子配列の決定

京都大学 ILCセミナー (2025.Jan.29)

<https://www.kek.jp/ja/newsroom/attic/PR20191114.pdf>

# Nb<sub>3</sub>Sn cavity for the future upgrade

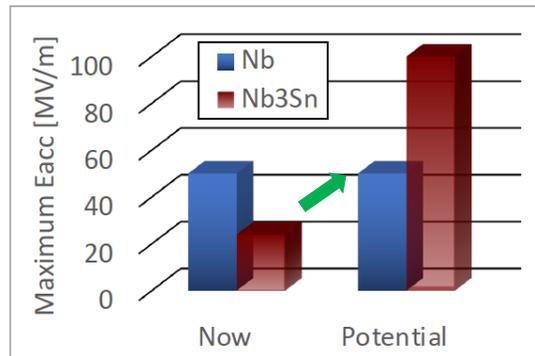


## SRF cavity

- $B_{sh}$  = practical limit for SRF
    - $B_{sh-Nb}$  : 210 mT
    - $B_{sh-Nb3Sn}$  : 430mT
- x2

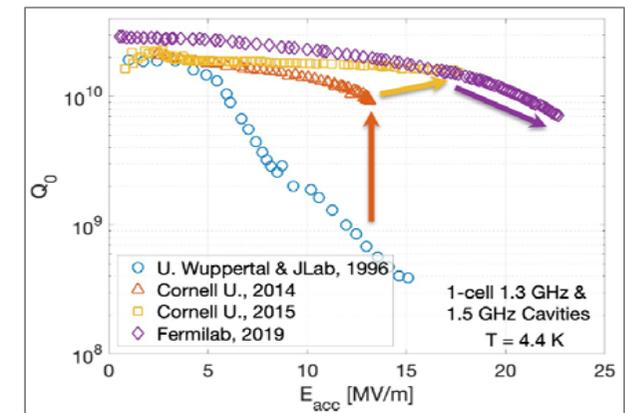


>80 MV/m in future

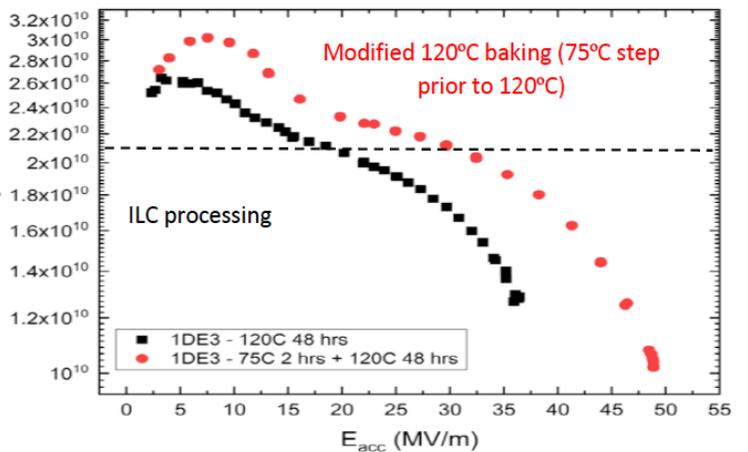


Nb<sub>3</sub>Sn progress at Fermilab.

S. Posen et al., SUST, 34, 02507 (2021)



Nb<sub>3</sub>Sn Potential in high-G future



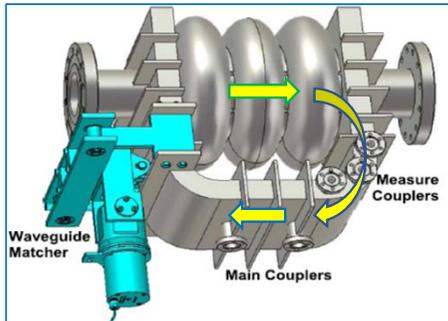
Progress at Fermilab: Nb, 75/120 bake

A. Grassellino et al., arXiv: 1806/09824

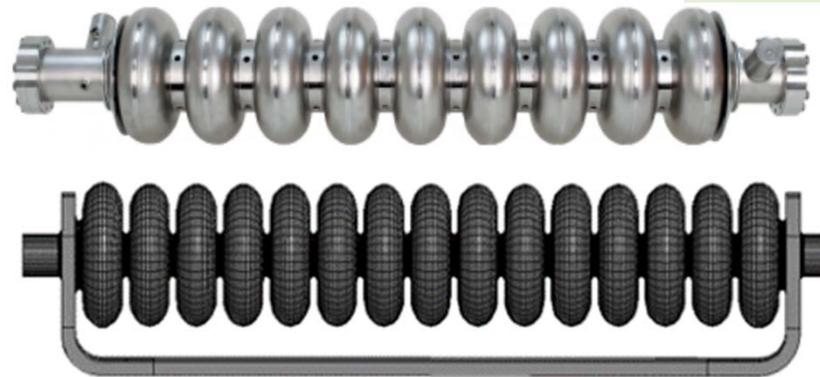
# A new concept for SRF proposed for ILC-3TeV and Helen: Traveling Wave (TW) SRF cavity, compared with Standing Wave



Courtesy: H. Padamsee et al., for ILC-3TeV  
S. Belomestnykh et al., for HELEN



Prototype TW structure under test

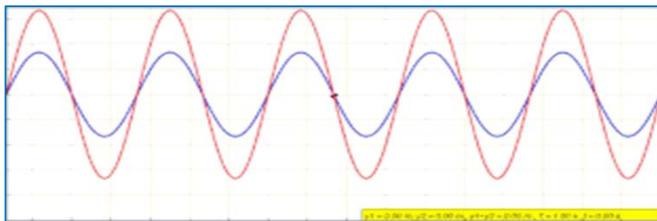


SW: TESLA cavity (ILC baseline)

TW: proposed for ILC-3TeV, Helen

>70 MV/m operation

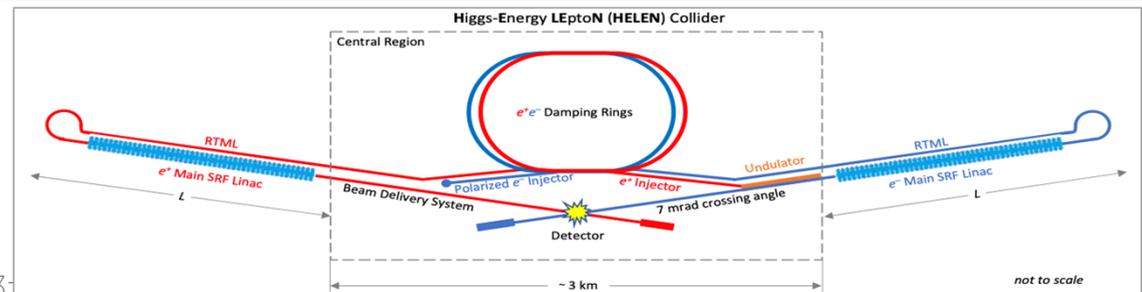
- ← Red standing wave – High Peak Fields,
  - ← Green (acc.) and Blue (Return) Waves are Travelling Waves Lower peak fields,
  - ← Guide blue wave in a return wave-guide to avoid SW peak fields
- attached to both ends



## HELEN: A LINEAR COLLIDER BASED ON ADVANCED SRF TECHNOLOGY\*

S. Belomestnykh<sup>†1</sup>, P. C. Bhat, M. Checchin<sup>‡</sup>, A. Grassellino, M. Martinello<sup>‡</sup>, S. Nagaitsev<sup>2</sup>,  
H. Padamsee<sup>3</sup>, S. Posen, A. Romanenko, V. Shiltsev, A. Valishev, V. Yakovlev  
Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, IL, USA  
<sup>1</sup>also at Stony Brook University, Stony Brook, NY, USA  
<sup>2</sup>also at University of Chicago, Chicago, IL, USA  
<sup>3</sup>also at Cornell University, Ithaca, NY, USA

京都



<https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.01074>

# Summary of future upgrade using SRF

	ECM[GeV]	Gradient [MV/m]	Length [km]	#of cavities	Additional material cost [MILCU]	Technology ready
TDR	250	31.5	20.5	~8,000	(~5,000 MILCU)	---
TDR	500	31.5	33.5	~16,000	+3,000 MILCU	---
TDR	1,000	45	44.5	~23,000	+3,000+7,100 MILCU	In 10 years
Nb3Sn or TW	500	63	20.5	~8,000*	?	In 15 years
NB3Sn & TW	1,000	126***	20.5	~8,000**	?	In ~20 years?

\* Requires RF source upgrade (x2) + Cryogenic upgrade (~x2)  
 \*\* Requires RF source upgrade (x4) + Cryogenic upgrade (~x4)  
 \*\*\* Surface discharge etc. can happen at such a high gradient operation

		500 GeV		TeV Upgrade		
		Baseline	Scenario A	Scenario B		Scenario C
				upgrade	base	
Energy range	GeV	15–250	15–500	15–275	275–500	15–500
Gradient	MV/m	31.5	31.5	45	31.5	45
Num. of cavities		7400	15 280	8190	7090	10 700
				total cavities: 15280		
Linac length	km	12	25	9.5	11.5	17.5
				total length: 21.0		

## 15.12.2.2 Summary of Value and Labour changes

The total Value changes associated with scenario A, B and C are 6,706, 5,489 and 7,082 MILCU, respectively. These increases correspond to 81%, 66%, and 86%, respectively, of the 500 GeV Value estimate for the baseline with luminosity upgrade. The total Labour changes associated with scenario A, B and C are 11,988, 9,416 and 14,256 thousand person-hrs, respectively. These increases correspond to 50%, 42%, and 59%, respectively, of the 500 GeV baseline Labour estimate with luminosity upgrade.

<sup>19</sup>This is not quite correct, since some of the baseline RTML Value and Labour is associated with the beamlines from the damping rings to the long 5 GeV transfer line. The RTML contribution to the 1 TeV upgrade is thus slightly overestimated.

# 今、知っていること そして、**その次!**



## 物質を構成する粒子

$e$	$\nu_e$	$p$	$n$
$\mu$	$\nu_\mu$	$s$	$c$
$\tau$	$\nu_\tau$	$d$	$u$

レプトン      クォーク

## 力を伝える粒子

$g$        $\gamma$        $Z^0$   $W^\pm$

物質を構成する粒子の性質

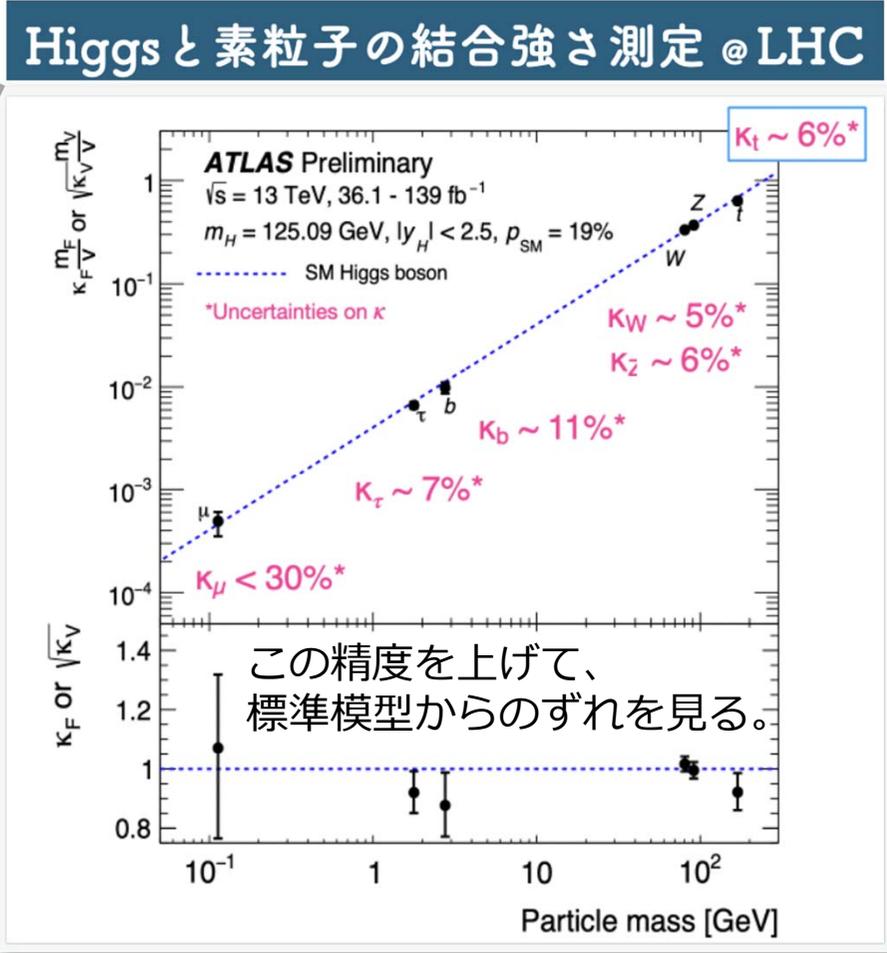
力を伝える粒子の性質

素粒子が質量をもつ仕組み

**ヒッグス機構**

大体わかったが精度が悪い  
これを精密に調べることで  
宇宙の大きな謎に迫る

$e+e^-$  コライダーで精度を上げて、  
詳細に調べることが重要。





# ILC parameters (snowmass 2021)

<https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.07622>

Quantity	Symbol	Unit	Initial	$\mathcal{L}$ Upgrade	Z pole	Upgrades		
Centre of mass energy	$\sqrt{s}$	GeV	<u>250</u>	250	91.2	500	250	1000
Luminosity	$\mathcal{L}$	$10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	<u>1.35</u>	2.7	0.21/0.41	1.8/3.6	5.4	5.1
Polarization for $e^-/e^+$	$P_-(P_+)$	%	80(30)	80(30)	80(30)	80(30)	80(30)	80(20)
Repetition frequency	$f_{\text{rep}}$	Hz	5	5	3.7	5	10	4
Bunches per pulse	$n_{\text{bunch}}$	1	1312	2625	1312/2625	1312/2625	2625	2450
Bunch population	$N_e$	$10^{10}$	2	2	2	2	2	1.74
Linac bunch interval	$\Delta t_b$	ns	554	366	554/366	554/366	366	366
Beam current in pulse	$I_{\text{pulse}}$	mA	5.8	8.8	5.8/8.8	5.8/8.8	8.8	7.6
Beam pulse duration	$t_{\text{pulse}}$	$\mu\text{s}$	727	961	727/961	727/961	961	897
Average beam power	$P_{\text{ave}}$	MW	5.3	10.5	1.42/2.84 <sup>*)</sup>	10.5/21	21	27.2
RMS bunch length	$\sigma_z^*$	mm	0.3	0.3	0.41	0.3	0.3	0.225
Norm. hor. emitt. at IP	$\gamma\epsilon_x$	$\mu\text{m}$	5	5	5	5	5	5
Norm. vert. emitt. at IP	$\gamma\epsilon_y$	nm	35	35	35	35	35	30
RMS hor. beam size at IP	$\sigma_x^*$	nm	516	516	1120	474	516	335
RMS vert. beam size at IP	$\sigma_y^*$	nm	7.7	7.7	14.6	5.9	7.7	2.7
Luminosity in top 1 %	$\mathcal{L}_{0.01}/\mathcal{L}$		73%	73%	99%	58.3%	73%	44.5%
Beamstrahlung energy loss	$\delta_{\text{BS}}$		2.6%	2.6%	0.16%	4.5%	2.6%	10.5%
Site AC power	$P_{\text{site}}$	MW	<u>111</u>	138	94/115	173/215	198	300
Site length	$L_{\text{site}}$	km	<u>20.5</u>	20.5	20.5	31	31	40

Table 4.1: Summary table of the ILC accelerator parameters in the initial 250GeV staged configuration and possible upgrades. A 500 GeV machine could also be operated at 250GeV with 10 Hz repetition rate, bringing the maximum luminosity to  $5.4 \cdot 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  [30]. \*): For operation at the Z-pole additional beam power of 1.94/3.88 MW is necessary for positron production.

# 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

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

Superconducting  
Accelerators  
応用超伝導加速器イノベーションセンター



#トピックス

2023/07/08



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）

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



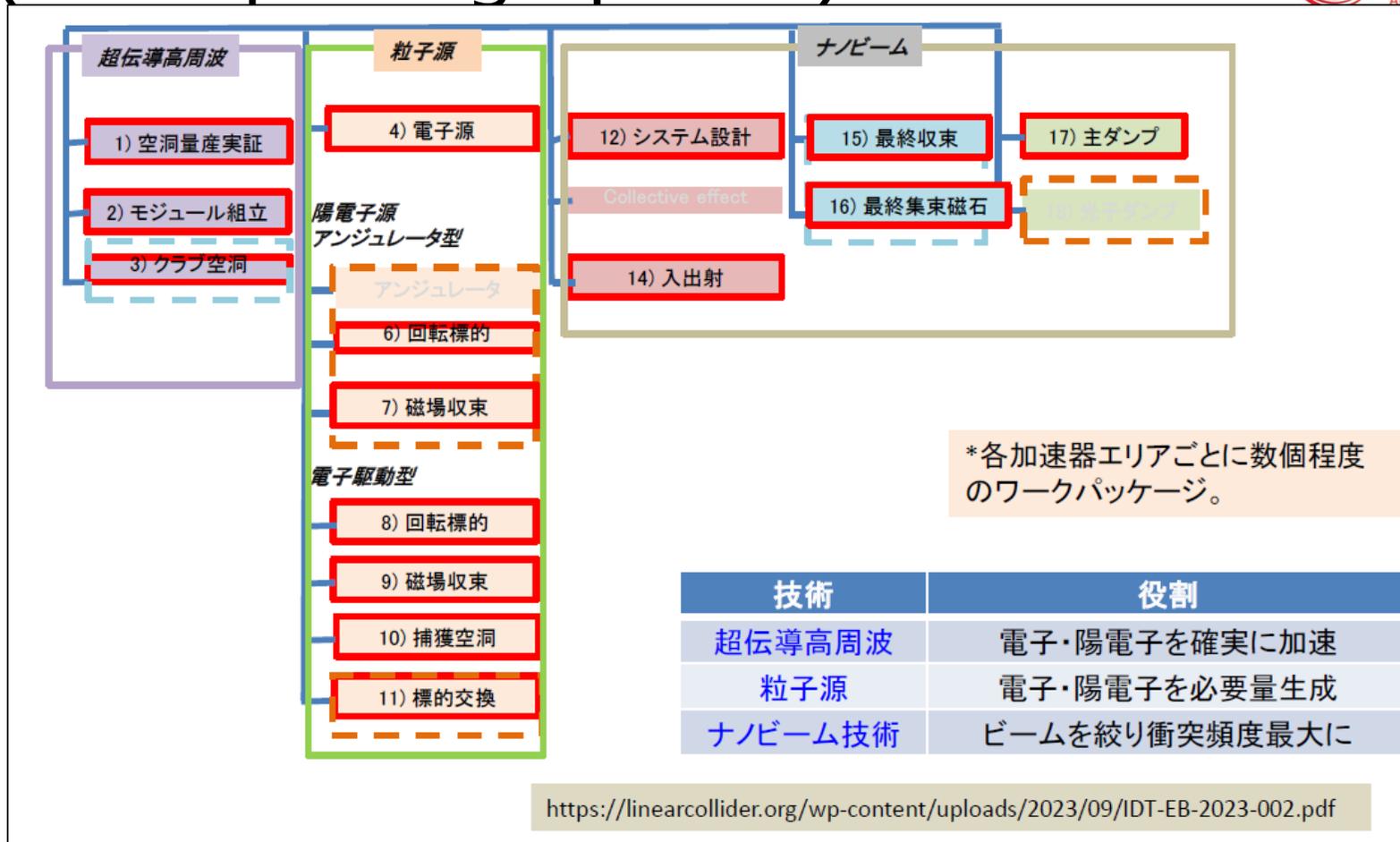
KEKと欧州合同原子核研究機関（CERN）は7月7日、国際リニアコライダー（ILC）の研究開発に関する新たな枠組み、「ILCテクノロジーネットワーク（ITN）」に関する協定に署名しました。

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所長が署名しました。この中で、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ます。

ITNはILCの加速器技術開発の重点事項を国際共同で進める枠組みで、KEKとILC国際推進チーム（IDT）の主導で提案されました。本枠組みは、KEKと参加研究機関間の二機関協力協定締結により構築されます。今回の署名は、同協定の第1号となるものです。KEKは今後、他の研究機関とも同様の協定を締結し、ITNの枠組みを広げていきたい考えです。

CERNとはITNのもとで国際協力開発中。  
（超伝導空洞、ナノビームなど）

# WPP (work package prime) under ITN



ITNで実施課題には、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。

# WPP-1: 空洞量産実証 under ITN



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。

## 2023年度成果

◆ 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)

**高性能空洞を確実に作る**

◆ 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)

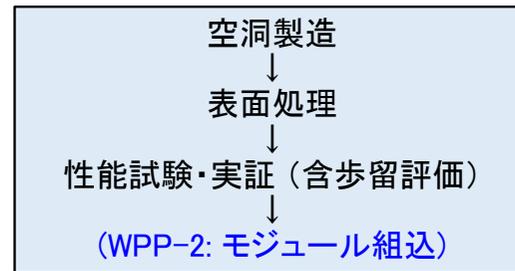
◆ 超伝導材(Nb)製造: 不純物混入無し(直接スライス)+コストダウン

◆ 新表面処理方法: 空洞の高電界・低損失による性能向上

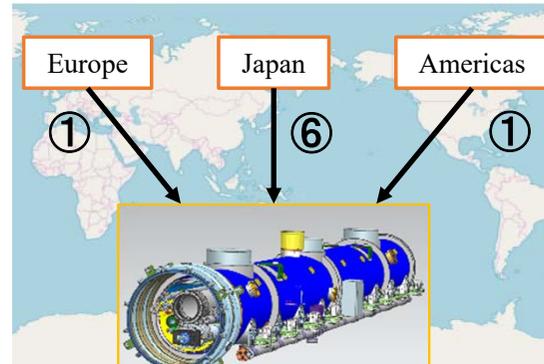
◆ プラグ互換性の確認: 最終設計の確認

◆ 最適表面処理方法(レシピ)を確認

### WPP-1: 空洞処理の流れ

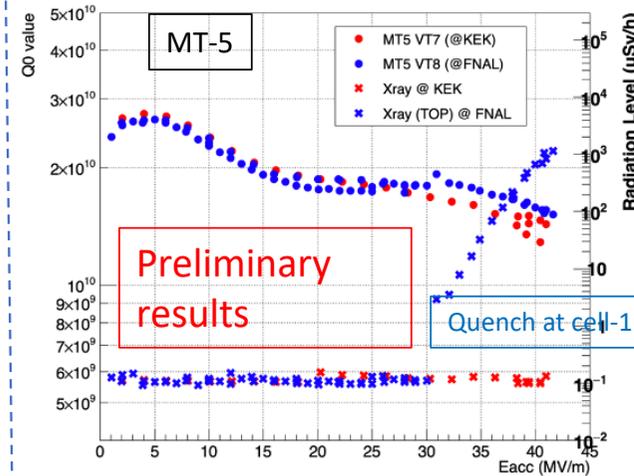


6台をモジュール組込に、  
残りをコストダウン評価に活用

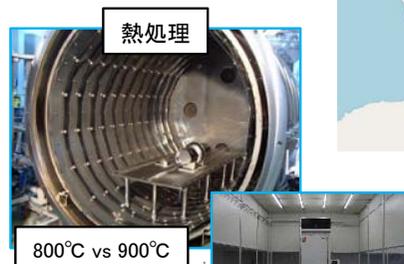
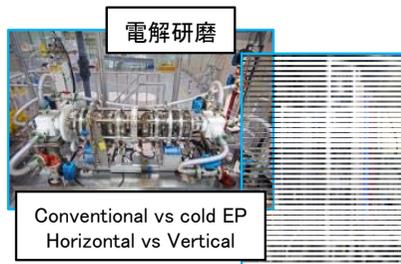
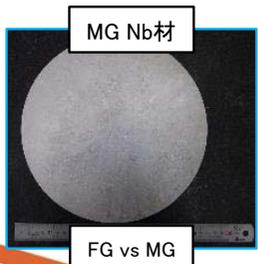
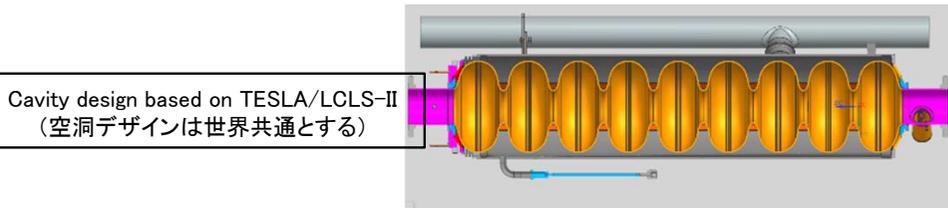


日米欧各領域から空洞を持ち寄り、  
一つのモジュールに入れて試験を行う

2段階ベーキングを適用した  
Fine grain 9セル空洞で  
40MV/m以上の性能を達成



- $Eacc = 41 \text{ MV/m}$
- $Q_0 = 1.5e10 @ 35 \text{ MV/m}$
- 空洞性能は、FNALでもクロスチェックされた。
- FNALとの共同研究も進行中。
- 次にFNALの設備を使って、2段階ベーキングを試みる。



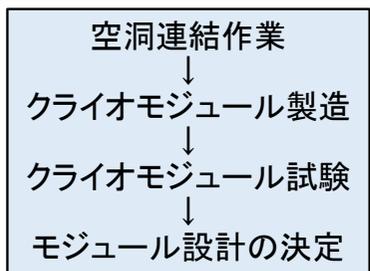
ILCに最適な量産法が確認される

# WPP-2: クライオモジュール組立・試験・設計決定 under ITN

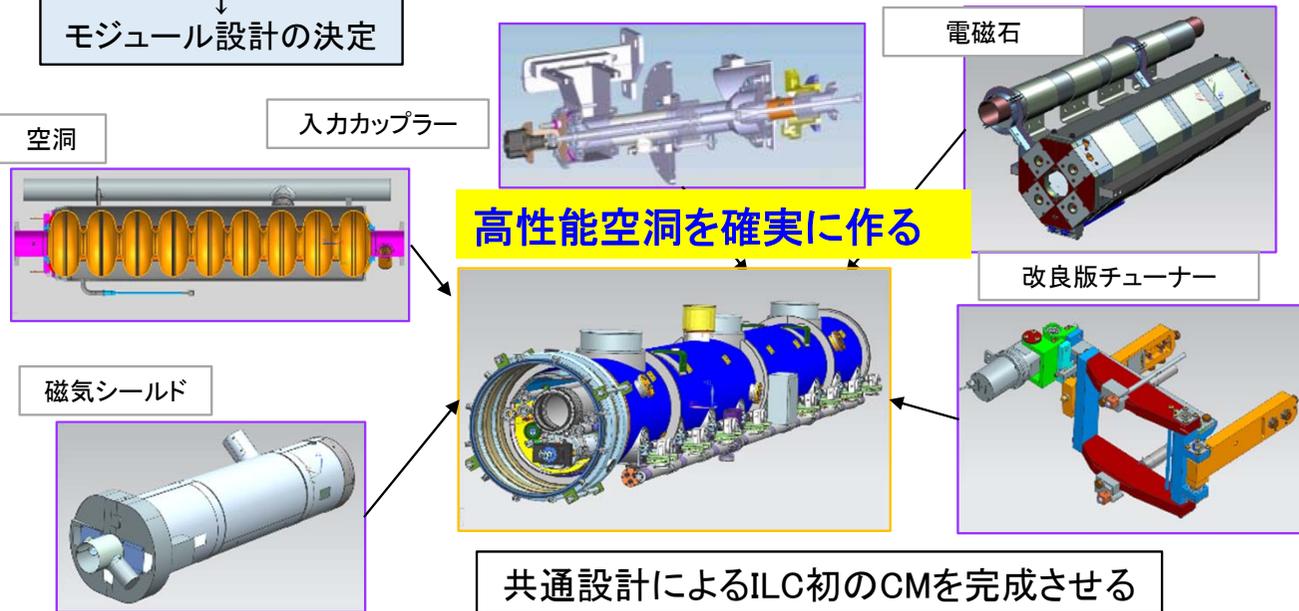
超伝導高周波技術は同タイプの空洞を利用しているEuropean XFELの運用中で成熟してきている。空洞を収納するクライオモジュールの組立・試験を行う。一部は海外から持ち込まれた空洞も使用する。



## WPP-2: CM製造・試験の流れ



- ◆ 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

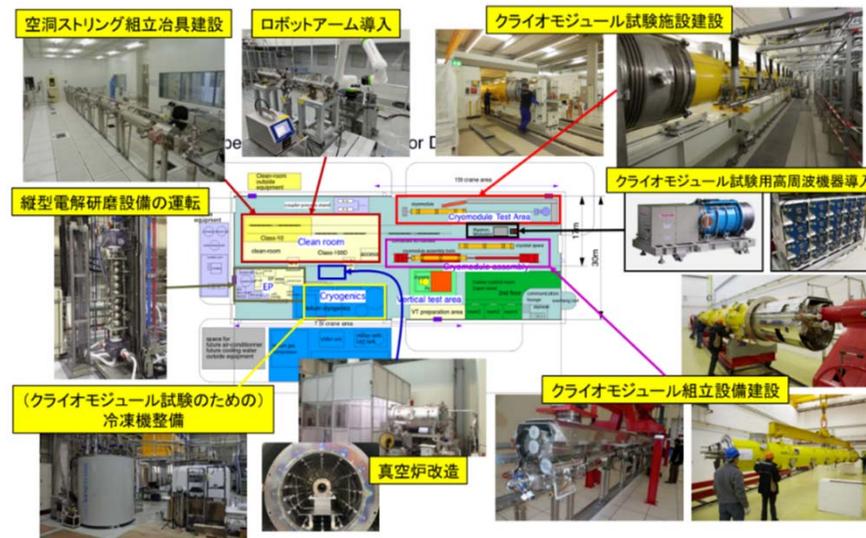


TDR以降の設計変更については、このモジュール試験の結果を見てから判断。

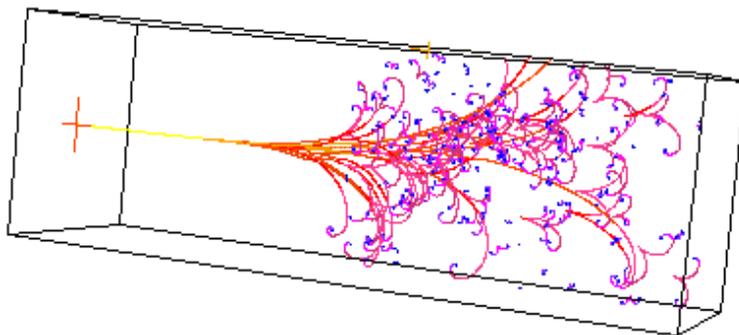
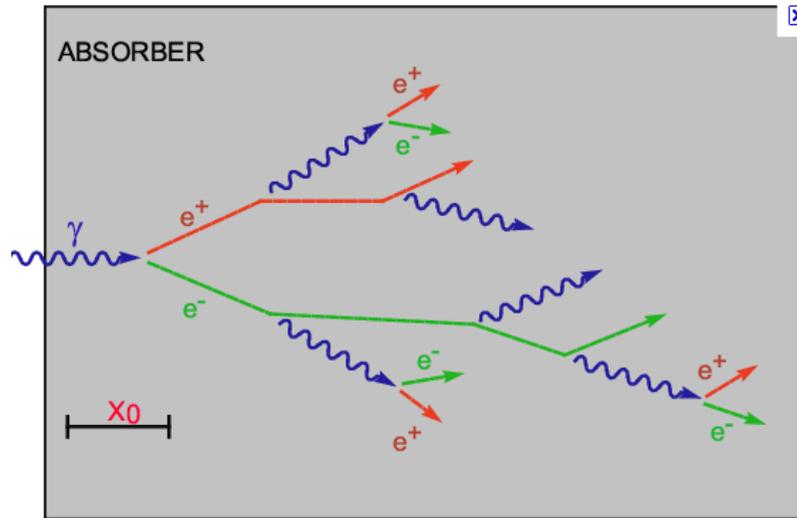
- ①チューナー
- ②カレントリードポート

(25.Jan.28)

## 2023年度 COI棟で CMモジュールの開発を進めている。



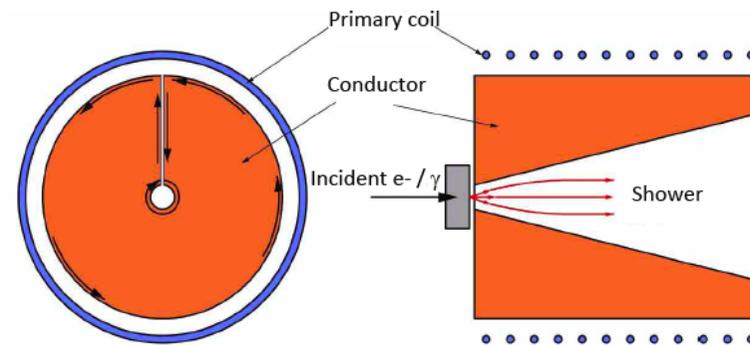
# ビーム源 (陽電子の場合)



高いエネルギーの電子または光子のビームをタングステン等の高密度の金属に照射し、電磁シャワーを起こさせる。



そのなかで発生する e+e- 対生成(エネルギー閾値 = 2 x 511keV) から陽電子を集める。

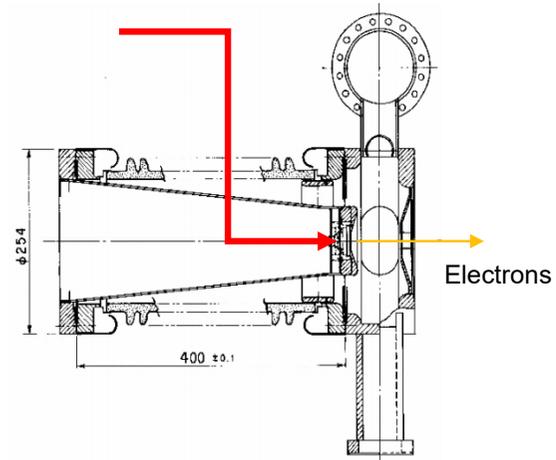
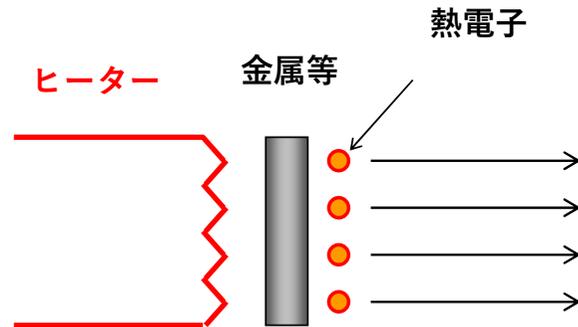


# 電子ビームを作る



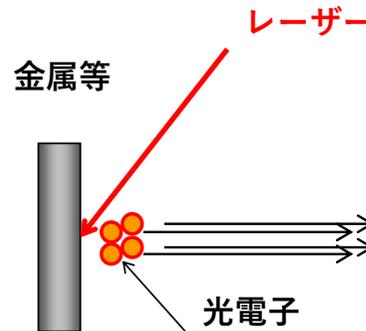
ヒーターで熱電子を放出させる カソード(負の高電圧をかけておく)を加熱して熱電子を得ることで電子源とする熱陰極電子銃

熱電子銃

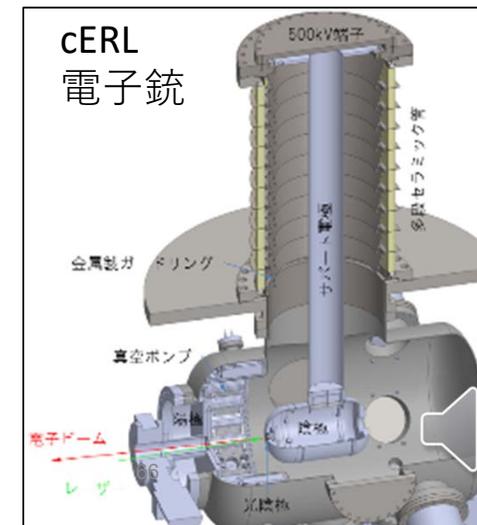


レーザーを当てて光電子を放出させる  
(近年こちらの方法で高輝度ビーム生成) 偏極可能

光陰極電子銃



京都大学 ILCセミナー (2025.Jan.28)



ILCの現在の方式