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)

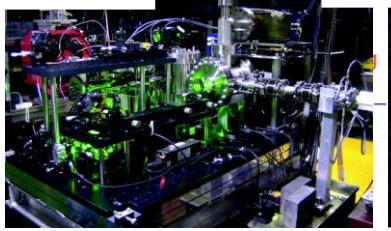
38 pages (目次など含む)
→最後は省く可能性あり。

ちょいちょい宣伝入ってます。ご了承ください。

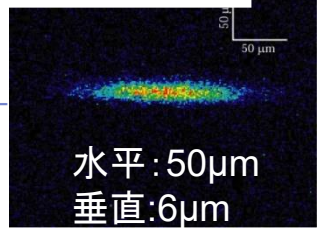
Innovation Center for Applied Superconducting Accelerators
応用超伝導加速器イノベーションセンター

私の研究歴について（簡単に自己紹介）

ATF Laser wire



ATF XSRモニター



- **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7μmの垂直ビームサイズ測定に成功。

cERL Main linac

- **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。

クリーン組立
STF cryomodule

- **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_3Sn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。

EURO-XFEL

- 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、さらに応用展開を実施中。

目次

- 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
- まとめ

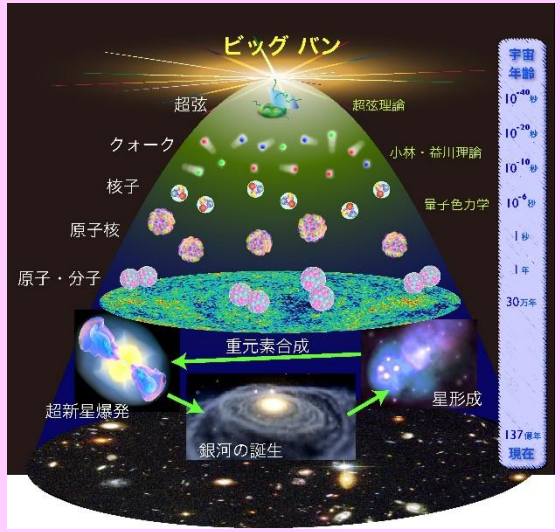
加速器を使って何をする。何ができるのか？

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）

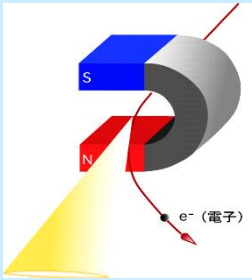
高エネルギー粒子を用いて生成されるＸ線や放射光で
→新物質構造解析やたんぱく質、細胞の構造解析。

粒子線治療などの医学応用

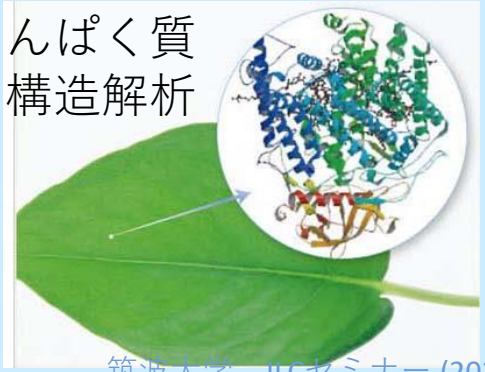
宇宙の起源・新粒子探索
（**素粒子実験**）



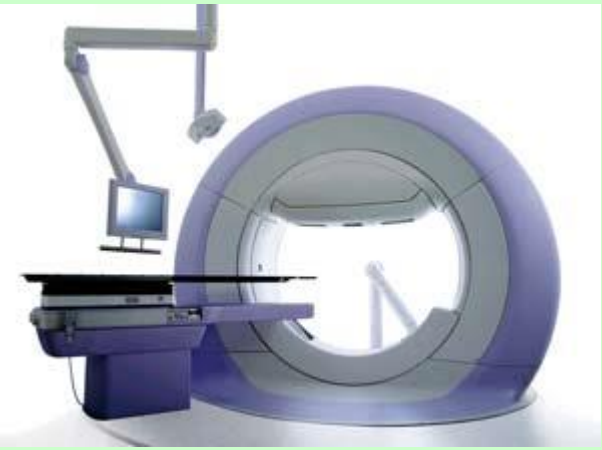
放射光



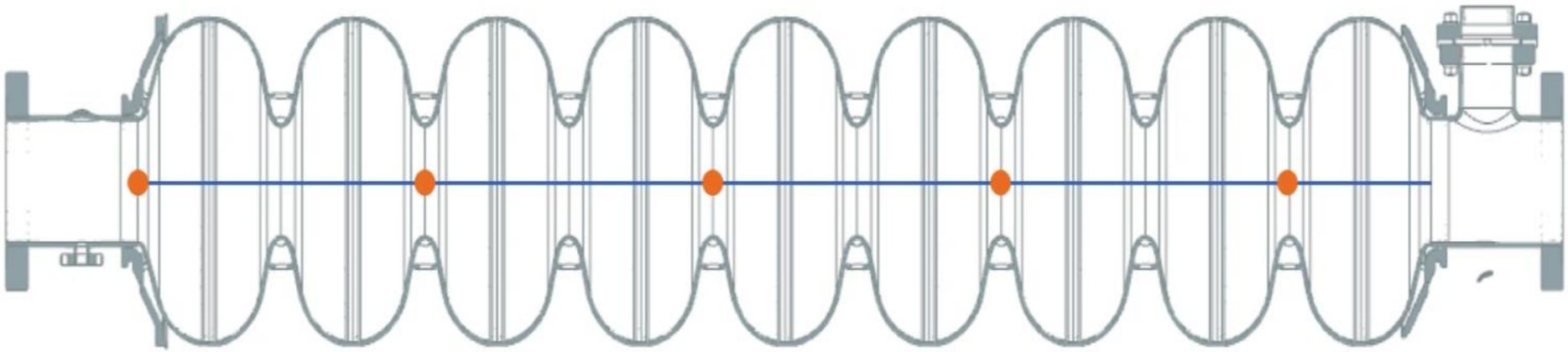
たんぱく質の構造解析



医療用加速器PET用の薬剤
ガン治療用陽子線加速器など

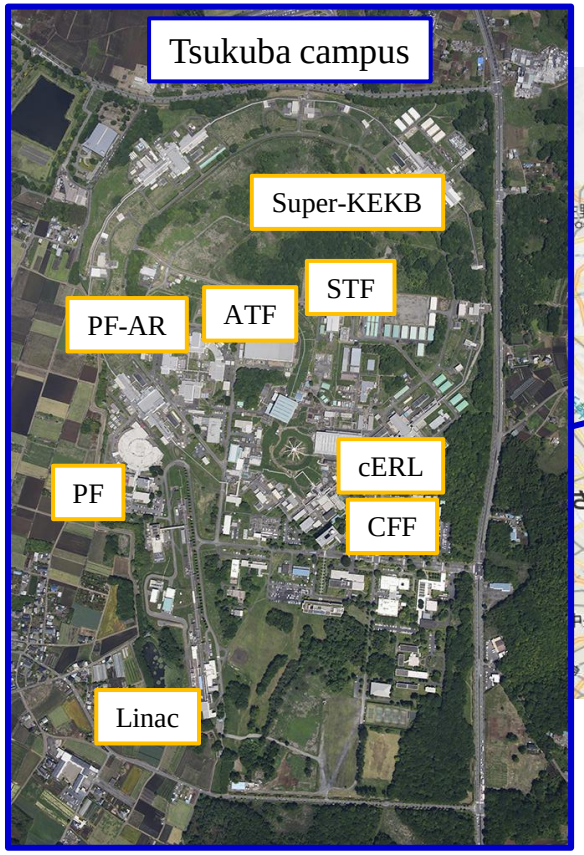


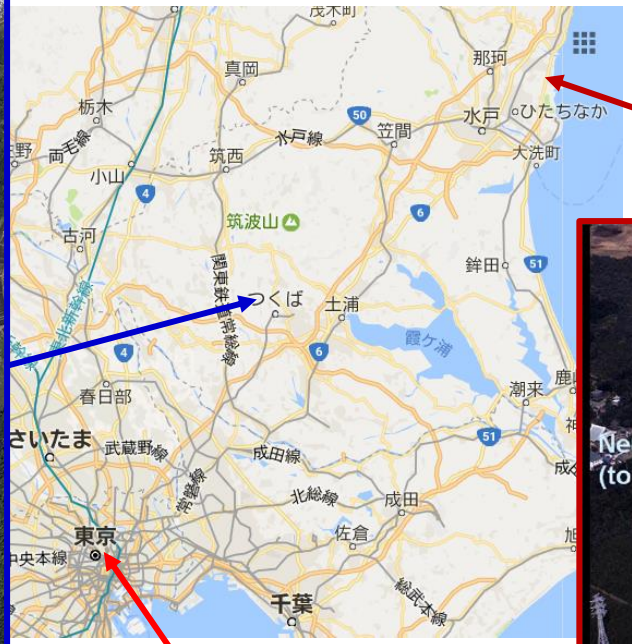
ビームの加速

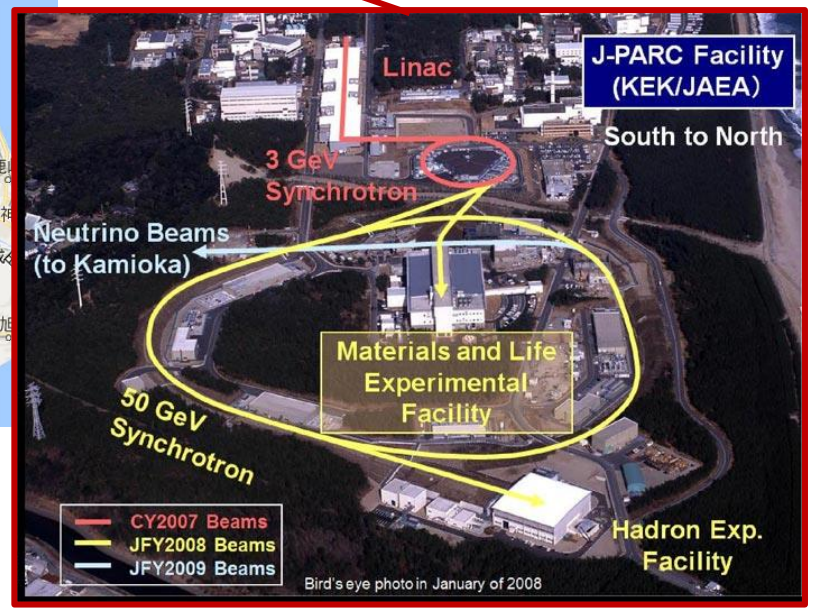


KEK–高エネルギー加速器研究機構–

応用超伝導加速器イノベーションセンター



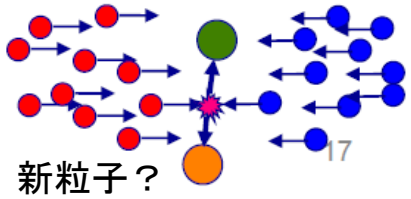




東京ディズニーリゾートと同じ大きさ

高エネルギー加速器(Collider)

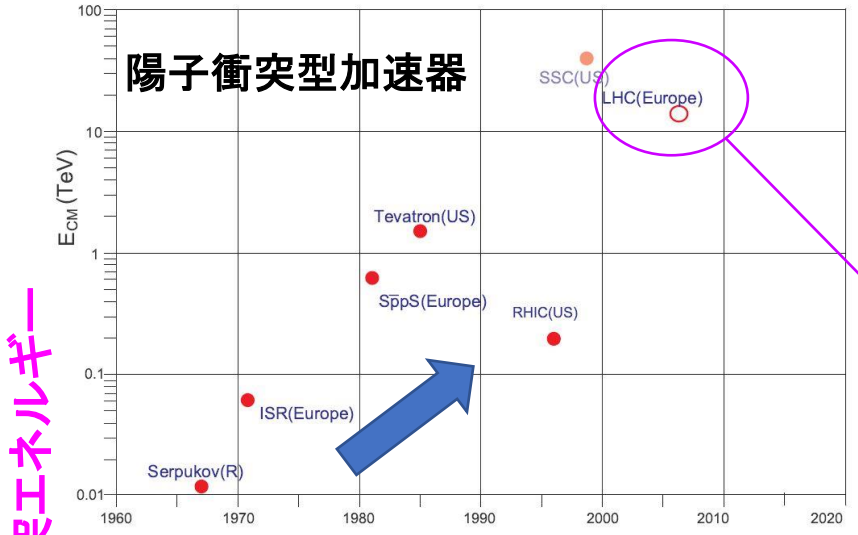
電子e-　　陽電子e+



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。

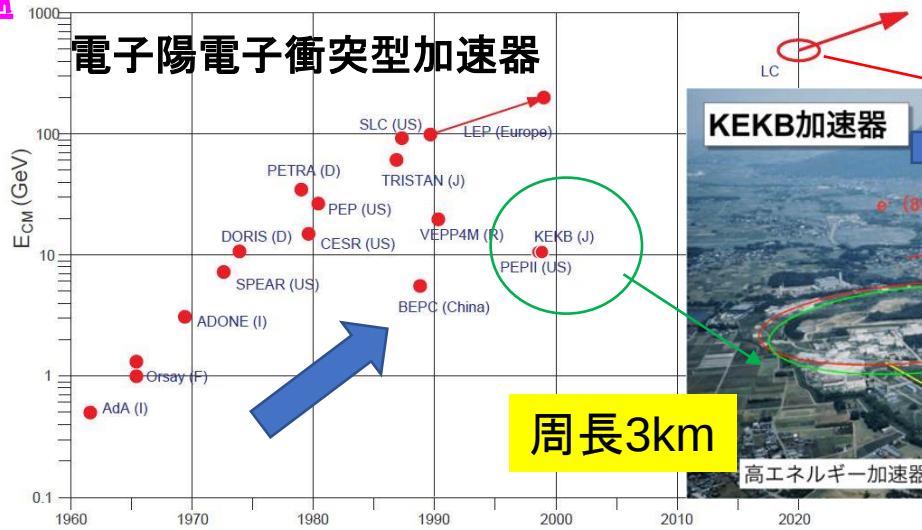
高エネルギーで衝突頻度を上げたい。

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

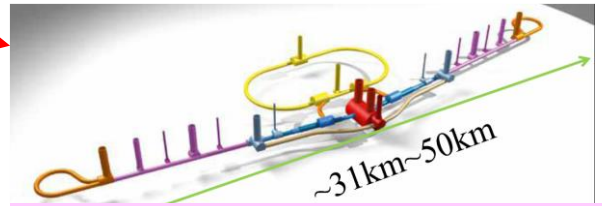


ノーベル物理学賞：
2008年：小林益川理論の証明
クォークが3世代以上。
(KEKB加速器が実験で証明)
2013年：LHC加速器でHiggs粒子発見。

LHC: CERN(ジュネーブ)周長27km



周長3km



(将来)Linear collider (LC)

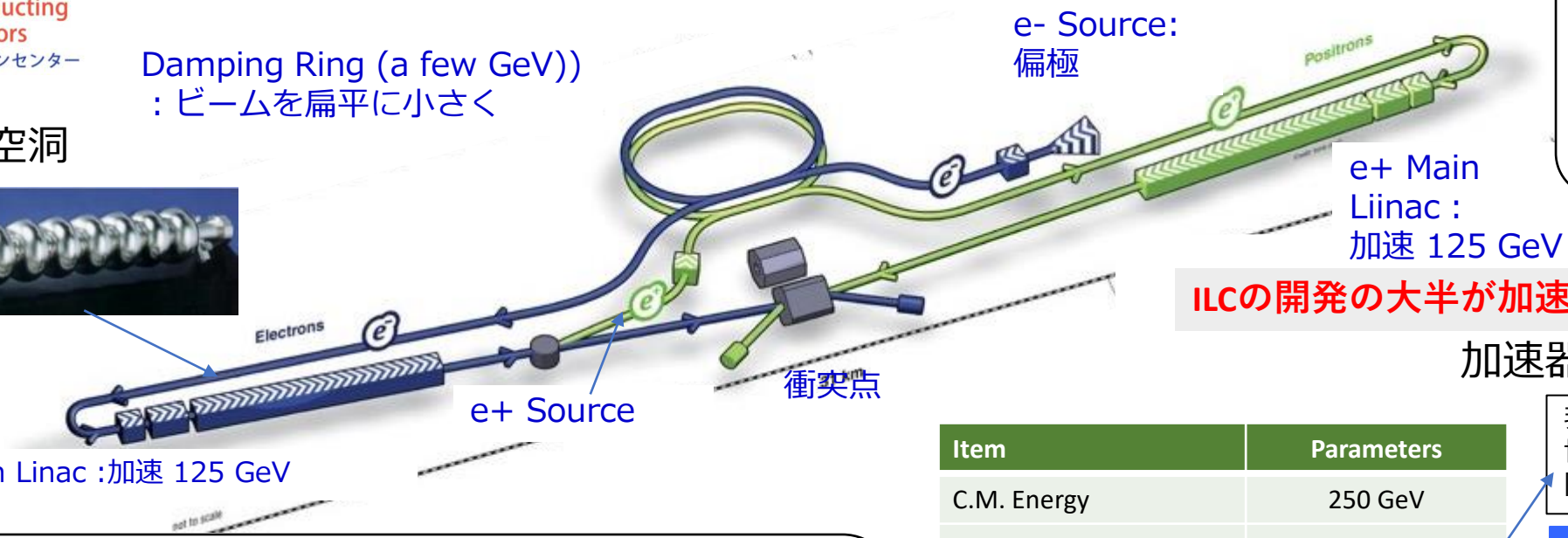
LHCでは超伝導電磁石を
KEKB,LCでは超伝導空洞を使用。

ILC 加速器の概要

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

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



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 x10^{34} $cm^{-2}s^{-1}$
Beam Current	5.8 mA (in pulse)
Beam size (x/y) at FF	**516** nm/**7.7** nm
SRF Cavity G. Q_0	**31.5** MV/m Q_0 = 1x10 ^{10}
Total 電力	111 MW

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。

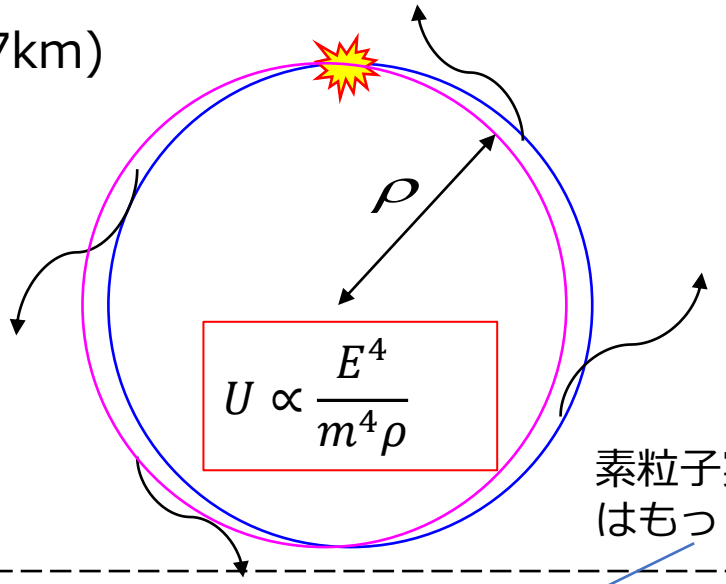
ビームのぶつかる頻度を表す。これが大きいと新しい粒子が発見されやすい

- 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）。

（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？

U:放射光によるEnergy loss

LHC (周長27km)
ρ=4.3km



$$U \propto \frac{E^4}{m^4 \rho}$$

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

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

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）

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

For FCCee ZH operation (125 GeV, 26.7 mA)

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

Power loss

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

～100MWもの放射光ロスを補う必要あり。

Ref: FCC week 2024, F.Zimmermann : FCC Accelerators status

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)

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

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。

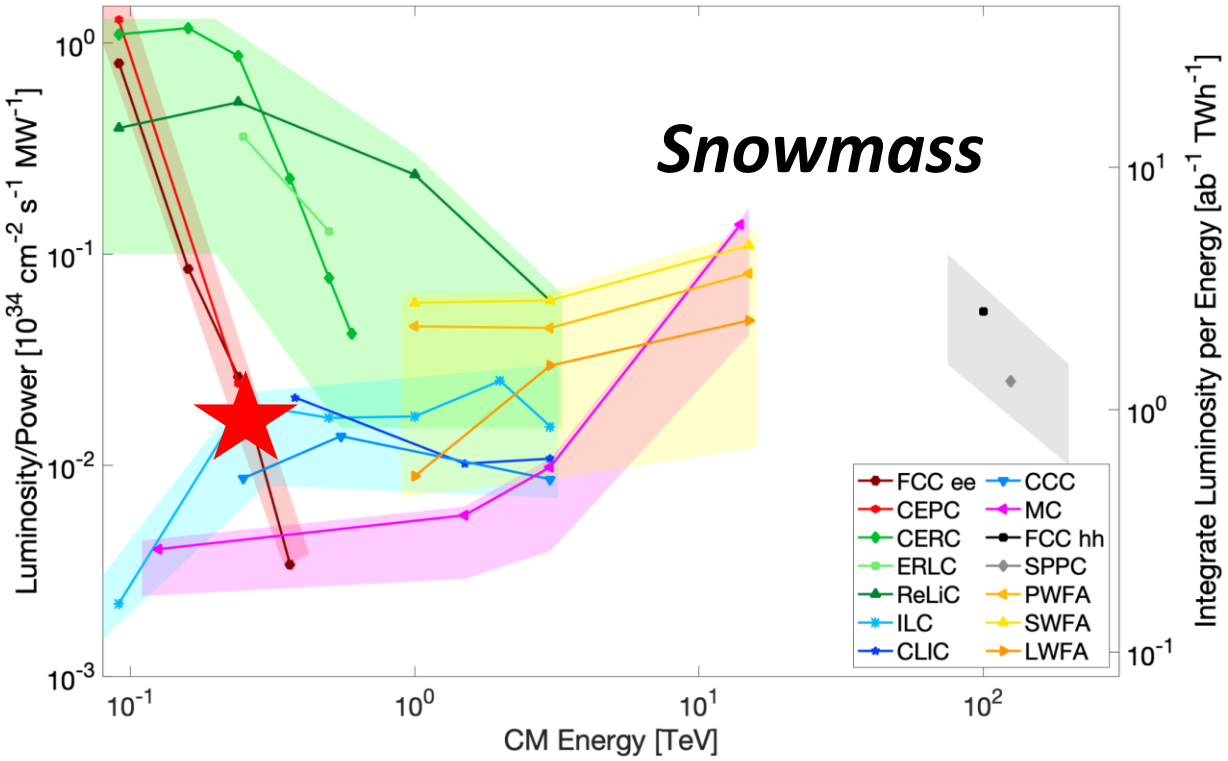
Compare ILC and FCCee (and others…)

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

A. Miyazaki, LCWS2024 pre-school

	ILC	FCCee ZH
$\mathcal{L}$ [$\mathrm{cm^{-2}s^{-1}}$]	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 meetingApril 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

(~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）

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

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）

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（WPP４つ）

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

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

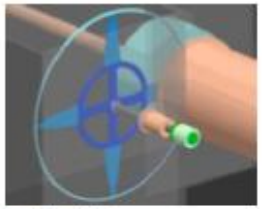
目標（モジュール）
8空洞入りモジュール
加速勾配：31.5MV/m
Q値：<1x10^{10}

WP−prime 1: 空洞量産実証

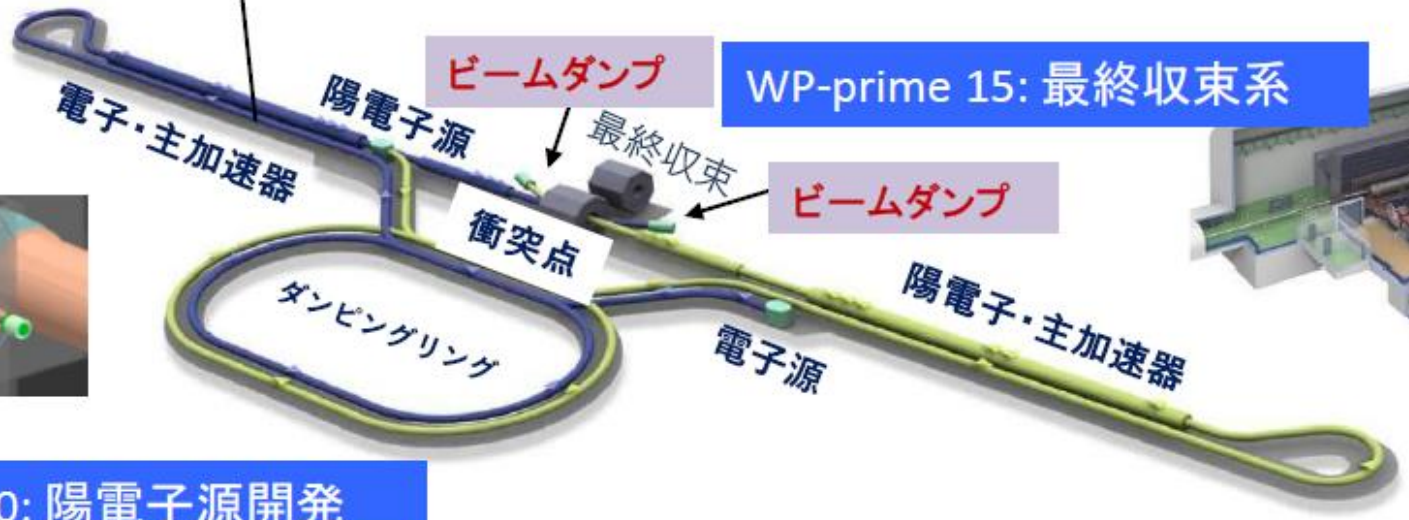
目標（空洞単体テスト）
冷凍機則に則った9セル空洞で
加速勾配：35MV/m
Q値：~1x10^{10}

陽電子開発

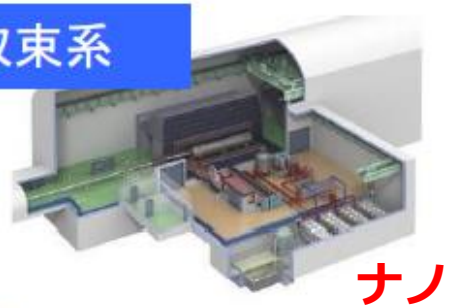
目標
SLCやS-KEKB
を超える大量の
陽電子生成技術
確立



陽電子源



WP-prime 15: 最終収束系



WP-prime 8〜10: 陽電子源開発

ナノビーム開発

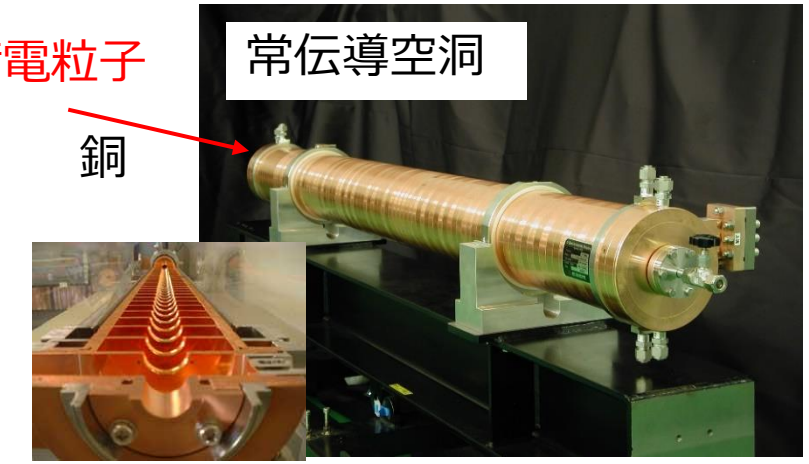
目標：
ATF-FFで垂直方向
37nmを安定にkeep。

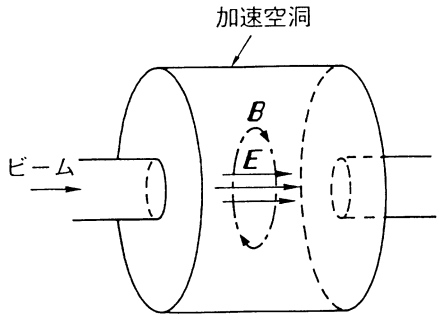
①超伝導加速空洞の魅力とILCの超伝導空洞開発

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

荷電粒子

銅





E: 加速電場
B: 磁場(壁電流)

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）

KEK鳥観図

CFF
空洞製作

STF
超伝導空洞開発

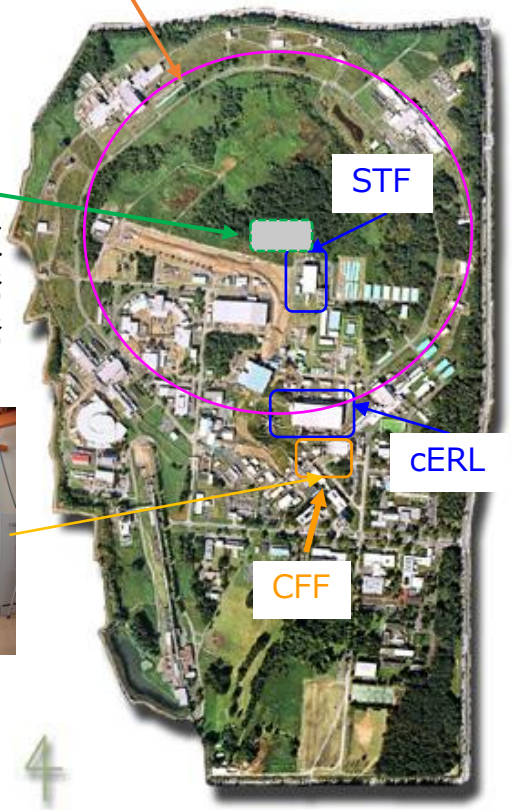
省電力でILCに必要な大電流で高エネルギーのビームの加速が可能。

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。

今までのKEKでの超伝導空洞開発

KEKつくばキャンパス



COI棟
真空炉等でhigh-Q開発
Nb3Sn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_3Sn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

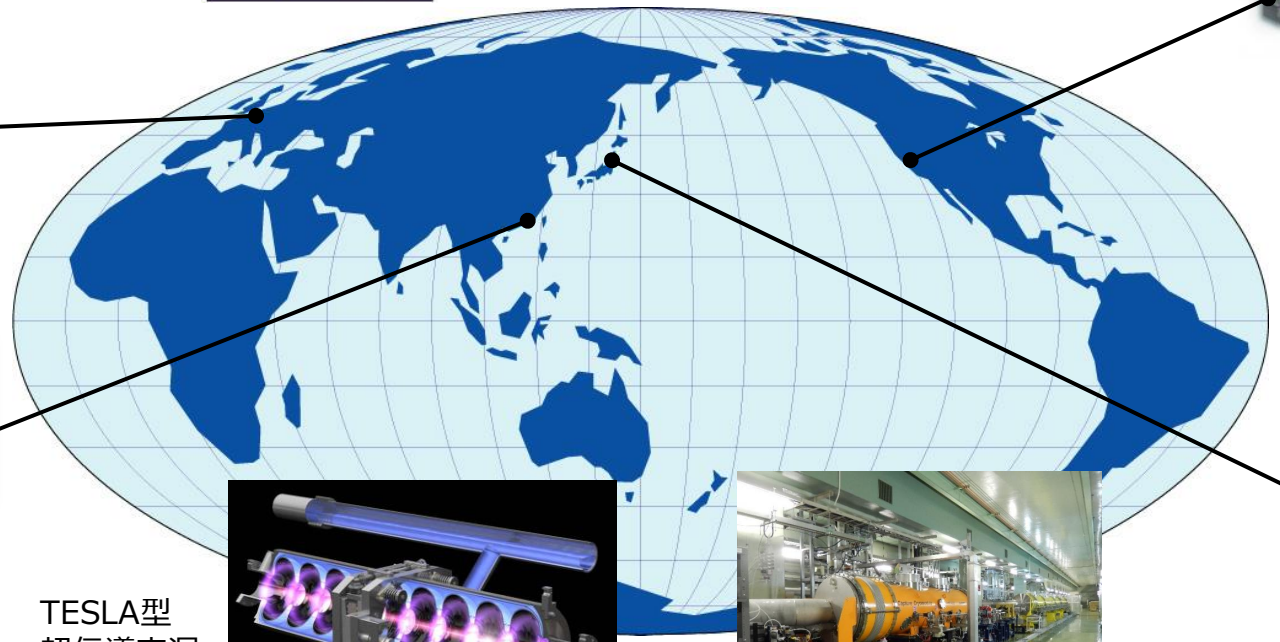
KEK は TRISTAN以来の長年の豊富な超伝導加速器の開発の経験を持っている。

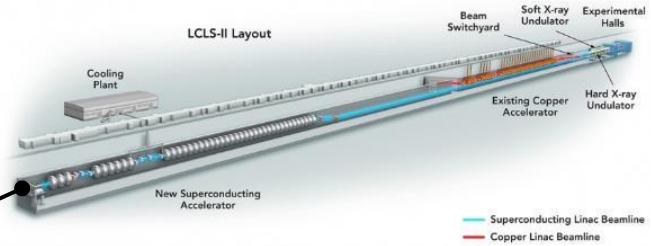
学術利用を主とした世界の大規模超伝導空洞加速器(XFEL & ILC)

European XFEL

EuXFEL (Germany,EU)

Operation started from 2017





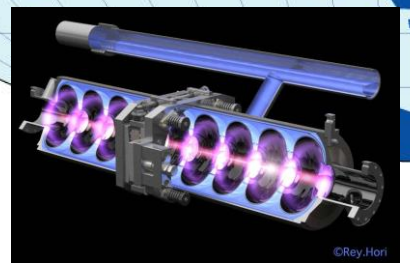
LCLS-II (U.S)

(beam operation 2022)

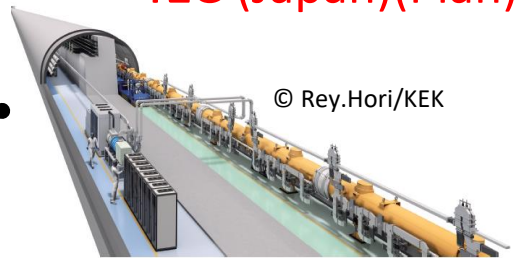
SHINE (China)

(under construction)

TESLA型
超伝導空洞



ILC (Japan)(Plan)



- 新たな窒素ドープ技術による超伝導空洞のhigh-Q化→世界的にhigh-duty (CW)加速器 (LCLS-II等)の建設が進む。
- さらに陽子・イオン加速器（日本ではIFMIF(青森)、RIBF(和光)）での超伝導空洞の応用も進んでいる。
- さらに高勾配・高Q値の加速空洞の開発やNbに代わる新たなNb_3Snなどの空洞開発も進んでいる。→今後のブレークスルー。

→ 超伝導空洞を利用した加速器建設が精力的に進んでいる。

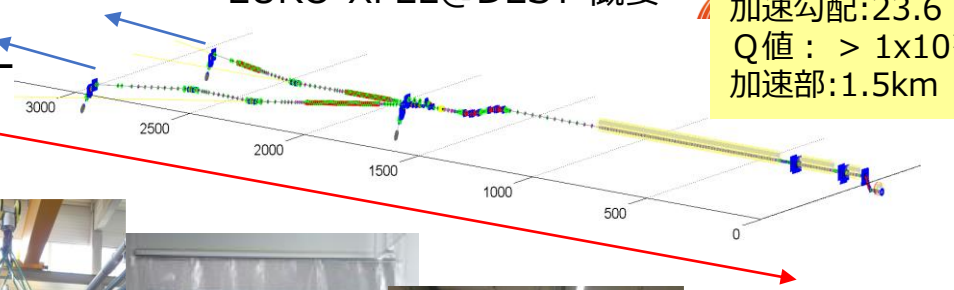
他のlow-betaなどの加速はbackup参照。

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

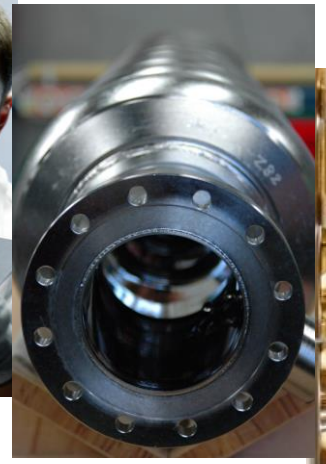
空洞:800台
加速勾配:23.6 MV/m
Q値： > 1×10^{10}
加速部:1.5km

XFEL



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-Sacley(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。

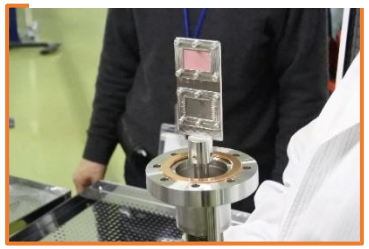
（いい溶接、いい表面処理、いい組立）

	N_{cavs}	Average	RMS
VT	815	28.3 MV/m	3.5
CM	815	27.5 MV/m	4.8

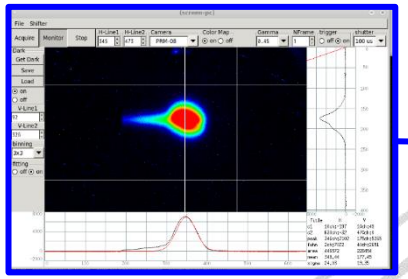
800空洞でCM量産化で27.5MV/m±4.8MV/mの空洞性能がE-XFELで出ている。

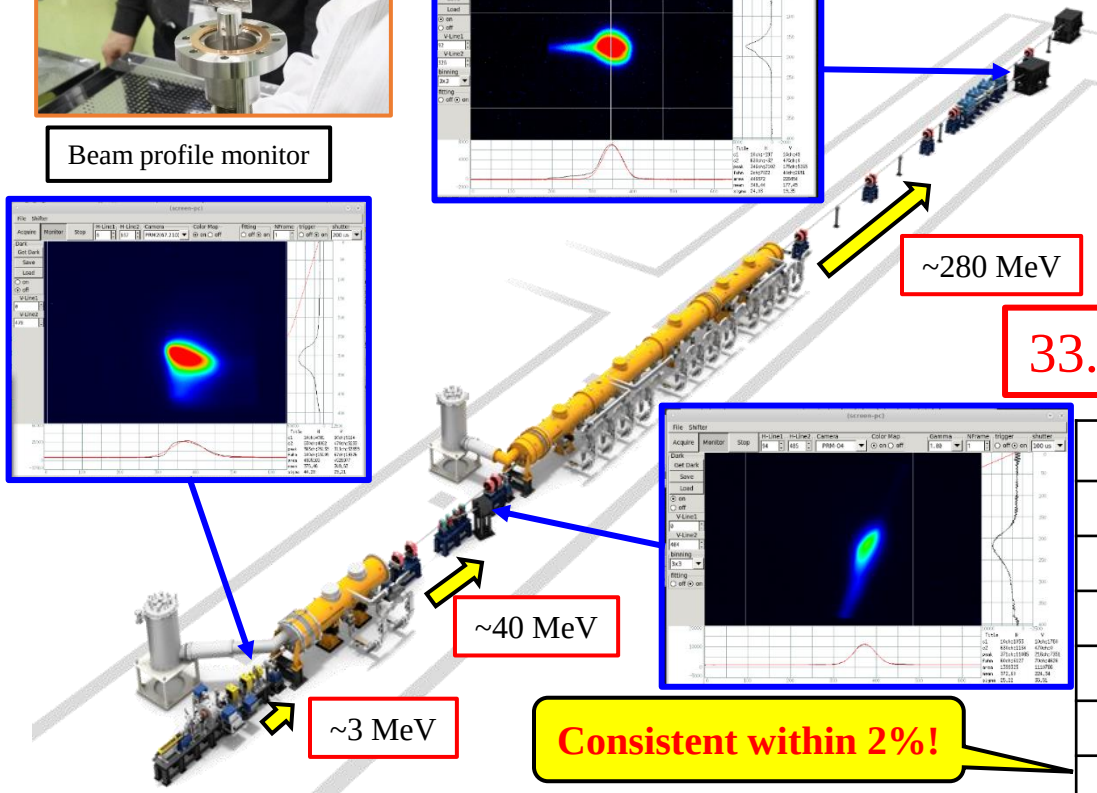
31.5MV/mのILCスペックにかなり肉薄。成熟がさらに必要。

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

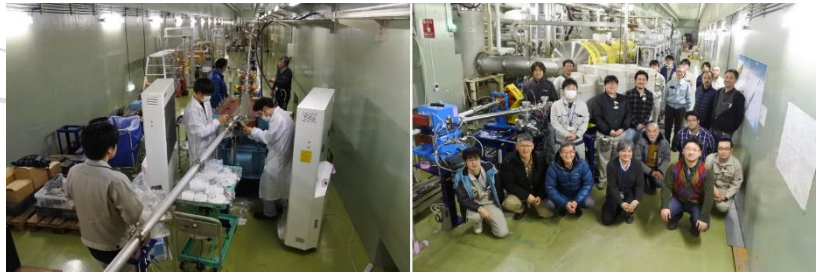


Beam profile monitor





2018年度ビームライン建設→2019年ビーム運転



空洞性能評価の終わった高性能の空洞を加速器室の現場でもゴミが入らないクリーンな組み立てを敢行。

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

Consistent within 2%!

M. Kurata, et al," High current, long-pulse operation at the KEK superconducting rf test facility" Phys. Rev. Accel. Beams 28, 021001

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。**

前述の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

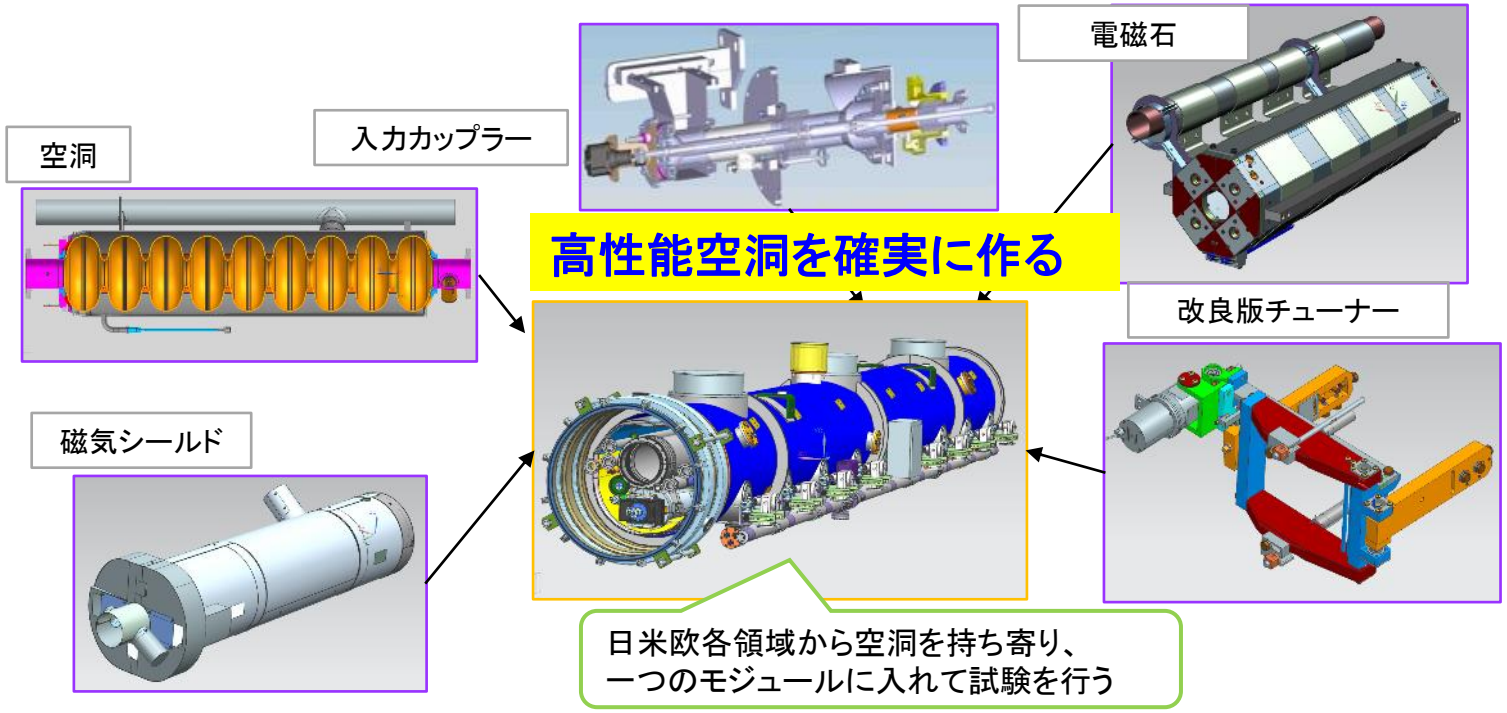
空洞製造
↓
表面処理
↓
性能試験・実証（含歩留評価）
↓
（WPP-2: モジュール組込）

WPP-2: CM製造・試験の流れ

空洞連結作業
↓
クライオモジュール製造
↓
クライオモジュール試験
↓
モジュール設計の決定

◆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

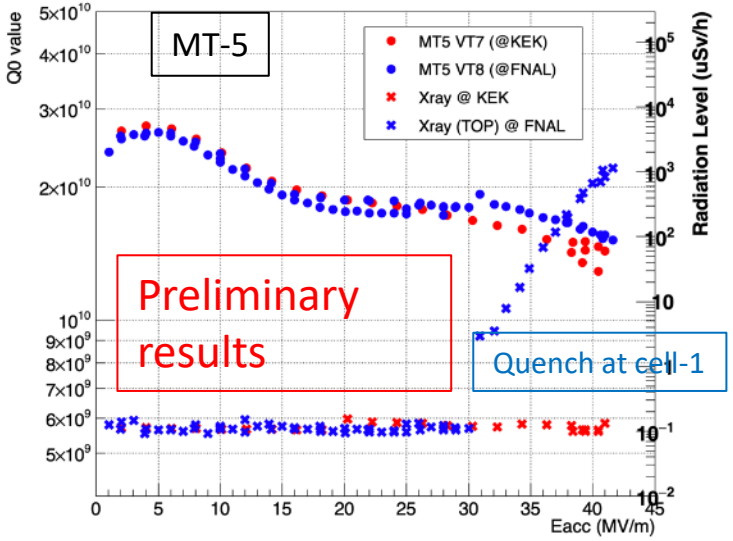
（最終確認事項）
◆ 付属部品（入力カップラー、チューナー、超伝導電磁石、磁気シールド材）実装
◆ 設計変更（Change request）の検討



共通設計によるILC初のCMを完成させる

2023年度～2024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



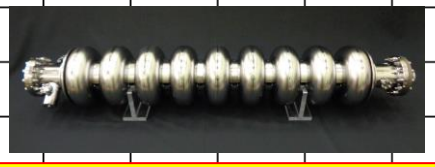
2025年度　COI棟で
CMモジュールの開発を進めている。

ITN 5yeas plan (FY2023～2027)(超伝導空洞の成果全体) MEXT5か年補助金

黄色の赤枠が2023年度～2024年度の成果

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

		JFY2023				JFY2024				JFY2025				JFY2026				JFY2027			
		CY2023				CY2024				CY2025				CY2026				CY2027			CY2028
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
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																				

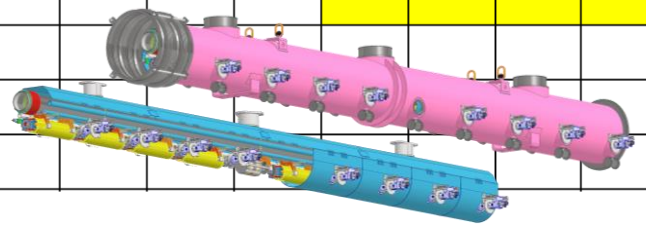


9cell 4 空洞 (2 MG and 2 FG) をKEKで製作中。

Clean Assembly by robot

(製作)Input coupler 4台

Tuner test with cavity

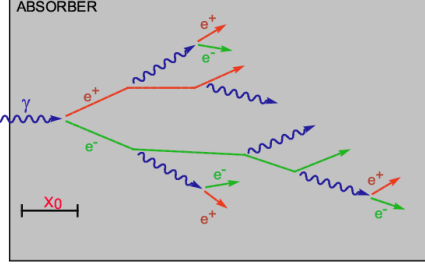


Cryomodule design for ITN
そして、COI棟の整備、(冷凍機、RF含む)

Goal: Perform high power cryomodule test Of 8 ILC cavities with <31.5 MV/m ave.

In 2027, we plan to complete ITN cryomodule

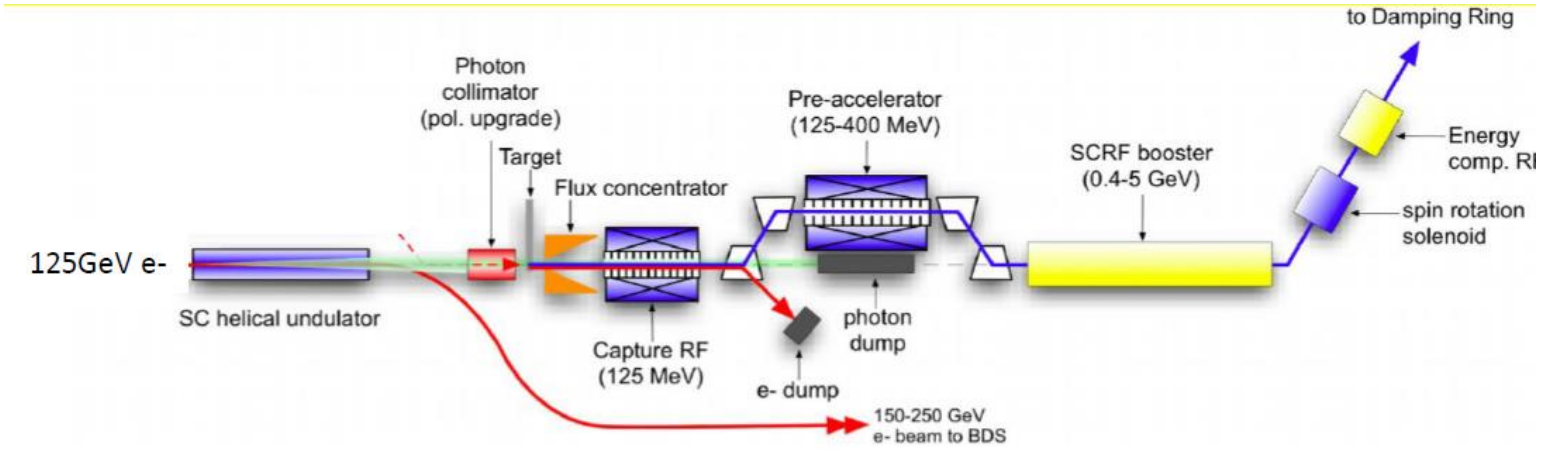
②陽電子源開発



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。

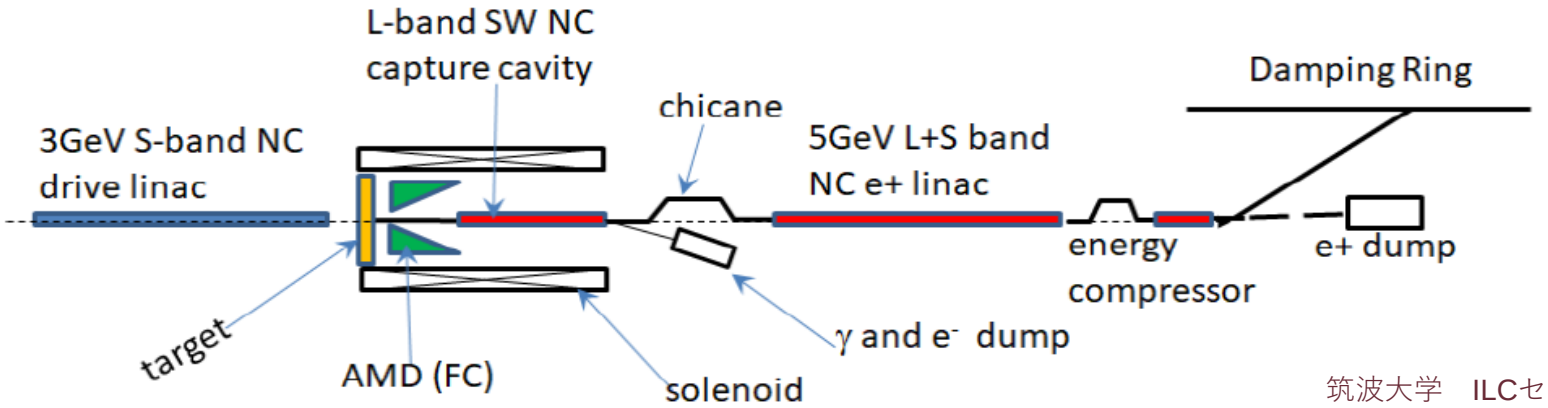
<u>アンジュレータ方式</u>：125GeVの電子をヘリカルアンジュレータに通し、発生したガンマ線をターゲットに当てて電子・陽電子対を生成させる。<u>偏極陽電子（30%）が得られる。</u>

国外中心で開発



<u>電子駆動方式</u>：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、<u>陽電子側のコミッショニングが電子側に左右されない。</u>

国内中心で開発



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。

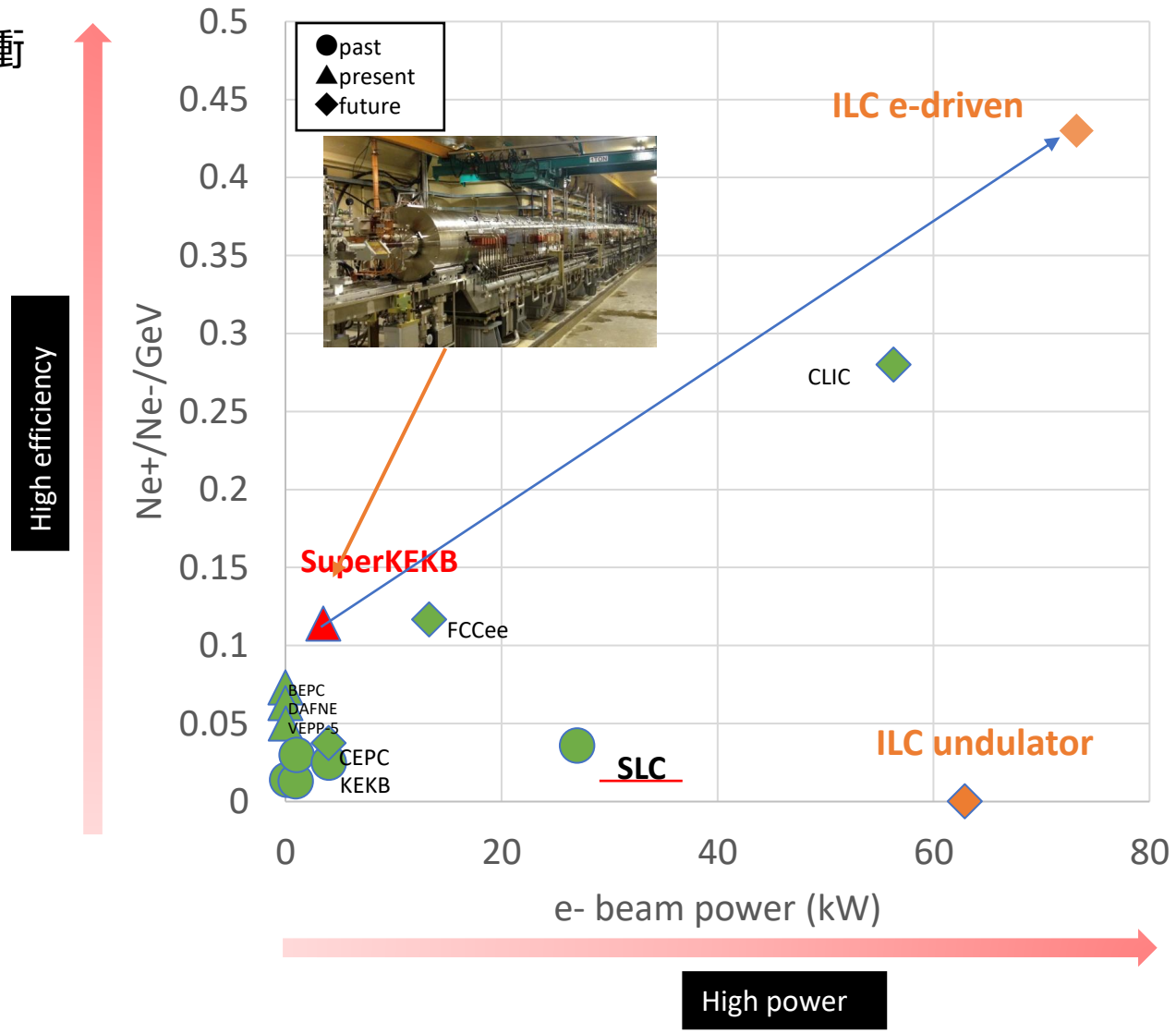
- SLCとのLuminosity ~x5000の差があり、主に
  - **バンチ数 x 繰返しで ~ x50 →粒子源開発**
  - **Vertical beam size ~ x80 → ナノビーム開発**

  これら2つが必要。

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

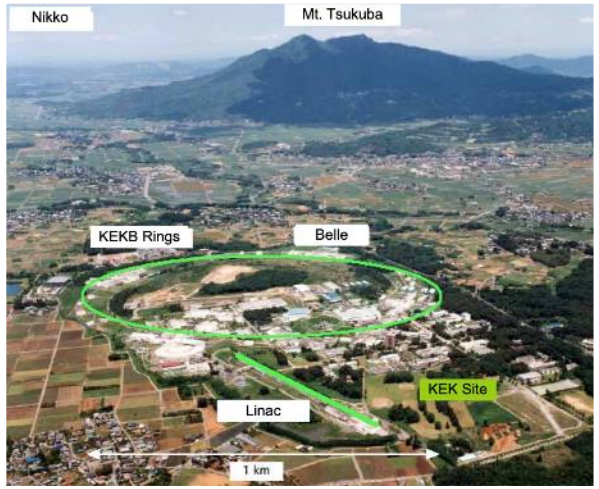
陽電子開発としては、
現在、世界最大の陽電子源であるSuper KEKBでの粒子生成の経験を活かし、 開発を行う（後述）が、さらにSuper KEKBよりも効率の良い陽電子源の開発が必要。

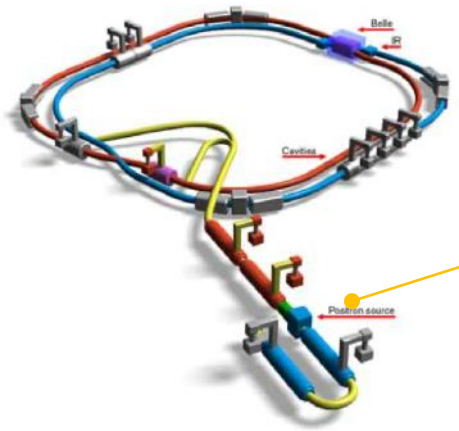
固定ターゲットから熱負荷が少ない**回転ターゲットへ**

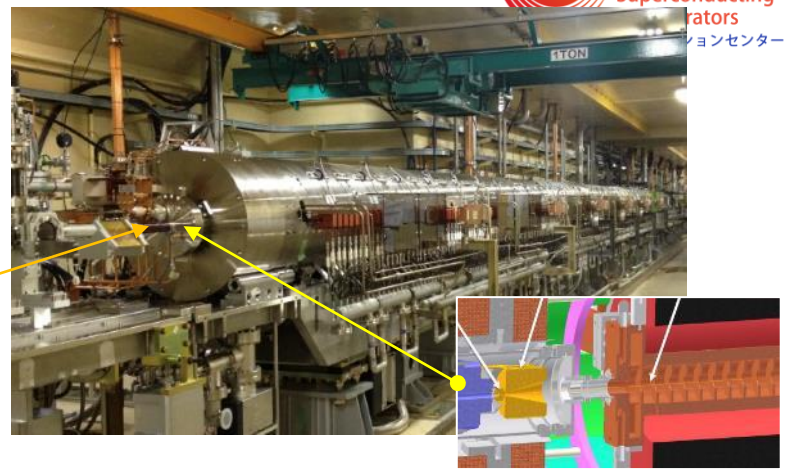


*Since it's not possible to evaluate Ne+/Ne for ILC(undulator), the value set to 0

WPP-8～11:　電子駆動型陽電子源

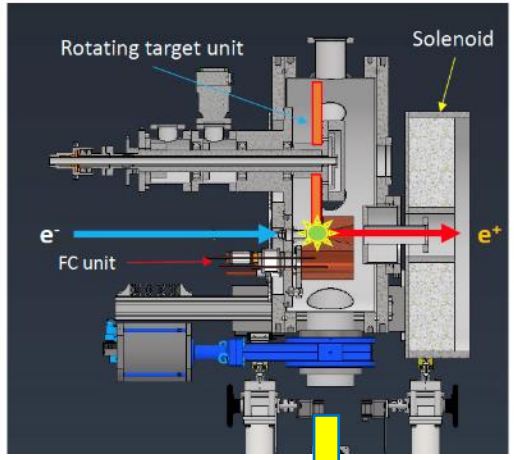


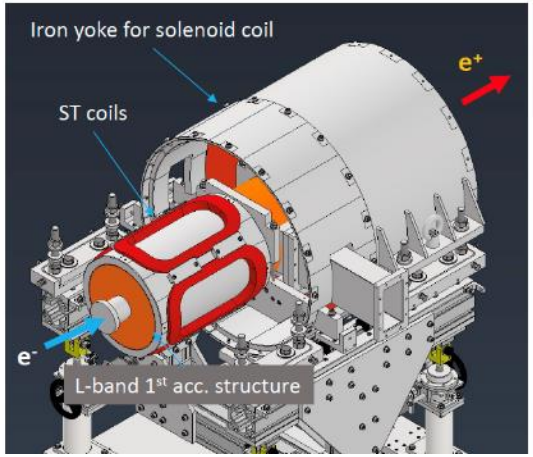


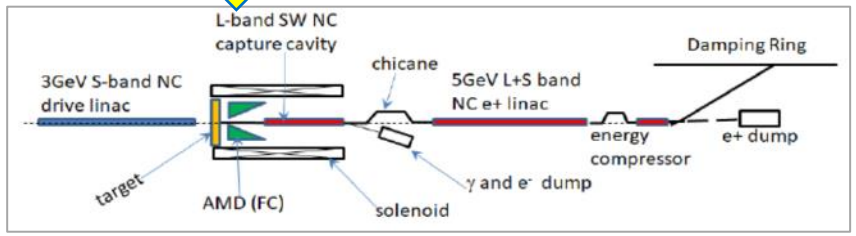


陽電子は**人工的に作る**必要があり、ターゲット（WPP-8）、磁気収束（フラックスコンセントレータ）（WPP-9）、陽電子捕獲空洞（WPP-10）が重要部品

- 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。



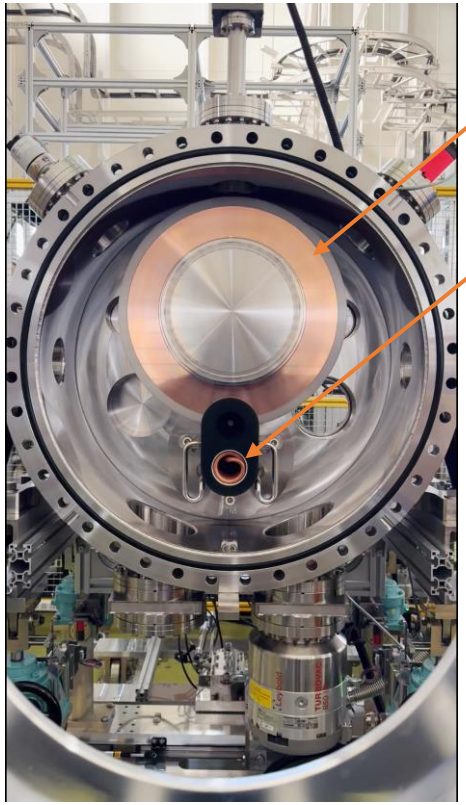




The latest development of positron source (in KEK)

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

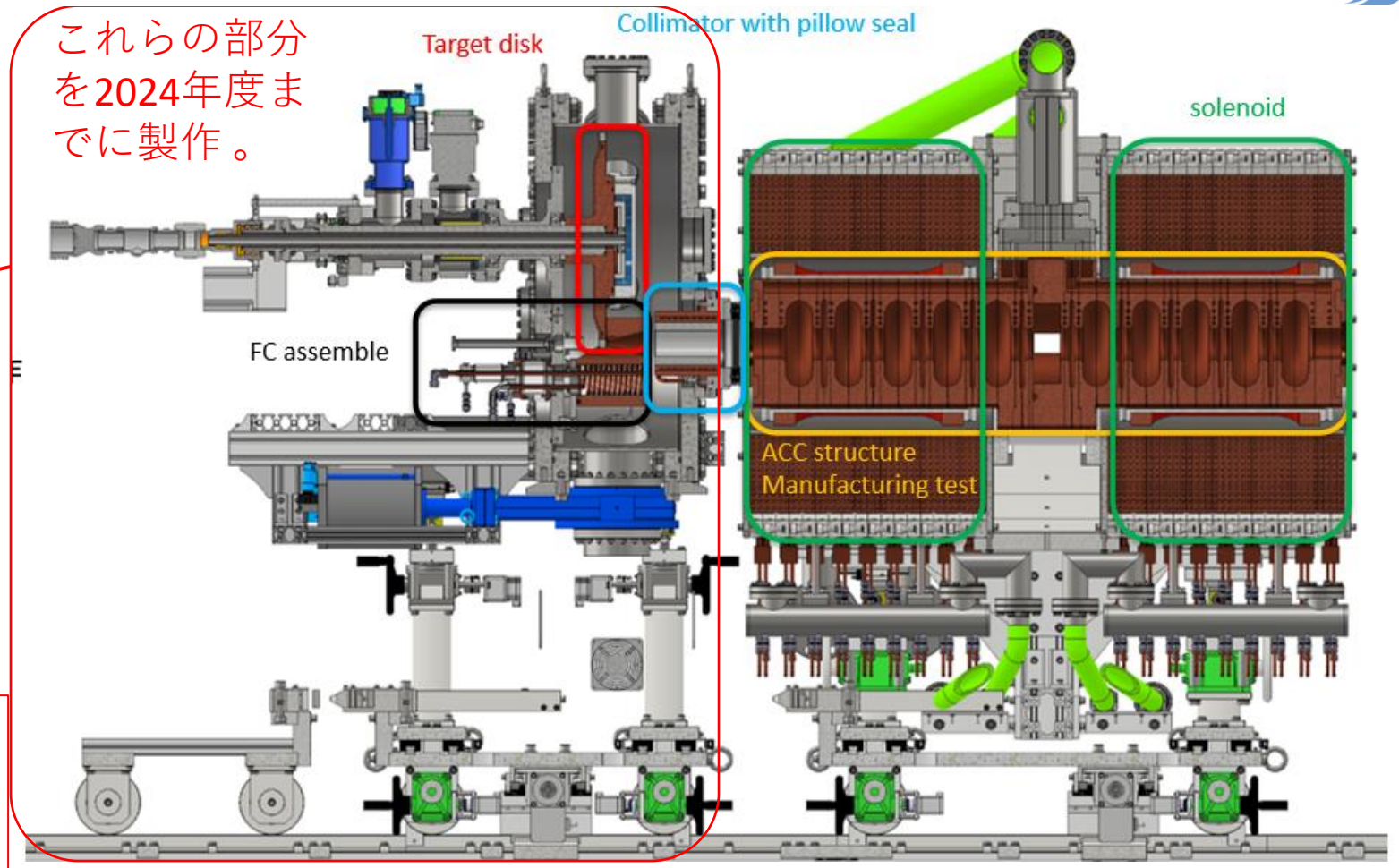


回転ターゲット

Flux concentrator (FC)

<u>陽電子生成に必要な200 r p m の回転数を冷却水を流して達成。</u>
真空度は **<u>10^-6 Pa level.</u>** で動作確認。

これらの部分を2024年度までに製作。



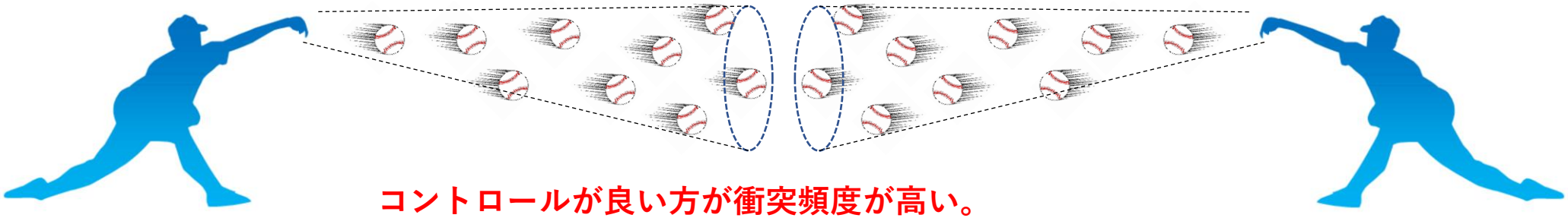
2024年度で陽電子テストのインフラ整備を進めた。**W-Cuのターゲット部**の冷やしはめテスト。加速管製作テスト、FCのinstall、などを進めた。

Movie

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

③ナノビーム開発

- ビームには沢山の粒子が詰まっている。その中の粒子同士をぶつける。
- 衝突イベントを作り出すためには、粒子を出来るだけ同じ場所に集める必要がある。

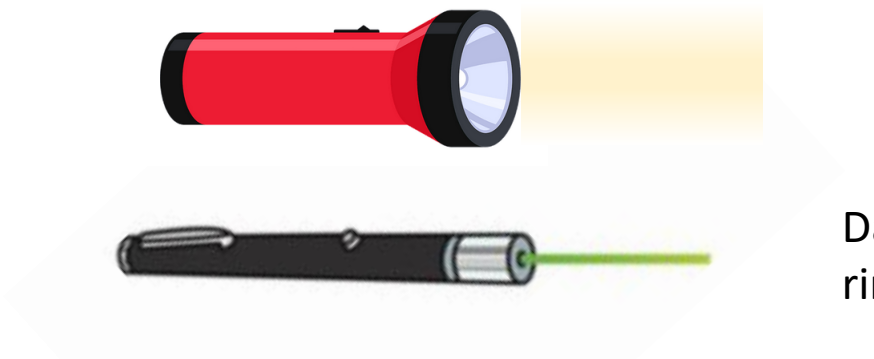


コントロールが良い方が衝突頻度が高い。

⇒コントロールが良いということは、加速器ではビームサイズが小さいことに相当

ビームサイズを小さくするために重要なことは？

1. 質の良い（平行性の良い）ビームを作る

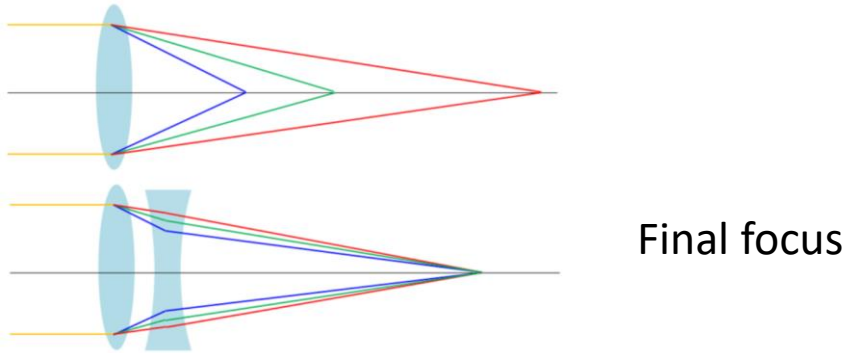


同じレンズを使って、懐中電灯の光とレーザーの光を絞った時、レーザーの方が小さく絞れる。

⇒レーザーの方が質が良い（平行性が良い）から。

⇒粒子ビームにも質の良し悪しがあり。質は良い方が良い。

2. 高性能な（収差の少ない）収束レンズを作る

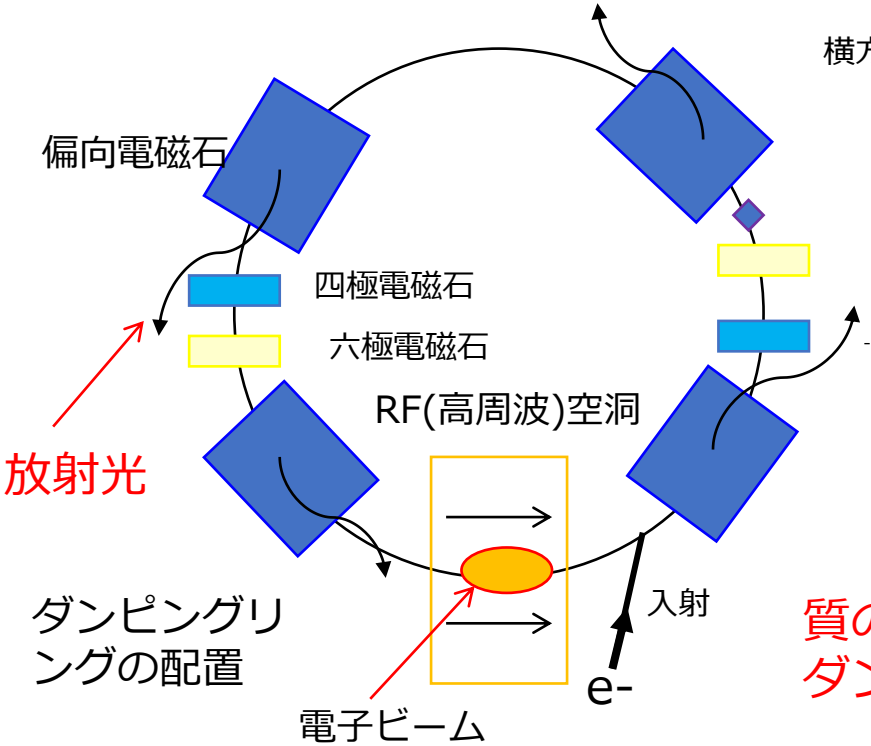


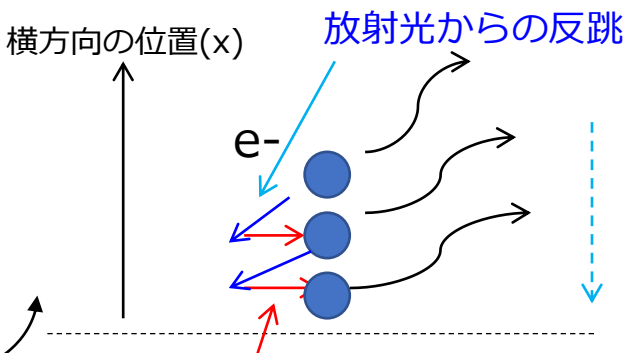
複数枚のレンズを組み合わせることで、色の違いなど性質の違う光が同じ場所に焦点を結ぶようにできる。

⇒粒子ビームでも、ビーム内のエネルギーなどの違った粒子たちを同じ位置に集められる。

③ナノビーム開発

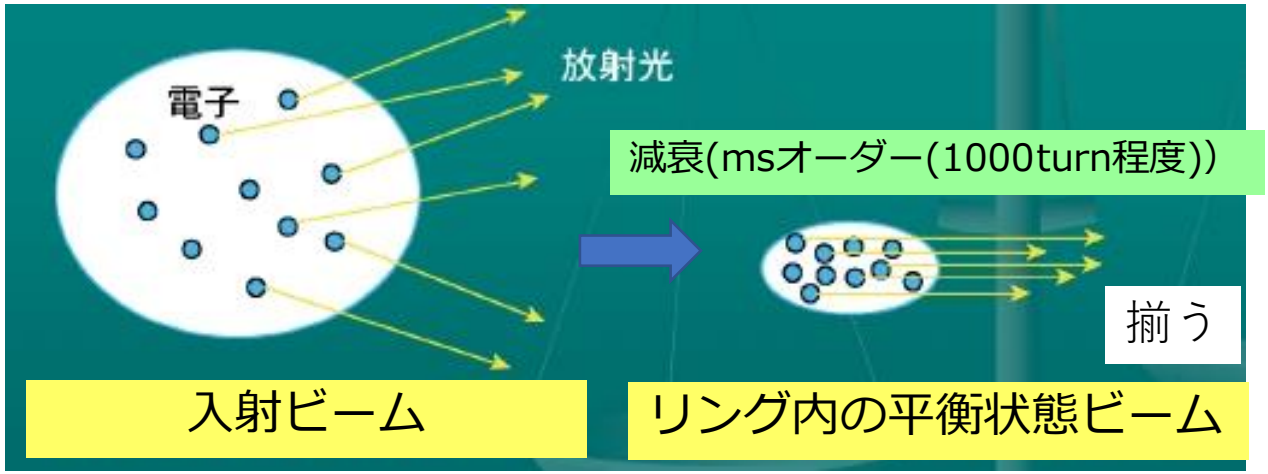
ダンピングリングの役割



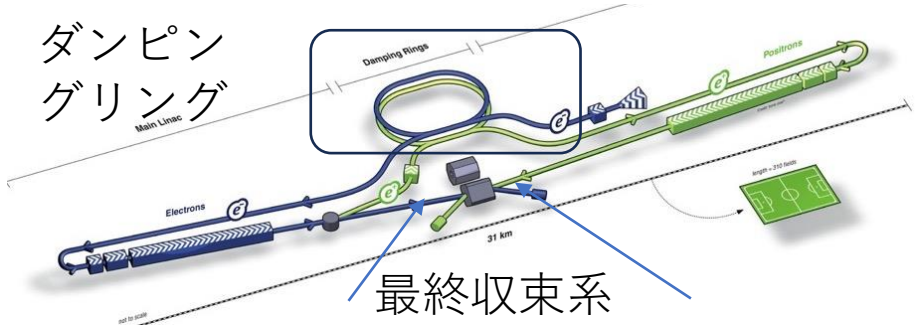


放射減衰によりビームの横方向の運動が揃ってくる。

質のいいビーム生成にはダンピングリングが必要。

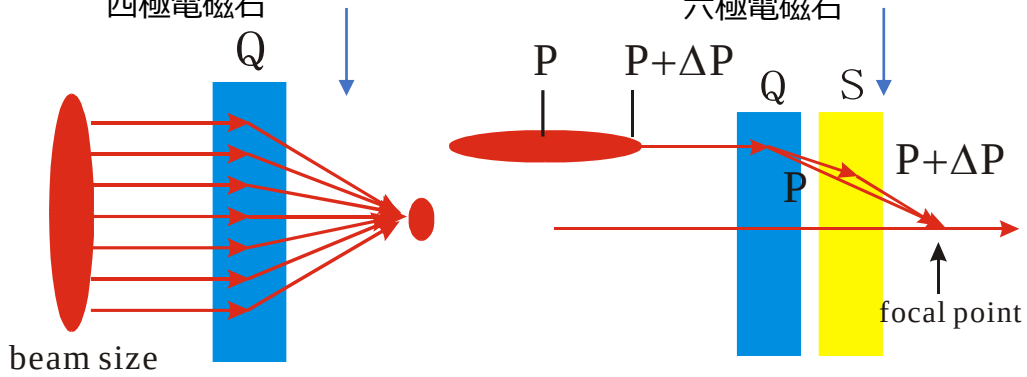


ダンピングリングで質のいいビームを作る
最後に質のいいビームによってナノビームに絞る。



四極電磁石

六極電磁石

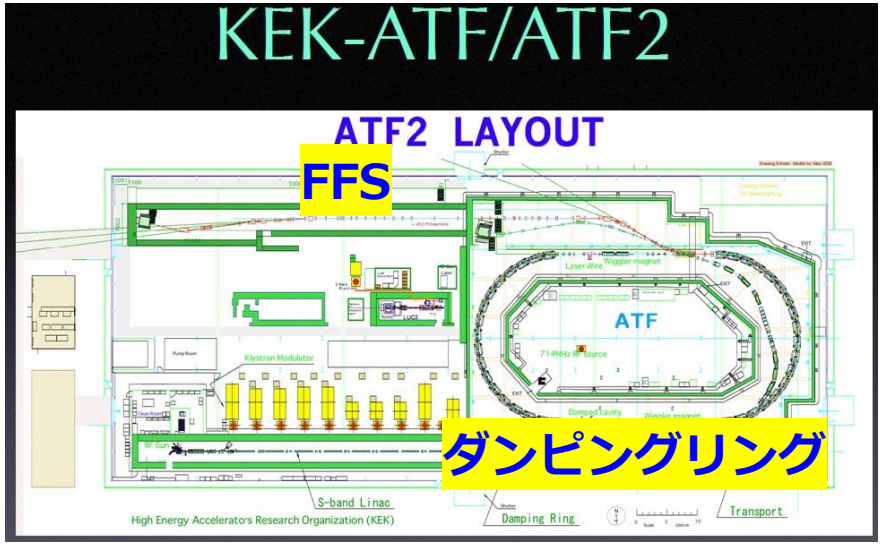


最後に、最終収束用の電磁石をきれいに並べ、衝突直前でさらに絞る。

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

K. Kubo

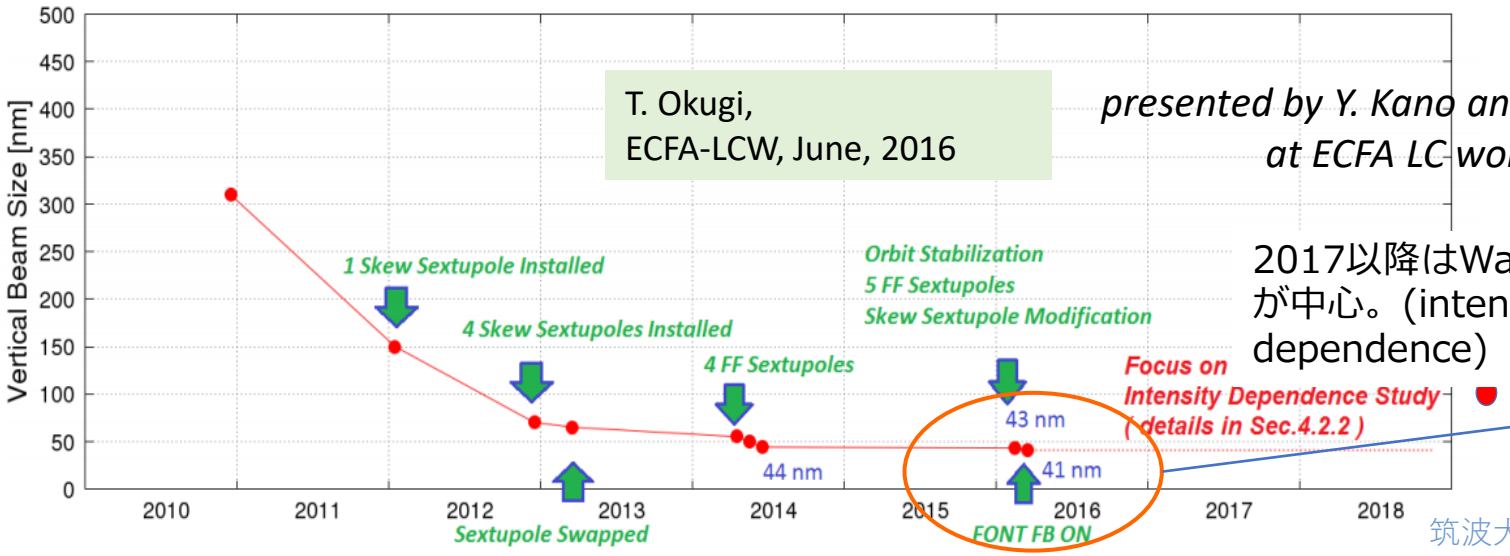


Goal 1:
Establish the ILC final focus method with same optics and comparable beamline tolerances (opticsの詳細設計と調整)

- 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)

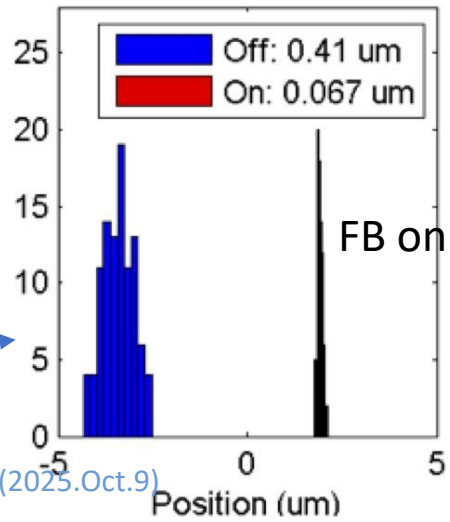


T. Okugi,
ECFA-LCW, June, 2016

presented by Y. Kano and T. Okugi at ECFA LC workshop 2016.

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

衝突点での安定性



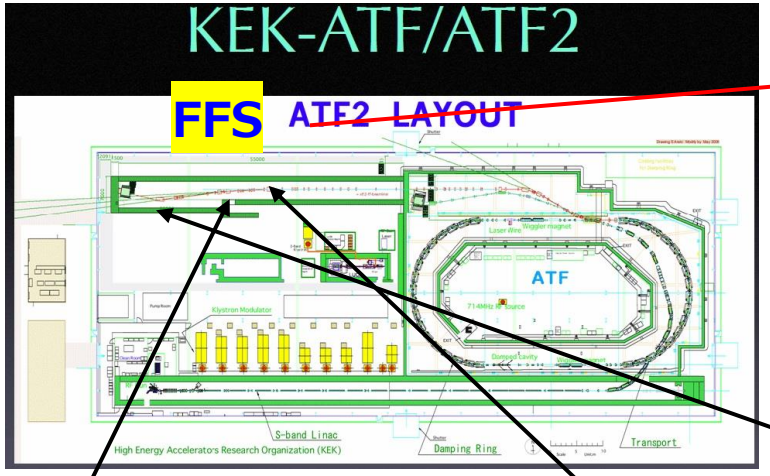
https://agenda.linearcollider.org/event/7371/contributions/38027/attachments/30831/46133/LCWS_FONT_presentation.pdf

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

WPP-15: 最終収束系 under ITN

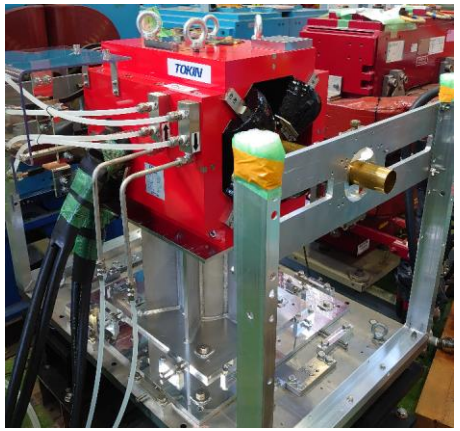
安定なナノビームを創る

1.28 GeV

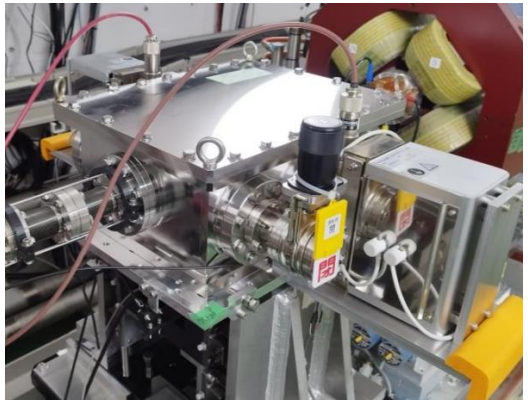


- ◆ ATF2ビームラインは、リニアコライダーの最終焦点システム（FFS）をテストするための**世界で唯一のテスト加速器**である。
- ◆ 以下の3つの研究テーマは、ATFで進めるべき重要なテーマである。
  - ◆ ウエークフィールド緩和
  - ◆ 高次収差の補正
  - ◆ ビームチューニング（**機械学習**）
- ◆ 今迄のナノビーム開発(IP測定、FONT)とさらにこれらをもとにした**ナノビーム(37nm)の生成と長期安定化**が最終目的。
- ◆ ATF2ビームラインでの技術研究は、**ATF国際コラボレーション**で進められている。
- ◆ 2023年度は14週運転。2024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

■ **ATF2 final focus magnet installed in beam line**

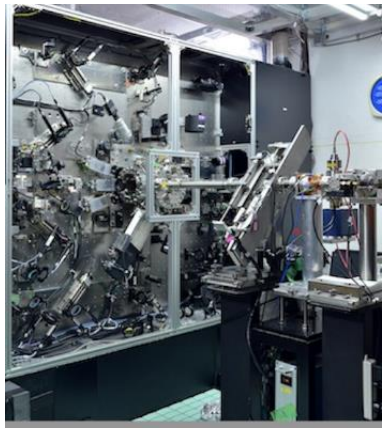


■ **Wakefield effect for nanobeam (see next)**



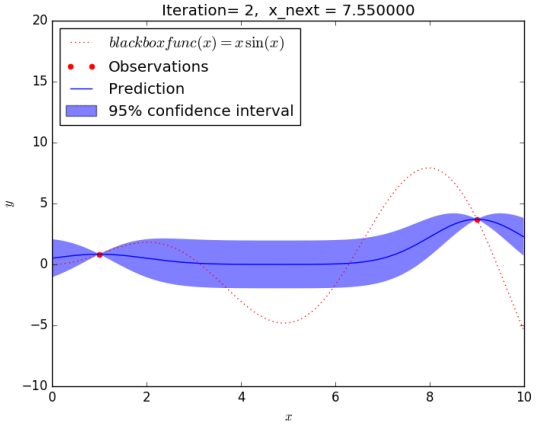
Test chamber prepared.

■ **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**）

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

補助金＋ITNでの若手採用状況 (JFY2023-2024)

- 3人の特任助教が超伝導空洞で採用。(日本人１人+海外2人)
- 1人の特任助教が陽電子で採用 (日本人).
- 2人の博士研究員がナノビームで採用(総研大の卒業生)

本補助金に沿った**若手研究者の育成**が着々と進められている。

超伝導空洞

原隆文
(2024.4月 ~)

B. Rishabh
(2024.12月. ~)

E. Viklund
(2025.1月. ~)

ナノビーム

佐藤幹
(2024.4月 ~)

Y. Abe
(2024.4月. ~)

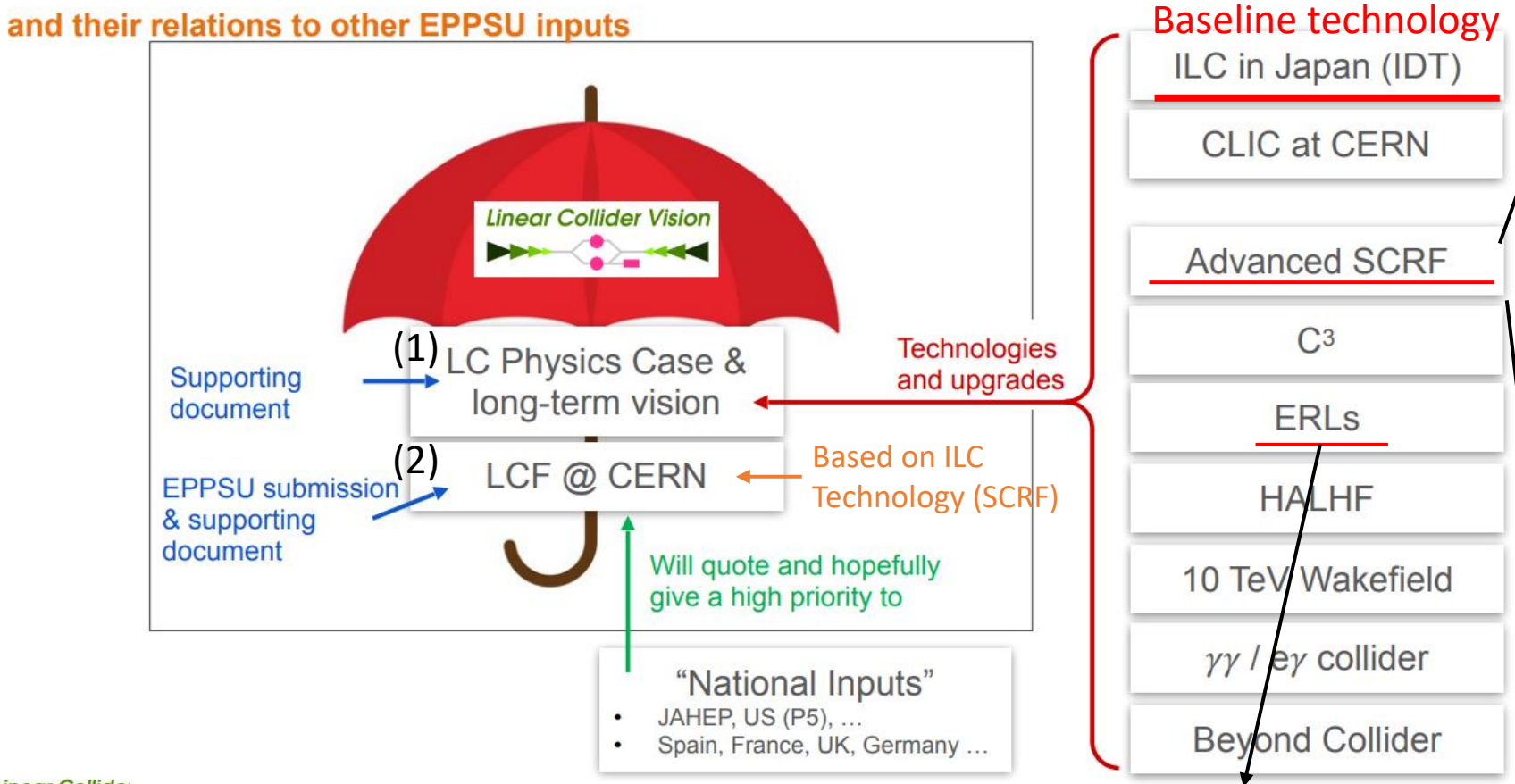
P. Konstantin
(2023.10月. ~)

本補助金で採用。

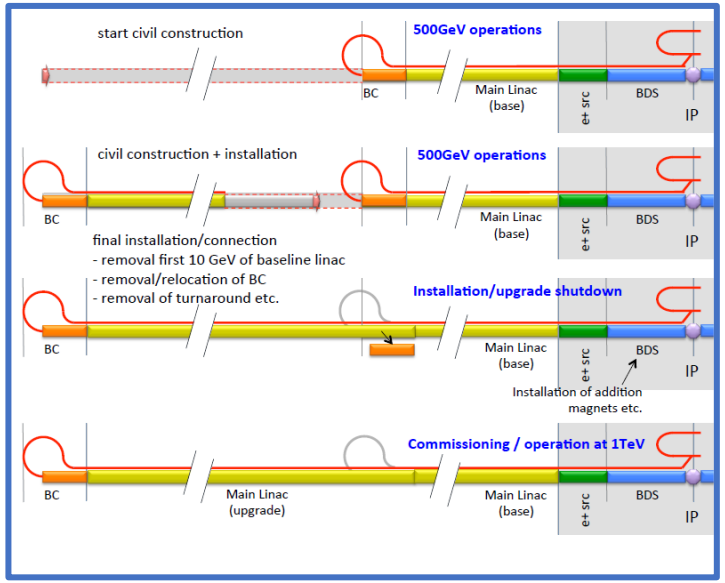
LC vision (To discuss more future LC)

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

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。



Energy upgrades:
- 500GeV (**31.5 MV/m Q_0=1** x 10^{10})
  - 1TeV (**45 MV/m Q_0=2** x 10^{10}, 300 MW)
  - more SCRF, tunnel extension



Further energy upgrades can be realized by
- Nb_3Sn cavity (>80MV/m ?)
- Nb Traveling Wave (TW) structures (HELEN) (>70MV/m)

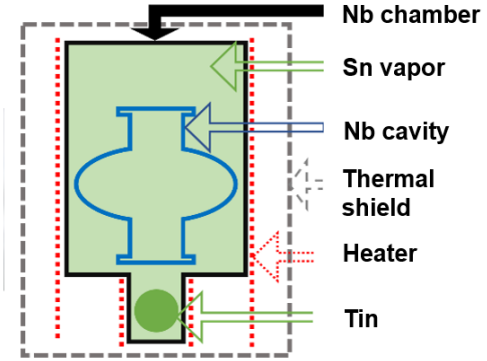
更に更に将来1x10^{36}cm^{-2}s^{-1}以上のluminosityとして超伝導ERL技術を用いたLCも提案されている。

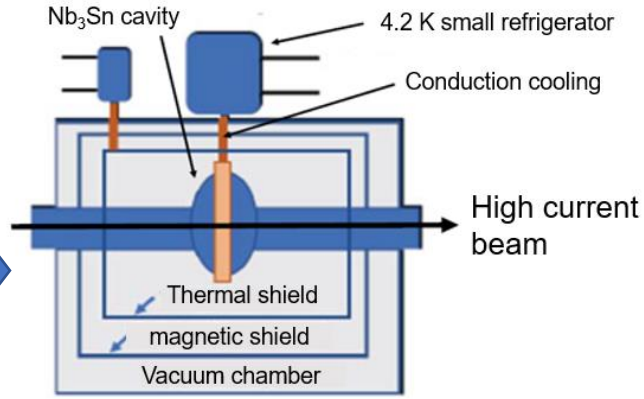
詳細は　8月6日 企画セッション②　WEKO06
「電子陽電子ヒッグスファクトリー計画の物理と展望」
末原 大幹

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

The latest superconducting RF (SRF) technology (Nb_3Sn cavity)

Nb_3Sn cavity (coating by Vaper deposition)

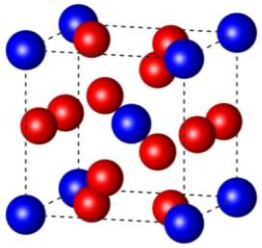




Reduce heat load lower than 1/5.→ Can **conduction cooling** by small refrigerator.

Nb_3Sn 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



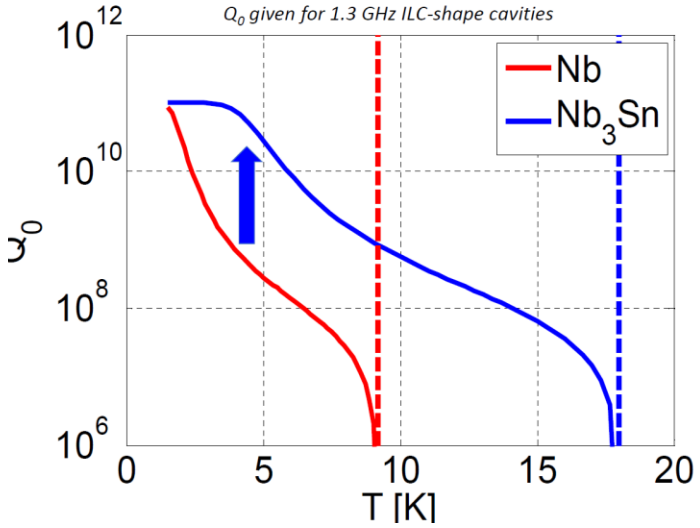
Blue: tin
Red: niobium

Parameter	Niobium	Nb_3Sn
Transition temperature	**9.2 K**	**18 K**
Superheating field	**219 mT**	**425 mT**
Energy gap Δ/k_bT_c	1.8	2.2
λ at T = 0 K	50 nm	111 nm
ξ at T = 0 K	22 nm	4.2 nm
GL parameter κ	2.3	26

Lower losses

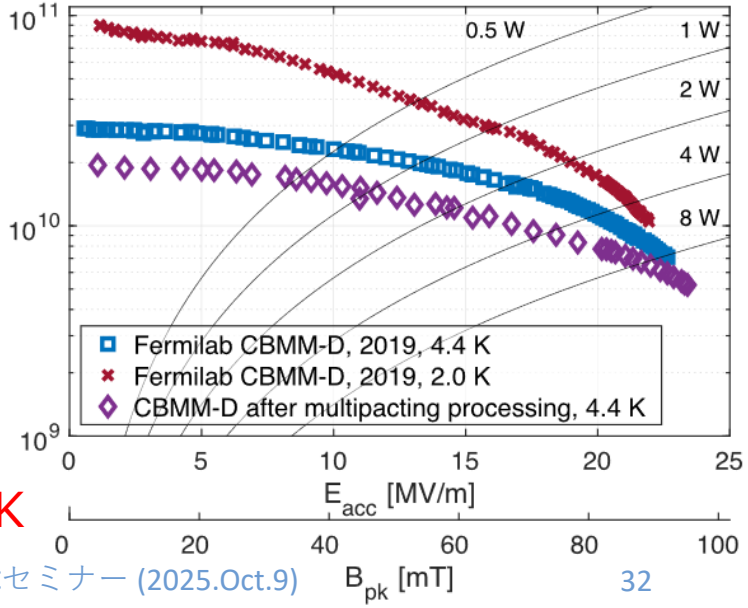
Higher gradients

40MV/m → 80MV/m ?



High Tc→ can operate 4.2K

20MV/m m Q0~1e10まで達成



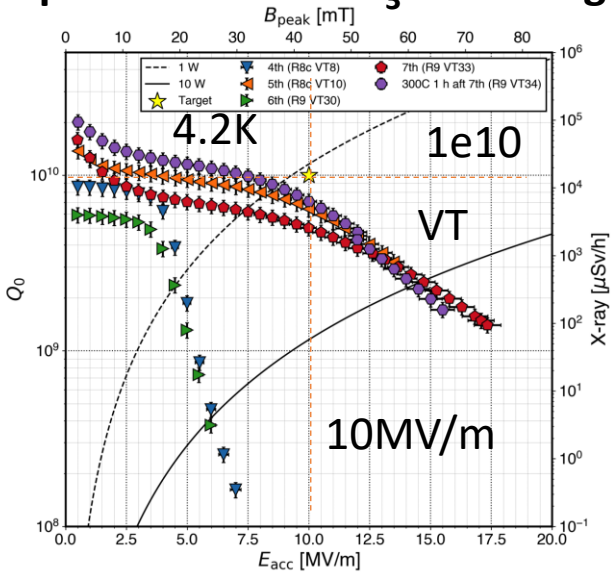
S. Posen and D. L. Hall. Superconductor Science and Technology, 30(3):033004, 2017

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

Nb_3Sn R&D at KEK

H.Ito (TUPB036) in LINAC2024

Optimization of Nb_3Sn coating will lead Q0 to >1e10 and 17 MV/m @4K in KEK.

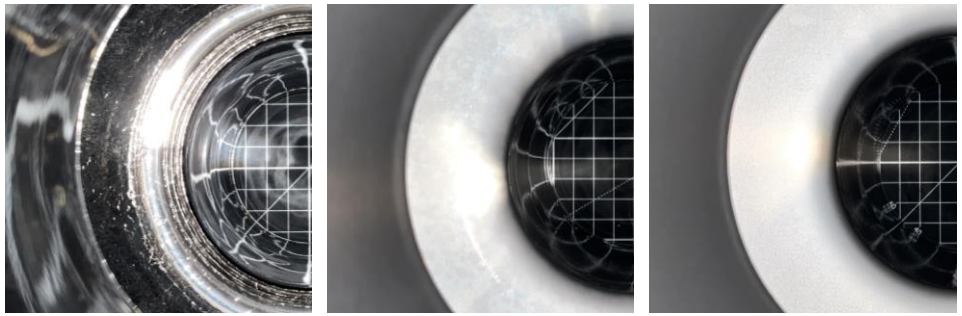


Nb cavity

Nb_3Sn cavity

5th coating

6th coating



High power coupler of 100 kW is developed for Nb_3Sn cryomodule

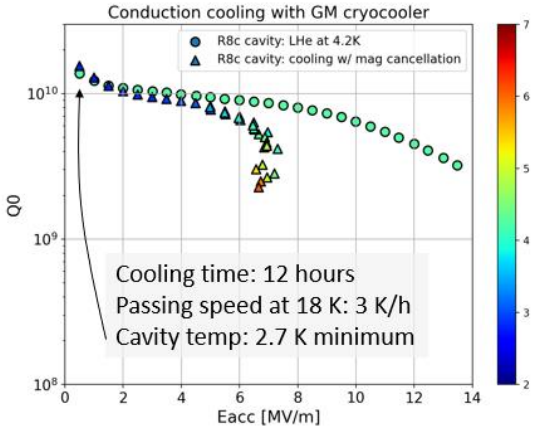
N.Pragya (THPB073) in LINAC2024

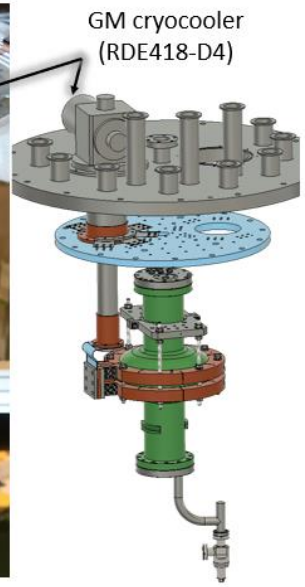
KEK総研大のPrafyaさんが本研究で2025年9月末で博士号を取得します。KEK総研大での加速器専攻の入学も受け入れてます。

Nb_3Sn cavity by conduction cooling study in JFY2024

T. Yamada, 2024.Nov.13, TTC meeting, in Lund

- **5th** Nb_3Sn coating cavity was used.
- Thanks to Nb_3Sn quality improvement, Eacc reached **7MV/m with a 1.8W GM cryocooler**.
- No Q drop due to film breaking was observed.

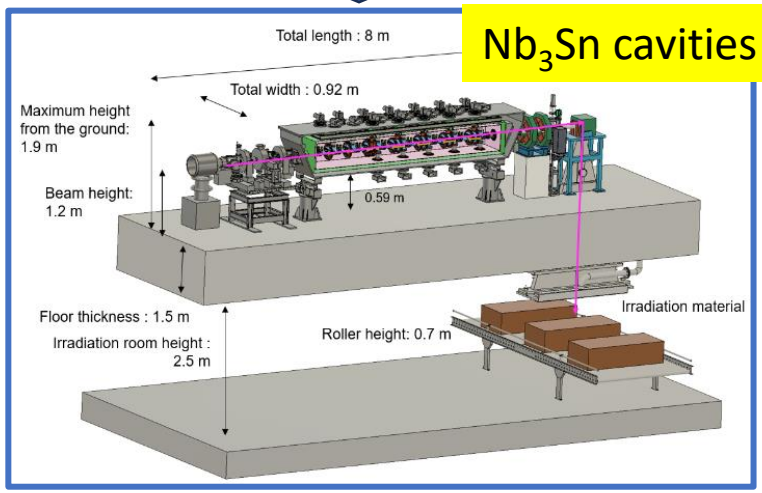




8

さらに東北大の柏木氏の科研費基盤Aで共同研究中

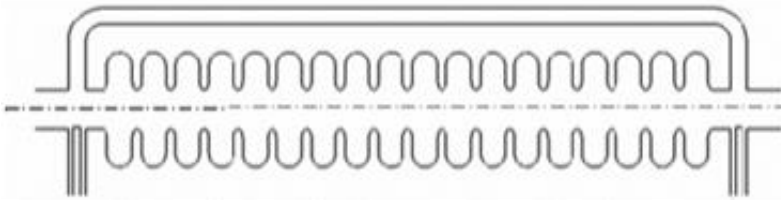
Nb_3Sn cavities



we designed a **10 MeV, 50 mA with Nb_3Sn cavities** to meet the global demand for nanocellulose production based on cERL study.

H Sakai et al 2024 J. Phys.: Conf. Ser. 2687 092013 (IPAC23)

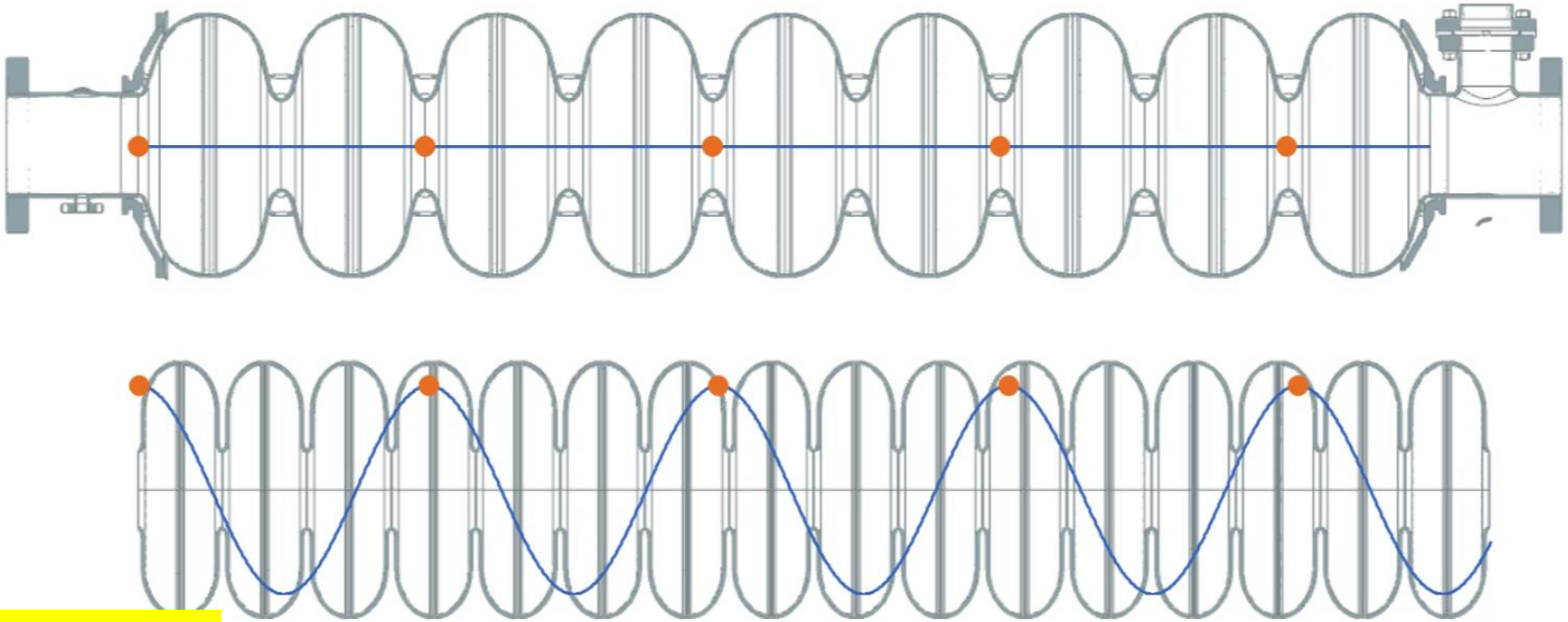
Traveling waveでの加速

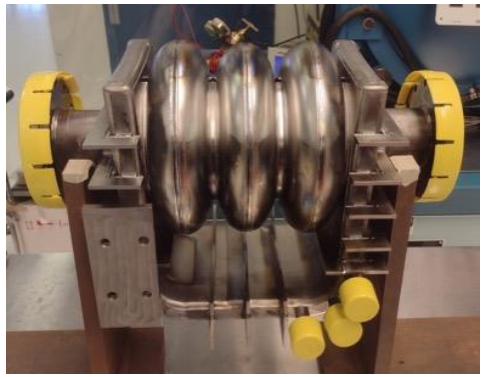


Conceptual design by Pavel Avrakhov

Standing Wave
in 9-cell structure

Increase Transit Time Factor (TTF) for HG





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

Traveling Wave
in 16-cell structure

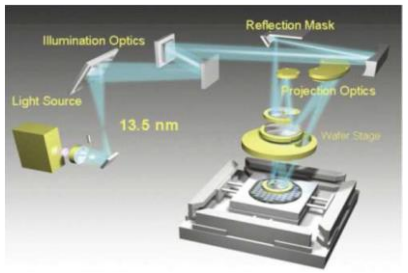
定在波(SW)に対してTWはずっと高いfieldで加速できる。

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.

（超伝導技術の更なる応用）ERL技術による次世代半導体リソグラフィー光源開発

- 半導体微細加工のための**EUVリソグラフィー用大強度EUV光源開発が次の大きな課題**。
- 既存のLPP(~数100W)を20倍以上凌駕する**10kWレベルのEUV光源が実現可能である**。
- また、LPPに比べ、エネルギー回収技術を用いることで、**省電力が**可能。(10kWで5MW程度)

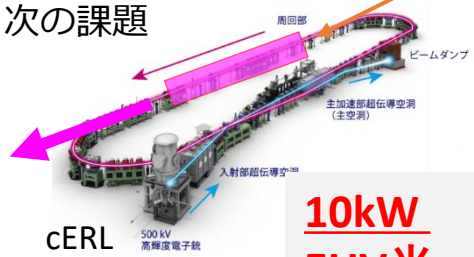
現在のEUVリソグラフィー用LPP光源



LPP(Laser Produced Plasma方式)
波長13.5nm(EUV)
→ 数100W レベル
>1kW：技術的ブレークスルー必要

cERLでFEL技術の開発
2021年IR-FELを実証

10mAでのERL-SASE-FELの実証が次の課題

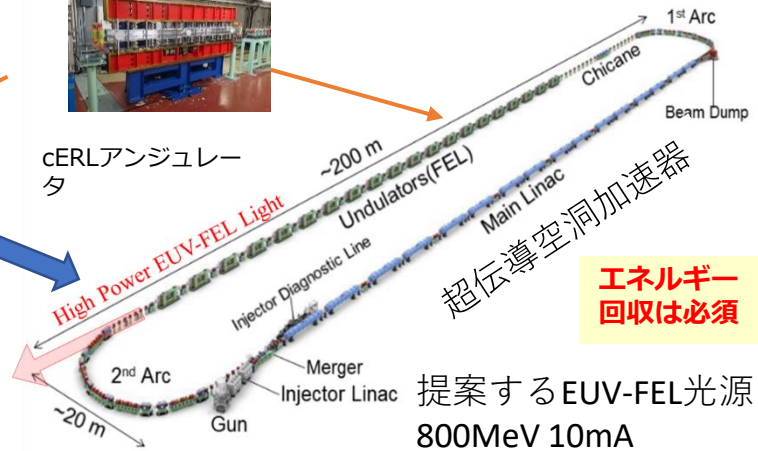


cERL

10kW EUV光

cERLアンジュレータ

次世代EUV光源最有力候補(EUV Lithography 国際学会にて)



エネルギー回収は必須

提案するEUV-FEL光源
800MeV 10mA

- 海外の状況
アメリカxlight社によるEUV-FEL光源開発が急速に進んでいる。本ERL技術が肝と認識。中国でも超伝導空洞量産の後、EUV-FELの開発を進めている。(private)

https://www.jst.go.jp/pr/info/info1747/

公募枠：（２）ＥＵＶ露光用次世代革新光源の開発

研究開発課題名	研究代表者（所属・役職）	研究開発概要
自由電子レーザーを用いた革新的な次世代ＥＵＶ露光機光源の開発（仮称）	本田 洋介（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 准教授）	本研究開発では、加速器技術を利用して、現在の半導体関連企業が有する光源技術の延長線上にない、新しい光源技術を開発し社会実装を目指します。具体的には、超伝導加速空洞を用いたＥＲＬ（エネルギー回収型線形加速器）にＦＥＬ（自由電子レーザー）発振技術を組み合わせることで、高効率で高出力のＥＵＶ光源（ＥＲＬ型ＥＵＶ－ＦＥＬ）を開発します。

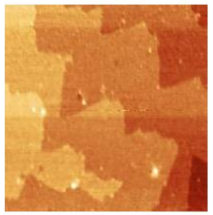
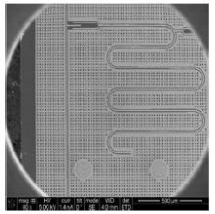
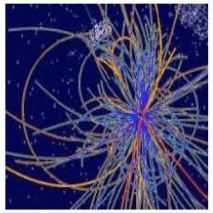
上記海外との競争に対するべく、「**経済安全保障重要技術育成プログラム」K-program (K-pro)の経済安全保障重要技術育成プログラム研究開発構想名：「次世代半導体微細加工プロセス技術」**に関する研究開発構想（プロジェクト型）に応募。**2025年 2月 6日に採択。→右参照。**
2025年4月1日からプロジェクト開始。(5か年)
プロジェクト名：「革新的な次世代EUV露光用光源の実現を目指した自由電子レーザーの基盤技術開発」

EUV-FEL実現に核となる加速器技術の課題を解決し、**10kWEUV光源実現**を目指す。

Kproで特任助教も年度後半から募集予定。

超伝導空洞の非加速器応用

SQMS Science & Technology Innovation Chain

Materials	High-coherence devices	Systems integration	New platforms for quantum tech	Quantum advantage
				
Developing full understanding of decoherence sources	Demonstrating devices with systematically higher T1 & T2	Integrating devices into quantum processors	Deploying large scale quantum cryogenics facilities	Demonstrating quantum advantage

SQMS bridges the gap between ideas and large-scale realizations via unique center-wide coordinated approaches

39 12/8/2023 SRF technology for Quantum Computing and Dark Matter Searches Fermilab SQMS SUPERCONDUCTING QUANTUM MATERIALS & SYSTEMS CENTER

Fermiの例(SQMS)： 超伝導マイクロ波技術の応用
→ 日本では、東大、QUP、など連携して研究。

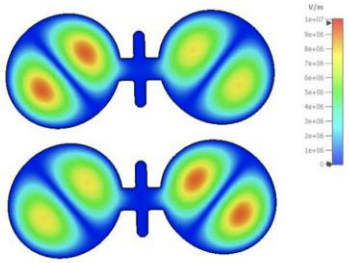
量子センサーへの応用

Axionサーチ、重力波測定など、高いQ値を利用して測定。

$\omega_0 = 1.773430$ GHz

$\Delta\omega \approx 16$ kHz

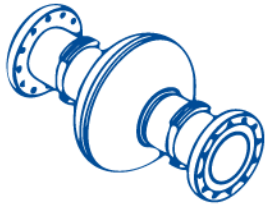
$\omega_1 = 1.773446$ GHz

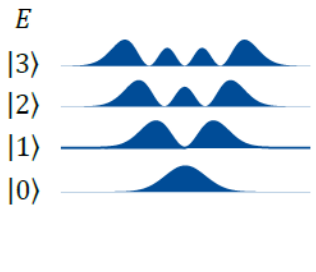


重力波測定への応用例

量子コンピュータへの応用

Superconducting qudits?





$|\psi\rangle = c_1|0\rangle + c_2|1\rangle + \cdots + c_n|n\rangle$

$T^1_{|0\rangle} \approx 1$ s!

A superposition of number of n photons…
'encodes' $\log_2 n$ qubits

If *frequency* is **small**, *temperature* **must** be **low** ← $E = hf$ (Einstein)
$E = k_B T$ (Boltzman)

Relaxation time

$T^1_{|n\rangle} = \frac{1}{n} T^1_{|0\rangle}$

Temperature = 10~20 mK

トランズモンの量子状態に対応した電磁波のモードが発生→**～秒保存**
メモリー的な利用複数のエネルギー準位を用いた→**量子計算の可能性**

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。
- 超伝導空洞技術の高勾配化、応用も大きく発展。

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

KEKの加速器博士研究員＆助教の公募(2025年12月24日　正午必着)
(加速器25-3 博士研究員) https://www.kek.jp/ja/career/accl25-3j
(加速器25-6 助教) https://www.kek.jp/ja/career/accl25-6j

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)
(2025.April)