ILC加速器

山田 智宏
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),
総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究科
助教

ytomohi@post.kek.jp

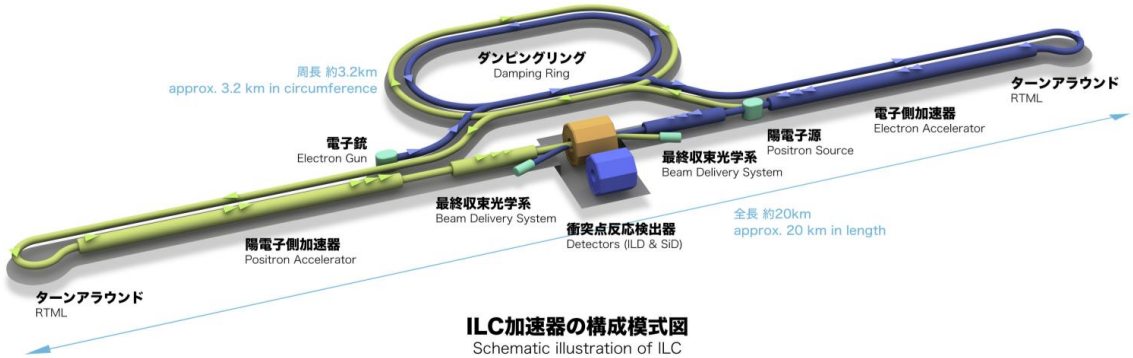
Flavor Physics Workshop 2026, 2026.11.18 @呉羽ハイツ

自己紹介

- **名前：山田 智宏**
- **所属：**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)
- **現在の研究テーマ：**

① Nb超伝導加速空洞クライオモジュール

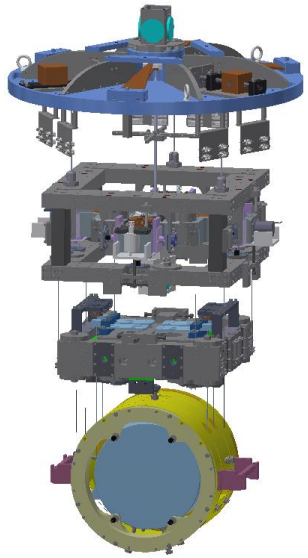
② 次世代小型Nb_3Sn超伝導加速器の開発



ILC加速器の構成模式図
Schematic illustration of ILC

- **大学院時代：**

レーザー干渉計型大型低温重力波望遠鏡KAGRAで、20Kサファイア鏡懸架システムの低振動冷却と制御を担当。





- **趣味：**

登山、釣り、スキー

目次

◆ILC加速器の構成

- 電子源
- ダンピングリング
- 主線形加速器
- 陽電子源
- 最終収束光学系
- ビームダンプ

◆KEK-iCASAで展開するILC線形加速器向け超伝導クライオモジュール開発

◆まとめ

目次

◆ILC加速器の構成

- 電子源
- ダンピングリング
- 主線形加速器
- 陽電子源
- 最終収束光学系
- ビームダンプ

◆KEK-iCASAで展開するILC線形加速器向け超伝導クライオモジュール開発

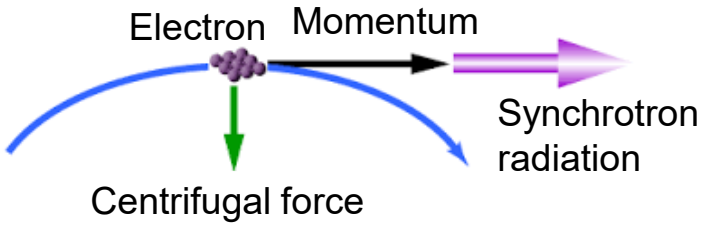
◆まとめ

ILC: International “**Linear Collider**”

◆Collider：衝突型加速器

- 高速の粒子を正面衝突させる方式
- レプトン衝突型（電子－陽電子）：LEP(終了), Super KEKB(運転中), **ILC(将来)**など
- ハドロン衝突型（陽子－反陽子, 陽子－陽子, 陽子－重イオン）：Tevatron(終了), RHIC(終了), LHC(運転中)
- 陽子－電子衝突型：HERA(終了), EIC(将来)など

◆Linear(線形)である必要性

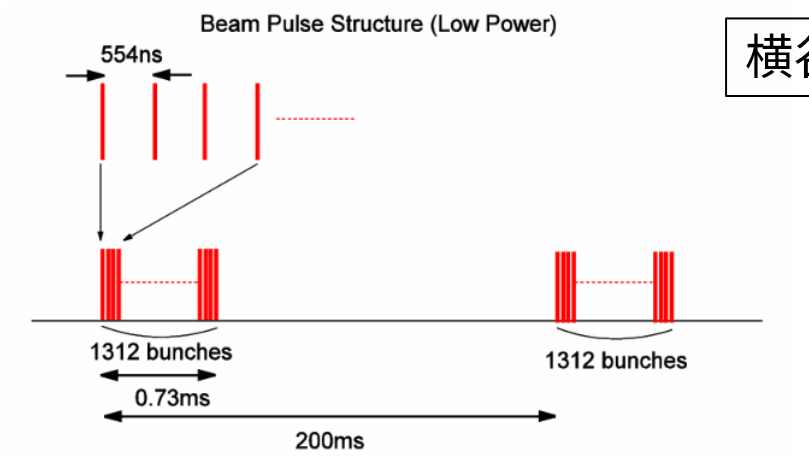


- 荷電粒子は軌道を曲げられるときにシンクロトロン放射でエネルギーを失う
- 失うエネルギーΔEは粒子の静止質量mと曲げ半径ρを使って、$\Delta E \propto \frac{E^4}{m^4 \rho}$とかける。
- LEPは直径8.5km, 周長27kmの円形コライダー。重心系衝突エネルギーで209GeVが限界だった。
- もっと高エネルギーのレプトンコライダーを作るには、**線形(ILC, CLICなど)**か巨大な円(FCC, CEPCなど)か、にする必要がある。

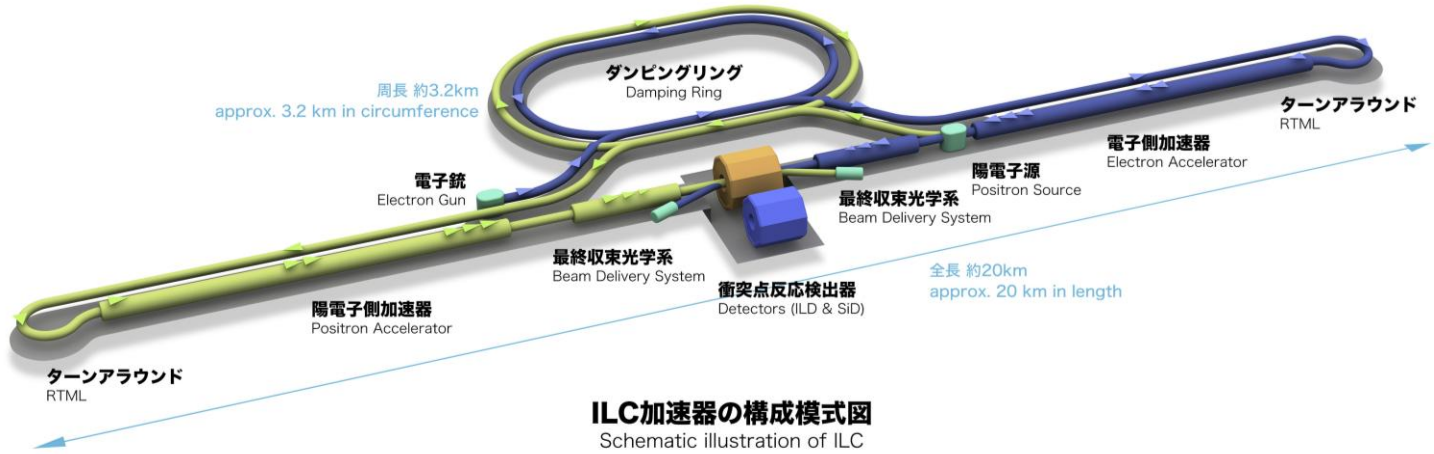
ILCの構成

Table 1 Beam Parameters (250 GeV ECM)

Particles/bunch	2×10^{10}
Bunches/pulse	1312
Bunch Length	6 mm (damping ring) 0.3 mm (after bunch compressor)
Bunch spacing	554 ns (linac, etc.) 6.15 ns (damping ring)
Repetition rate	5 Hz
Normalized emittance x/y	4μm/20nm (damping ring) 5μm/35nm (BDS)
Beam Energy	5 GeV (damping ring) 15 GeV (after 2nd bunch compressor) 125 GeV (final energy)
Beam size at collision point	x : 520 nm y : 7.7 nm



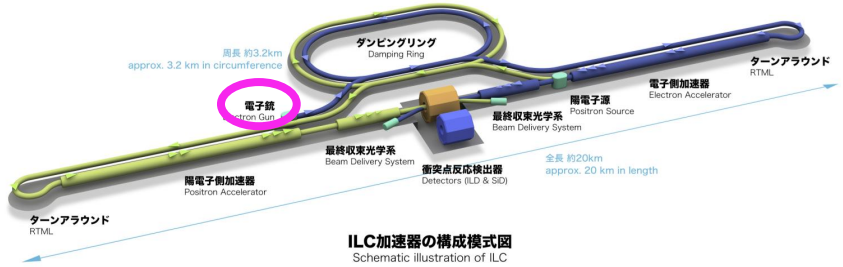
横谷



ILC加速器の構成模式図
Schematic illustration of ILC

OHO2021, 久保

ILCの構成：電子源



ILC加速器の構成模式図
Schematic illustration of ILC

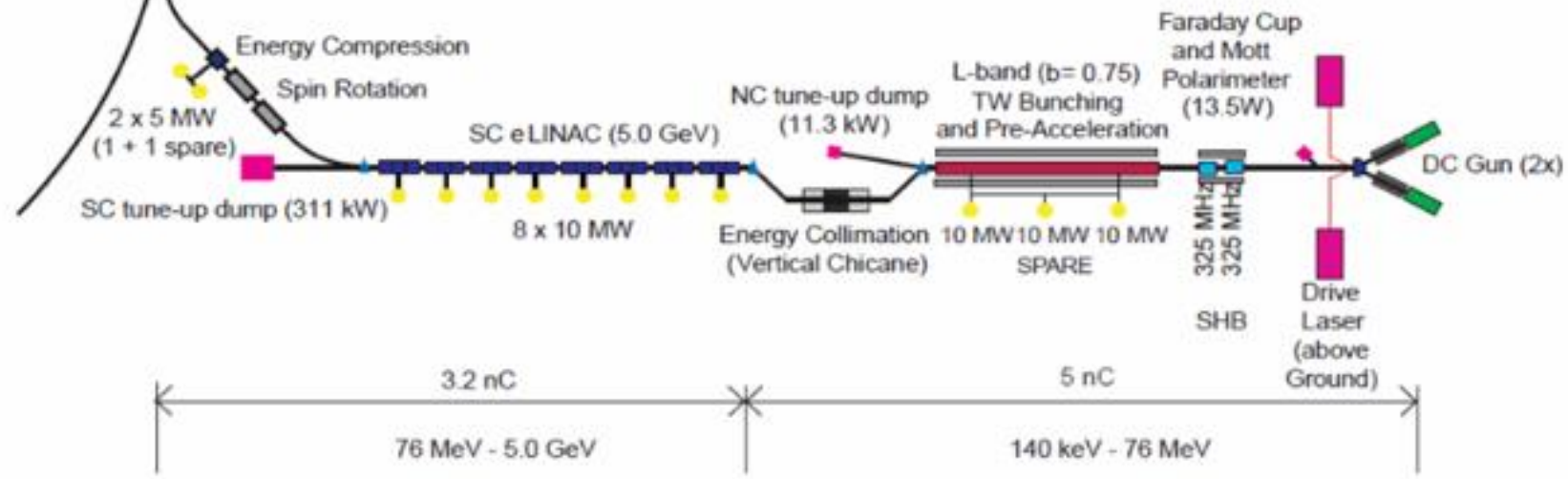
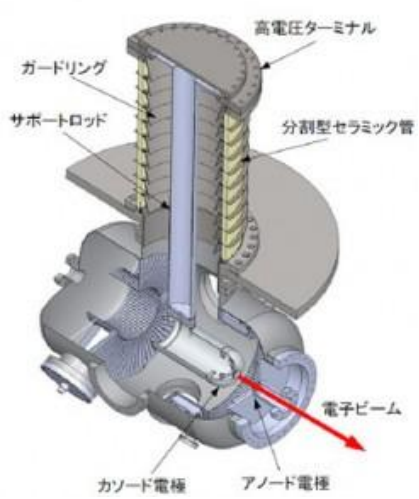


図 3　電子入射器の全体レイアウト．静電型の光電陰極電子銃から出たビームは 325MHz のサブハーモニックバンチャーが二台，L-band の前置加速器，シケインをはさんで超伝導加速器によるブースターで 5GeV まで加速され，スピンローテーター，エネルギーコンプレッサーを経て，DR に入射される．

OHO2021, 栗木

- 200kV DCフォトカソード電子銃
- カソード材：GaAs



ILC通信

ILCの構成：ダンピングリング

- ルミノシティを大きくするためには、エミッタンスを小さくする必要がある。
- 円形リング型加速器ではシンクロトロン放射により周回中に自然とエミッタンスが小さくなっていくが、ILCでは線形加速部分に入る前にエミッタンスを下げる必要がある。

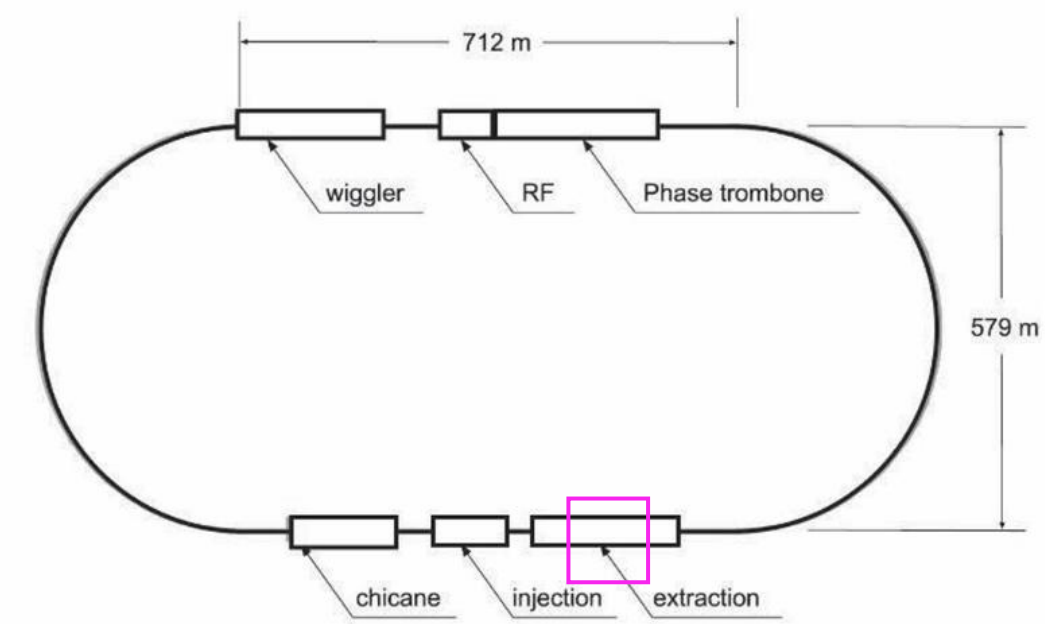


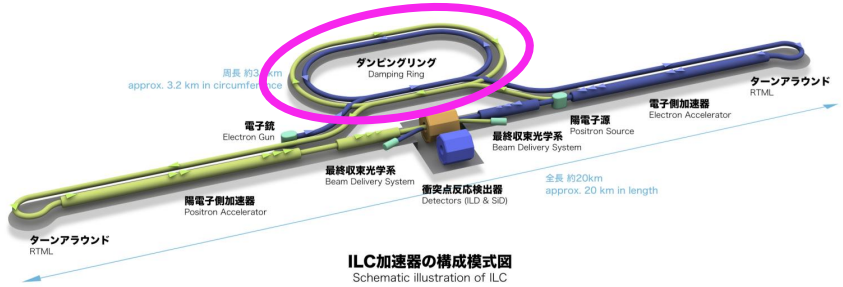
ILC加速器の構成模式図
Schematic illustration of ILC

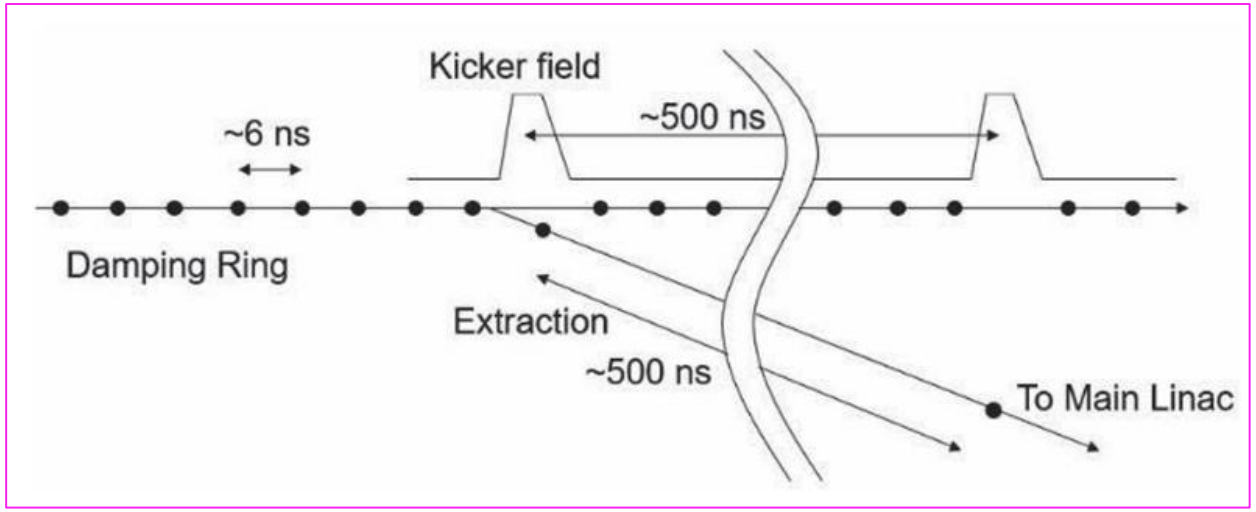
- 電子源、陽電子源で作られたビームは、ビームサイズが大きく平行性が悪い。
- ウィグラーでビームを蛇行させ、（余計な方向の）エネルギーを減衰させて、その後高周波加速空洞で前向きに加速させて、並行性の良いビームを作り出す。



ILCの構成：ダンピングリング





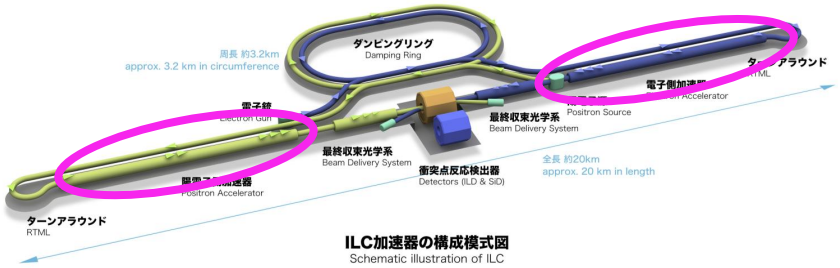


- ILCのビームは、1312 Bunch/Pulse, Bunch spacingは554 nsなので、全体で0.73 ms
- この状態でダンピングリングに蓄積させると、周長が200 km超になるため、Bunch spacingを6.15 nsまで詰めることで、周長3.2 kmに抑える。
- キッカーの立ち上がり、立ち下りはBunch spacingよりも速い必要がある。

- 電子用、陽電子用の2階建て構造になる

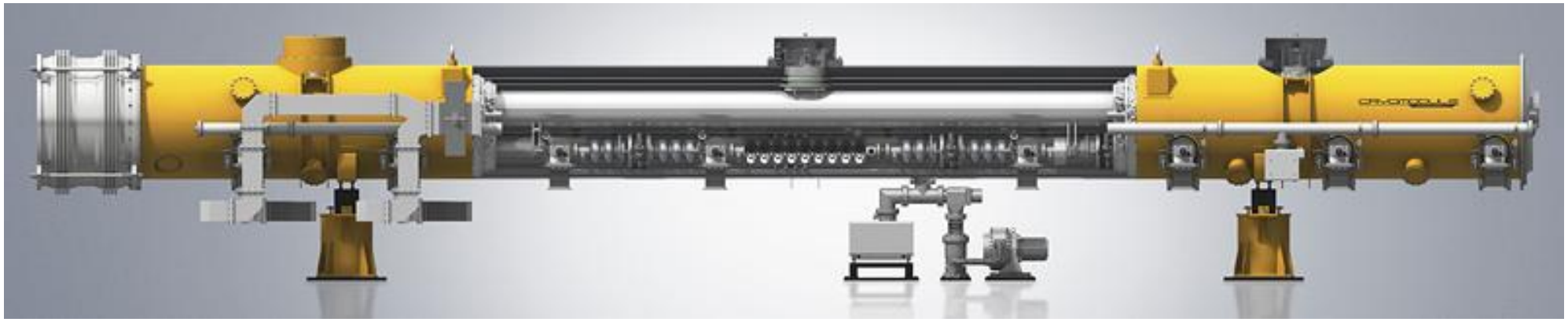
ILCの構成：主線形加速器

- ダンピングリングを出た5 GeVのビームを125 GeVまで加速させる。（ILC250の場合）
- 直線であることで、シンクロトロン放射ロスを抑えられる。



- 1.3 GHz高周波加速空洞技術を採用
- 空洞はニオブ製超伝導空洞とし、RF電力の損失をほぼゼロにする。
- ILCを短くするため高加速勾配が必要
- ビーム軌道調整のための超伝導磁石も内蔵される。

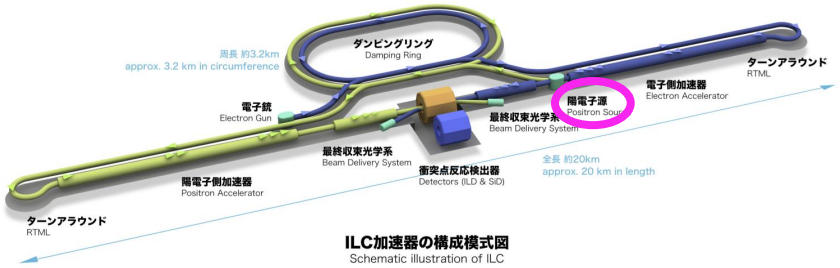
講義の後半で詳しく説明します。



ILCの構成：陽電子源

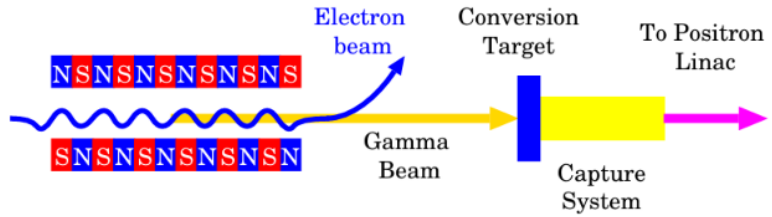
◆アンジュレータ方式

- 主線形加速器で加速された電子をヘリカル・アンジュレータに通して円偏光ガンマ線を発生させ、チタン合金回転標的に入射し、電子・陽電子対生成を起こさせる。
- 発生した陽電子をフラックスコンセントレーターで集め、陽電子ダンピングリングに送る。
- 電子側の主線形加速器と連動しているため、システム立ち上げや調整が複雑になるというデメリットがある。

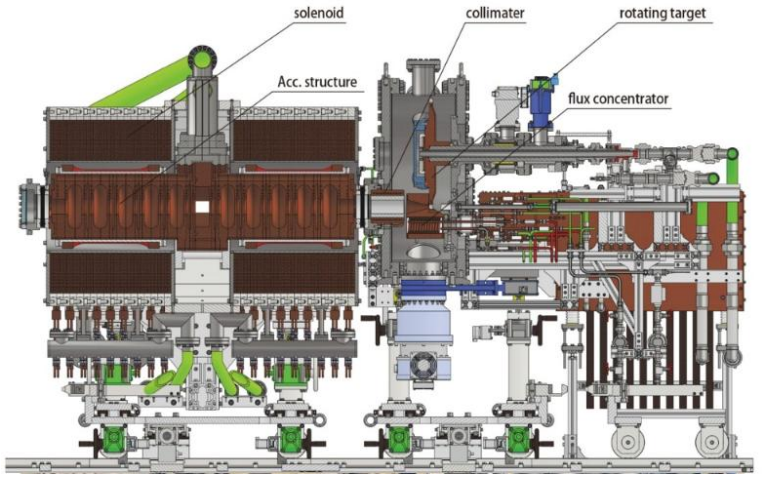


◆電子駆動方式

- 専用加速器から電子ビームをタングステン合金回転標的に入射し、標的内部で発生したガンマ線から電子・陽電子対生成が起こり、陽電子が生成される。
- 独立したシステムで陽電子を生成できるメリットがあるが、陽電子のスピンが揃っていないという致命的な課題もある。



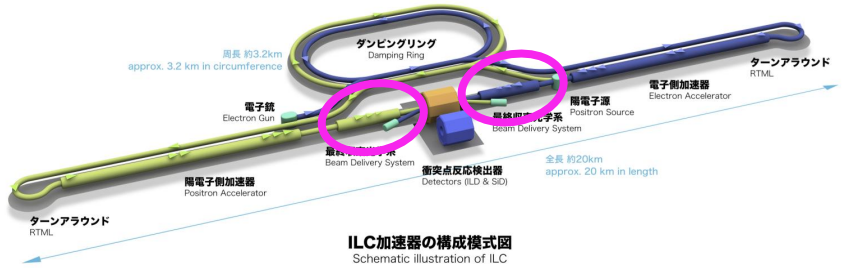
OHO2021, 栗木



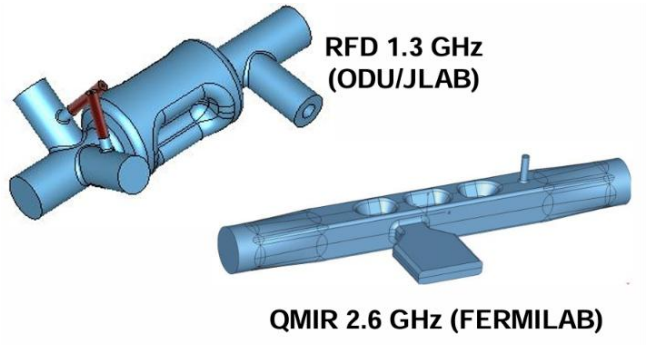
LCWS2026, 森川

ILCの構成：最終収束光学系

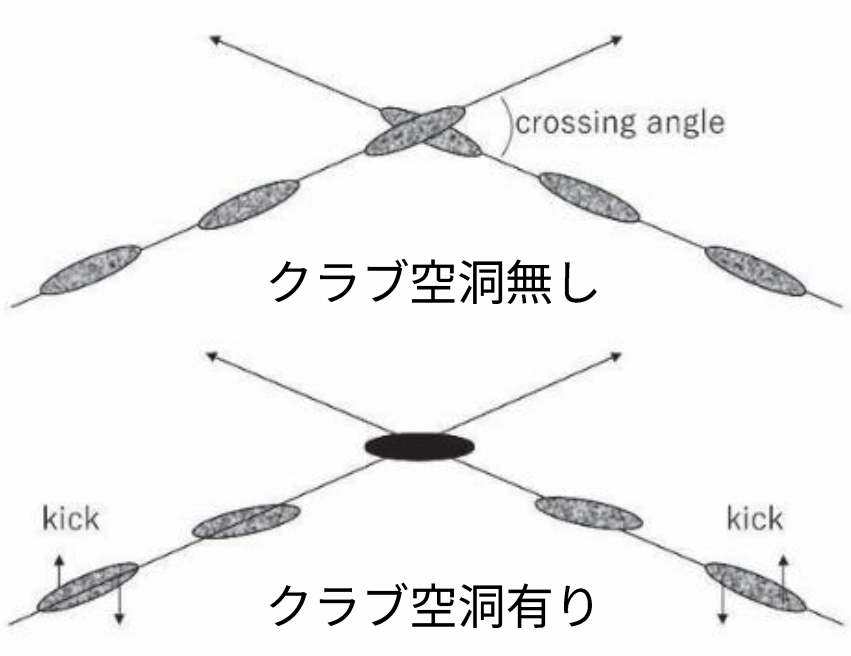
- ルミノシティを高めるため、ビームを絞り極端に扁平にさせたビームとする必要がある。
（高さ**7.7 nm**, 横幅516 nm, 進行方向の長さ0.3 mm）
- 衝突点直前の2つの四極磁石でビームを絞る。色収差を6極磁石も使用して補正する。
- KEK-ATFで研究が進められている。



- 電子・陽電子ビームは14 mradの角度で交差衝突
- ルミノシティを上げるため、正面衝突させたい。
- クラブ空洞を使用し衝突直前で、バンチの前方と後方をキックし、衝突点で平行になるようにする。



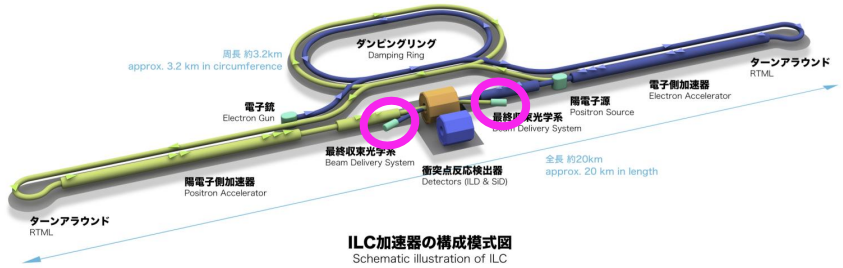
様々なクラブ空洞案のうち、2案に絞り込まれている。



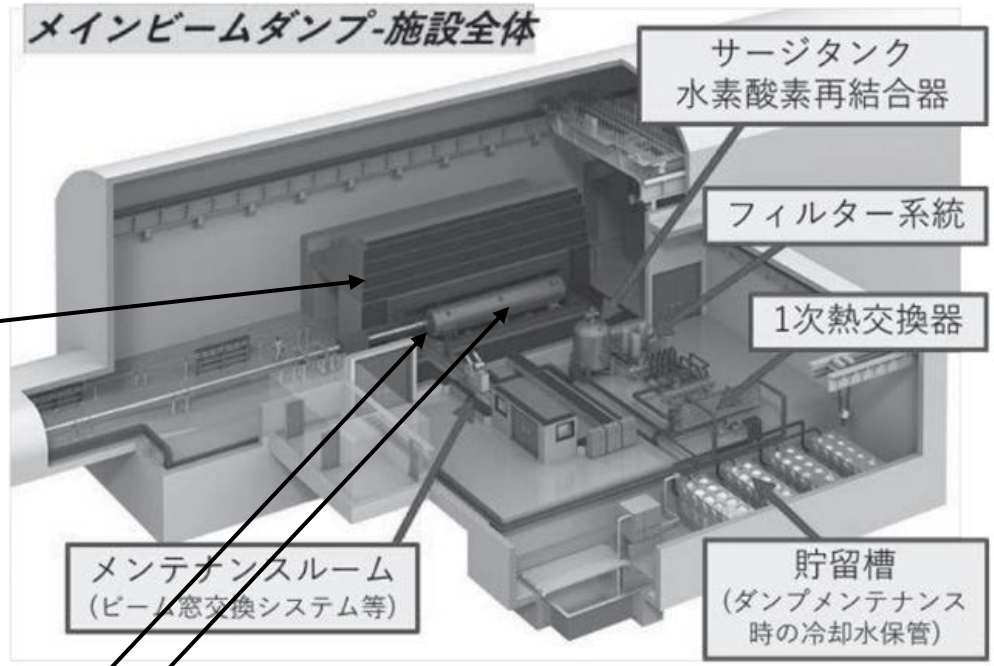
OHO2021, 久保

ILCの構成：ビームダンプ

- ILCメインビームダンプは500 GeV構成を視野に**17 MW**が受容可能なように設計されている。
（現在の世界最高は5 MW@ESS）
- 円形リング型加速器のビームダンプは通常運転時には使用されないのに対し、線形加速器では常時入射があるため時間平均入射量が大きい。常に冷やし続ける必要がある。



- ILCメインビームダンプは水を吸収体として使用。
- 生成される^{7}Beはイオン交換樹脂により除去され、トリチウムは溜め続けられる。
- 遮蔽体は鉄50cm＋コンクリート550cm
- 5000 h/year×20年間運転後、遮蔽体内では100 mSv/h, メンテナンスルームで10 uSv/hとの計算も
- ビームダンプを使った様々な実験も検討されている（新粒子探索など）。



チタン合金製窓
メインビームダンプ

OHO2021, 森川

目次

◆ILC加速器の構成

- 電子源
- ダンピングリング
- 主線形加速器
- 陽電子源
- 最終収束光学系
- ビームダンプ

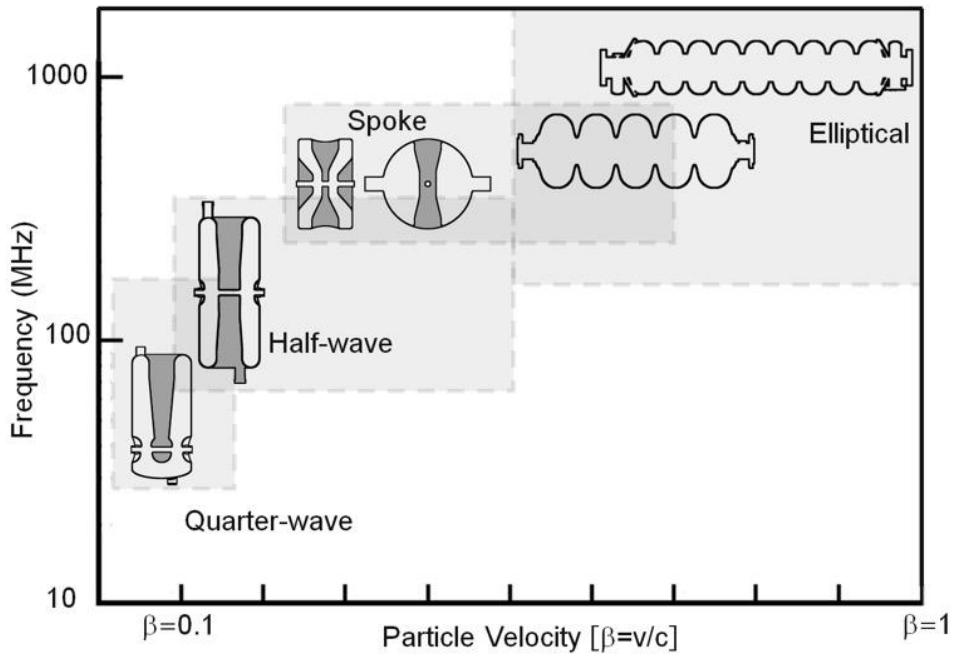
◆KEK-iCASAで展開するILC線形加速器向け超伝導クライオモジュール開発

◆まとめ

超伝導高周波加速空洞とは

◆超伝導・高周波・加速・空洞（SRF空洞）とは「**高周波**エネルギーを溜め荷電粒子ビームを**加速**するために、**超伝導**材料で作られた**空洞**（空間）」のこと。

材料：ニオブ(Tc 9.2K)

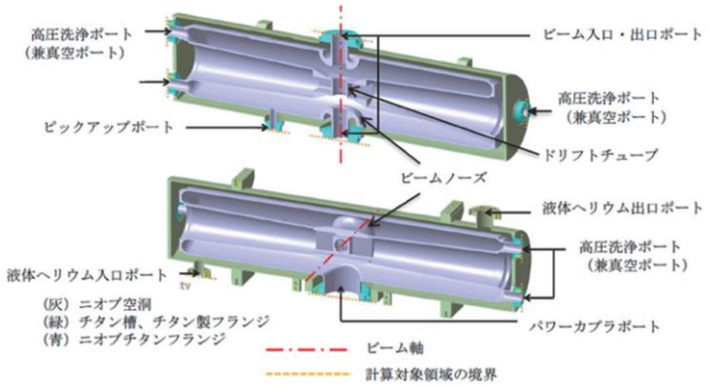


本トークでは1.3 GHz空洞を取り上げます

iCASAでは、**電子**加速用に1.3 GHz楕円空洞を開発

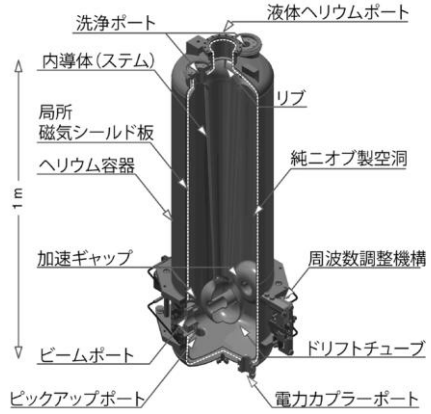


LIPAc@QST六ケ所研では、**重水素**加速用に175 MHz HWR空洞を開発



春日井, 低温工学54巻4号(2019)

RIBF@理研では、**重イオン**加速用に73 MHz QWR空洞を開発

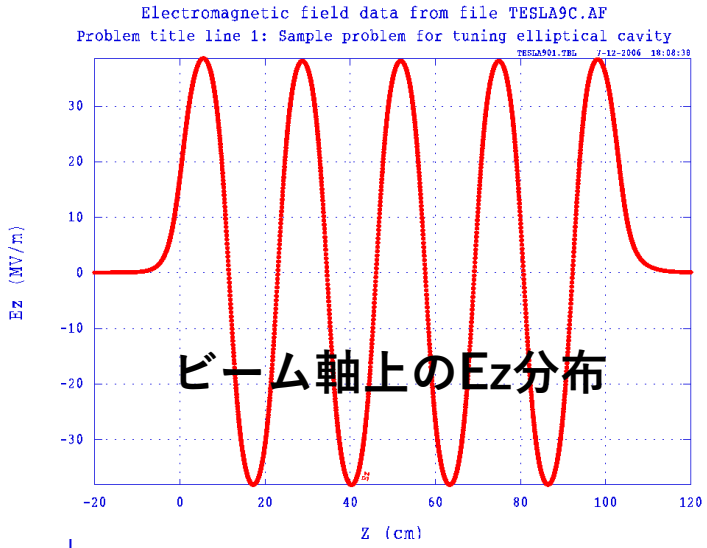


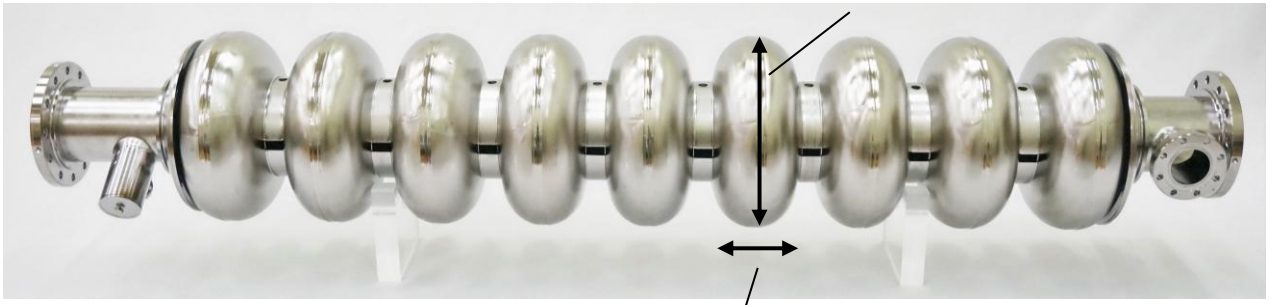
坂本, 加速器 Vol.17, No.2 (2020)

楕円空洞

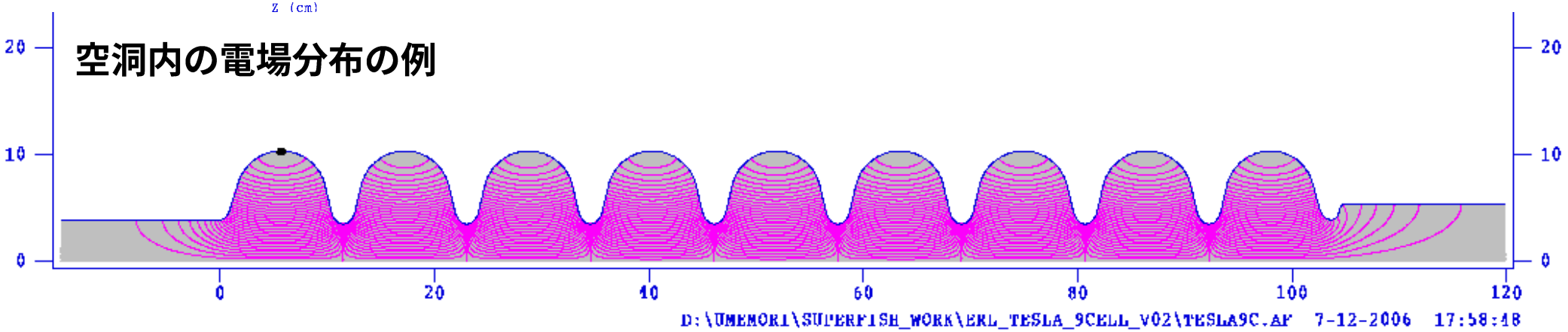
- 光速の粒子がセルの長さを進むごとに、高周波の位相が反転
  ⇨ 各セルを粒子が通るタイミングで常に加速される

Courtesy: K. Umemori





1.3 GHz空洞の場合
- 半波長 = セル長 = 約11.5 cm
- 9セル空洞の加速部 = 11.5 cm x 9 = 約1m



重要単語・パラメータ、超伝導の利点

- **Q値**：表面損失の逆数
  ⇨ Q値が高いほど、表面損失（＝発熱）が小さい
- **Eacc (加速勾配)**：単位長さ当たりの加速電圧
  ⇨ Eaccが高いほど、必要空洞数を減らせる

- 表面抵抗(R_s)は以下の式で書ける

$$R_s = A\omega^2 \exp\left(-\frac{E_g(0)}{k_B T}\right)$$

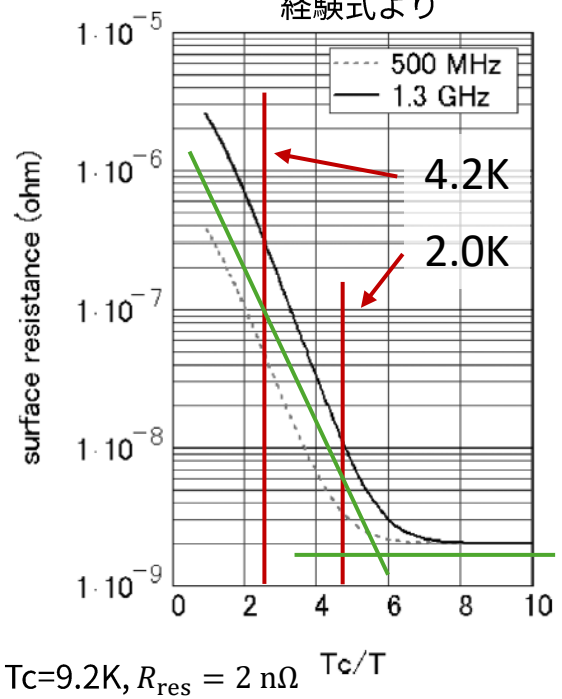
  R_sを下げるには、温度を下げる。
- R_sはBCS理論から導かれる抵抗R_{BCS}と残留抵抗R_{res}の和

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

- 高Q化には残留抵抗R_{res}を下げることが重要

⇨ **<u>良い空洞に良い表面処理を施し良い環境を</u>**

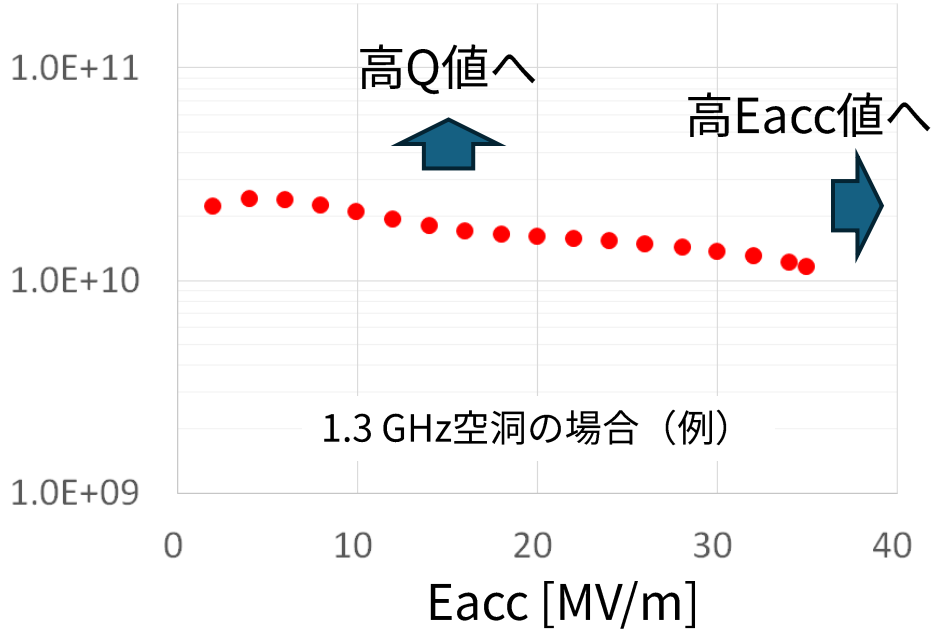
経験式より



Tc=9.2K, $R_{\mathrm{res}} = 2\ \mathrm{n\Omega}$

or

Courtesy: K. Umemori



<u>超伝導の利点</u>

超伝導空洞のR_s：～**nΩ**
常伝導空洞のR_s：～**mΩ**
6桁も違う

超伝導空洞では、**連続運転**が可能
常伝導空洞では、パルス運転が主

少し休憩

ところで、なぜKEK-iCASAでは超伝導空洞の研究をしているのか？

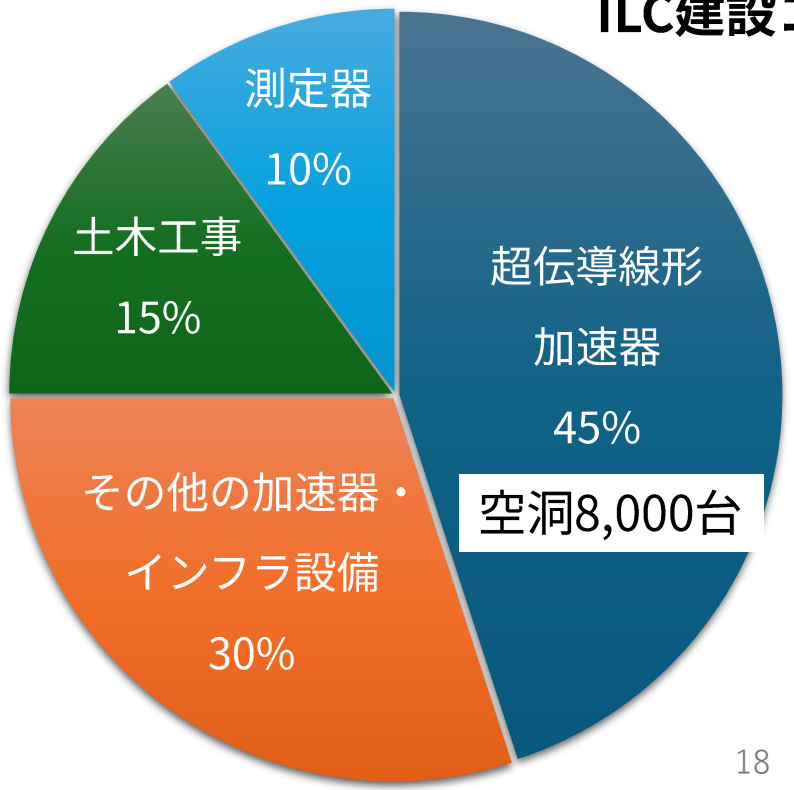
ILCという観点では、（ILC以外、Nb以外もやっているので）

- ILC250 Cost Update 2024によると、ILC建設コストは1兆3,765億円とのこと
- そのうち、約半分が超伝導線形加速器（クライオモジュール、大電力高周波源など）

- 空洞の加速勾配が高ければ、**空洞台数を減らせる**
- 空洞のQ値が高くできれば、**液体ヘリウム消費が抑えられる**
- できることなら、空洞をもっと安く作りたい。
  - 製造プロセスの見直し
  - ニオブ鍛造のプロセスを少なくした、Medium Grainのニオブを使用した空洞研究

- 実は、空洞性能は製造時点で確定するのではなく、その後の表面処理でも改善できる。

ILC建設コスト



ニオブ(Nb)で空洞を作る

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

◆ニオブ(Nb)の理由

$$R_s = R_{\mathrm{BCS}} + R_{\mathrm{res}}, \quad R_s = A\omega^2 \exp\left(-\frac{E_g(0)}{k_B T}\right)$$

Courtesy: T. Dohmae

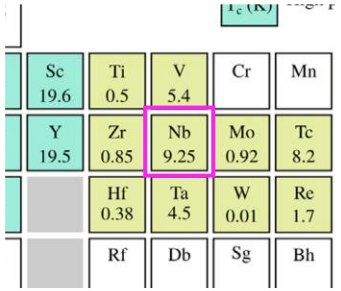
物理：超伝導転移温度が高い ⇔ 温度を下げることでR_{BCS}を効果的に下げられる。

物理：臨界磁場が高い ⇔ 空洞内の強い磁場でもクエンチしにくい。

加工：高純度化しやすい（Ta以外）← R_{res}の低減

加工：プレス加工時の延性が良い

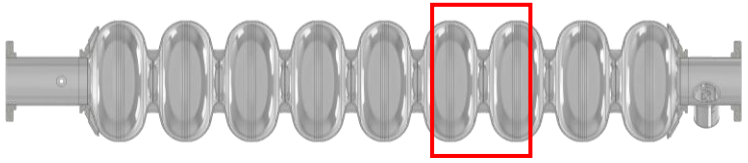
加工：電子ビーム溶接の溶接性が良い



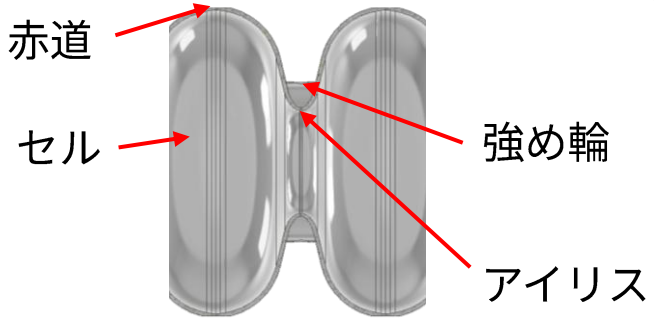
	Type	Tc [K]	Hc1 [Oe]	Hc [Oe]	Hc2 [Oe]
Pb	I	7.20	-	800	-
Nb	II	9.2	1700	2060	4000
Nb3Sn	II	18.3	380	5200	240000

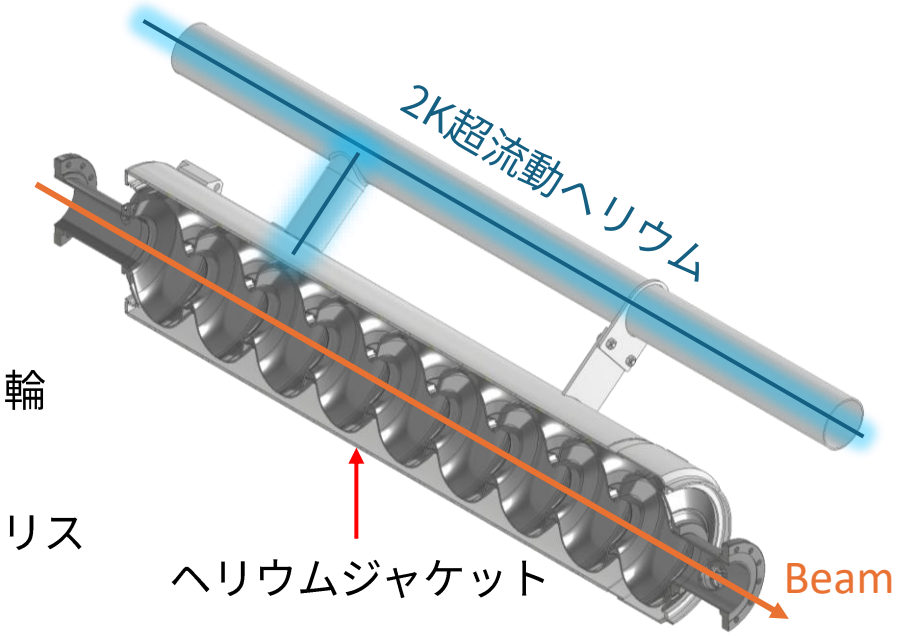
◆Nb製1.3 GHz 9セル空洞

- 各パーツを電子ビーム溶接により接合



- チタン製ジャケットとの間を
  2K超流動ヘリウムで満たし浸漬冷却



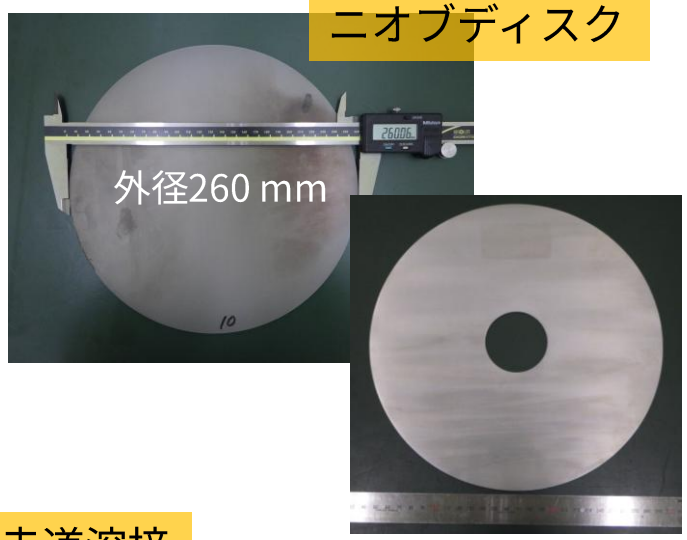


空洞製造プロセス

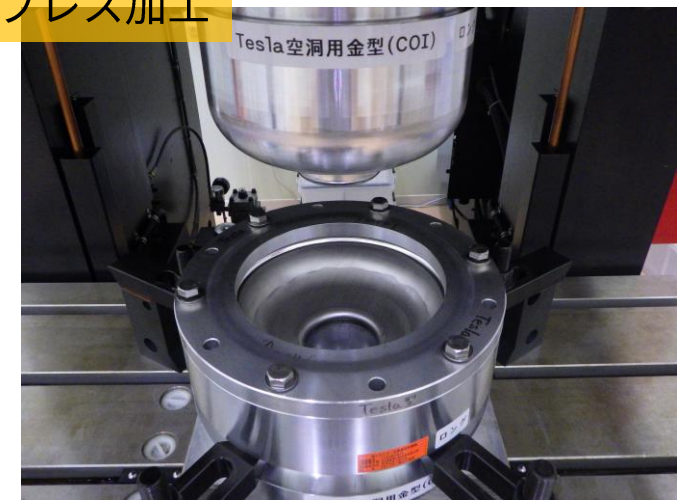
Courtesy: T. Dohmae

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

ニオブディスク



プレス加工



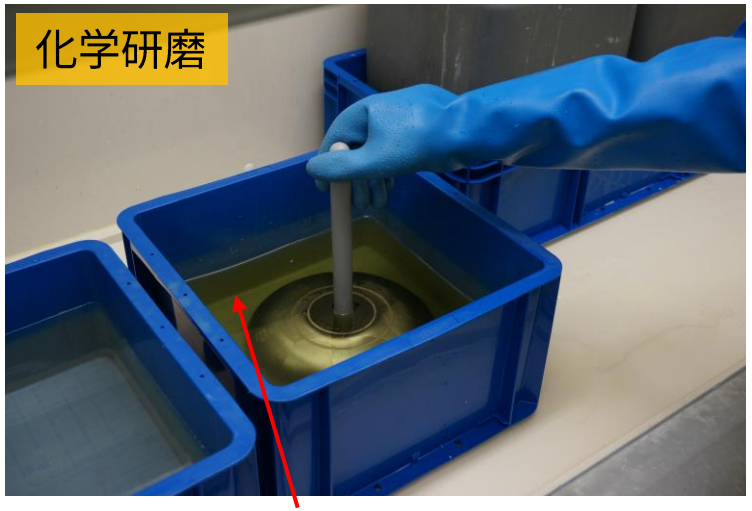
トリミング

縦型旋盤



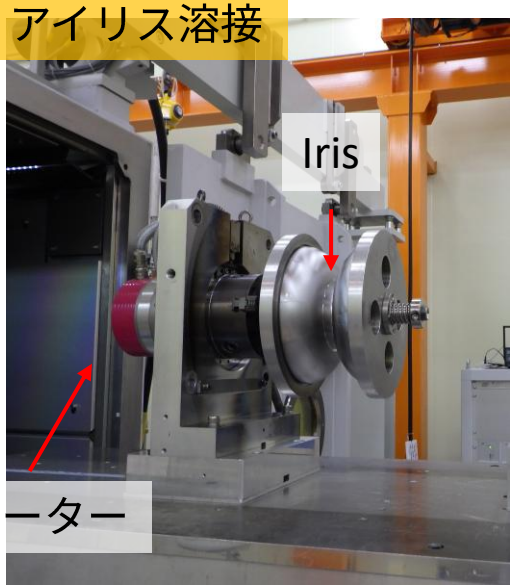
プレスされたハーフセルを治具で固定し、余分な部分を削り取る

化学研磨

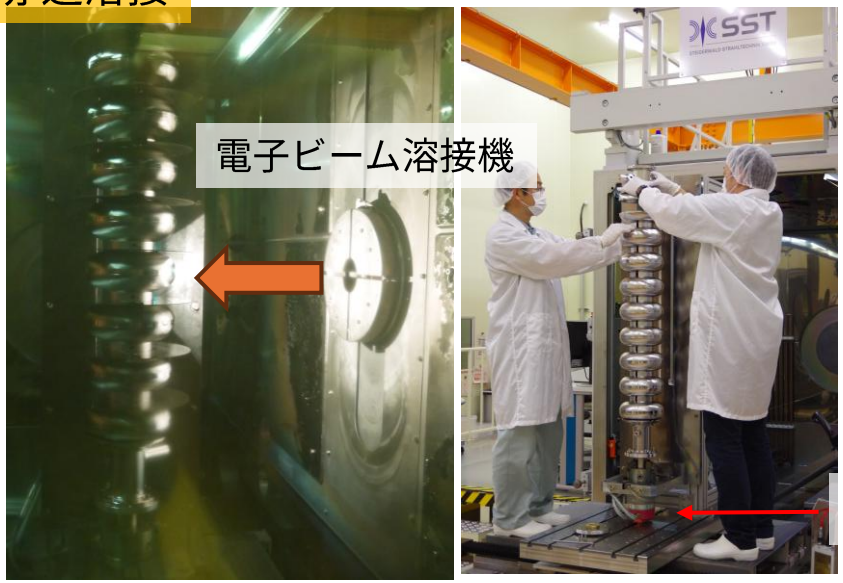


$HNO_3 + HF\ (H_2O) + H_3PO_4$

アイリス溶接



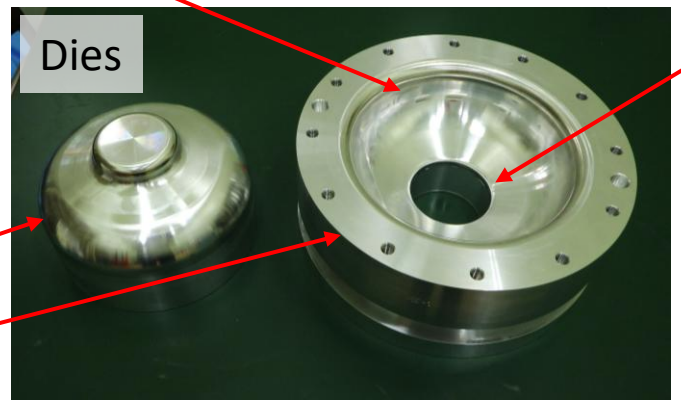
赤道溶接



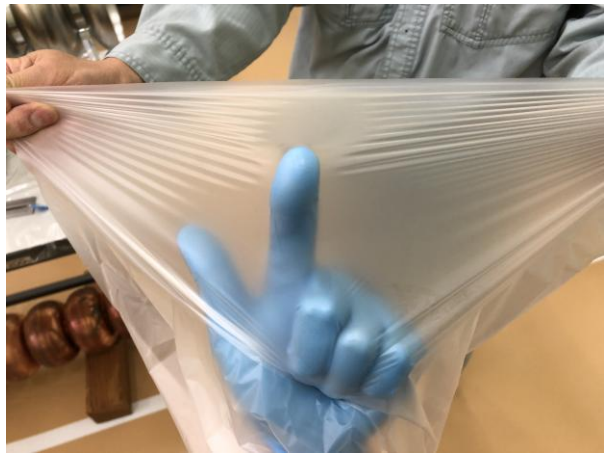
Fabrication: Stamping

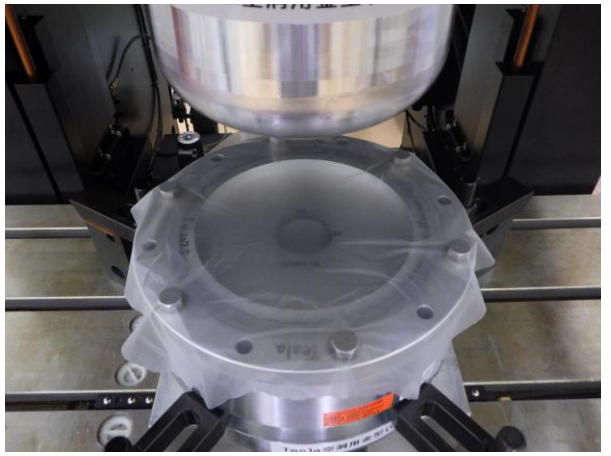


Stamping process has the highest risk of damaging surfaces. Thickness changes as -0.3mm at the iris and + 0.3mm at the equator. Dies' design is carefully considered using FEM analysis.









A plastic soft sheet is inserted between a disk and a die.

Fabrication: Chemical polishing (CP)

- In order not to contaminate impurities on the cavity surfaces, all cavity components are chemically polished before EB welding.
- This process is very dangerous but extremely important.



HNO_3 + HF (H_2O) + H_3P0_4



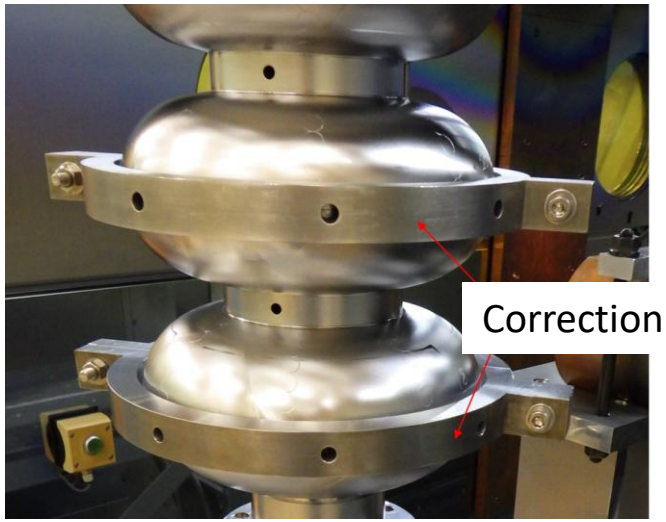
Before

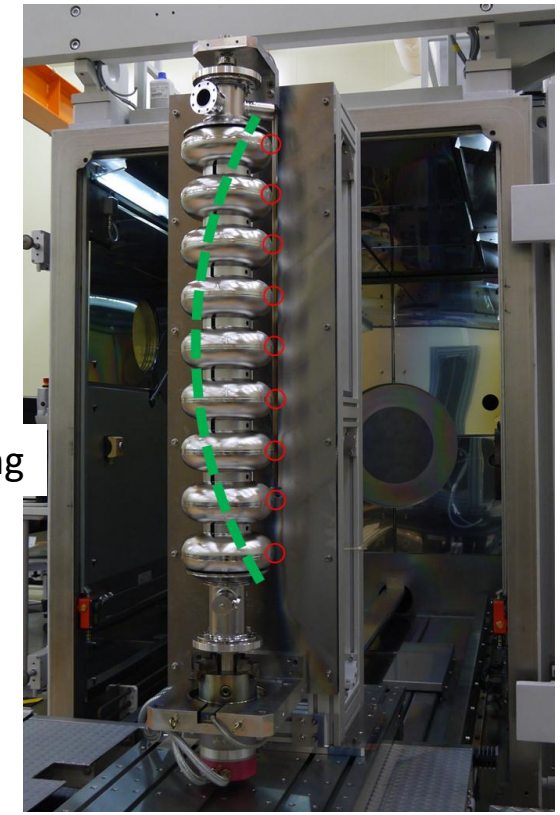


After

Fabrication: EB welding

- Melting temperature of Nb is 2477 degC.
- Electron beam welding (EBW) has enough high power to melt Nb parts. Since the EBW is performed under vacuum so contamination of impurities and oxidation at welding parts can be avoided.

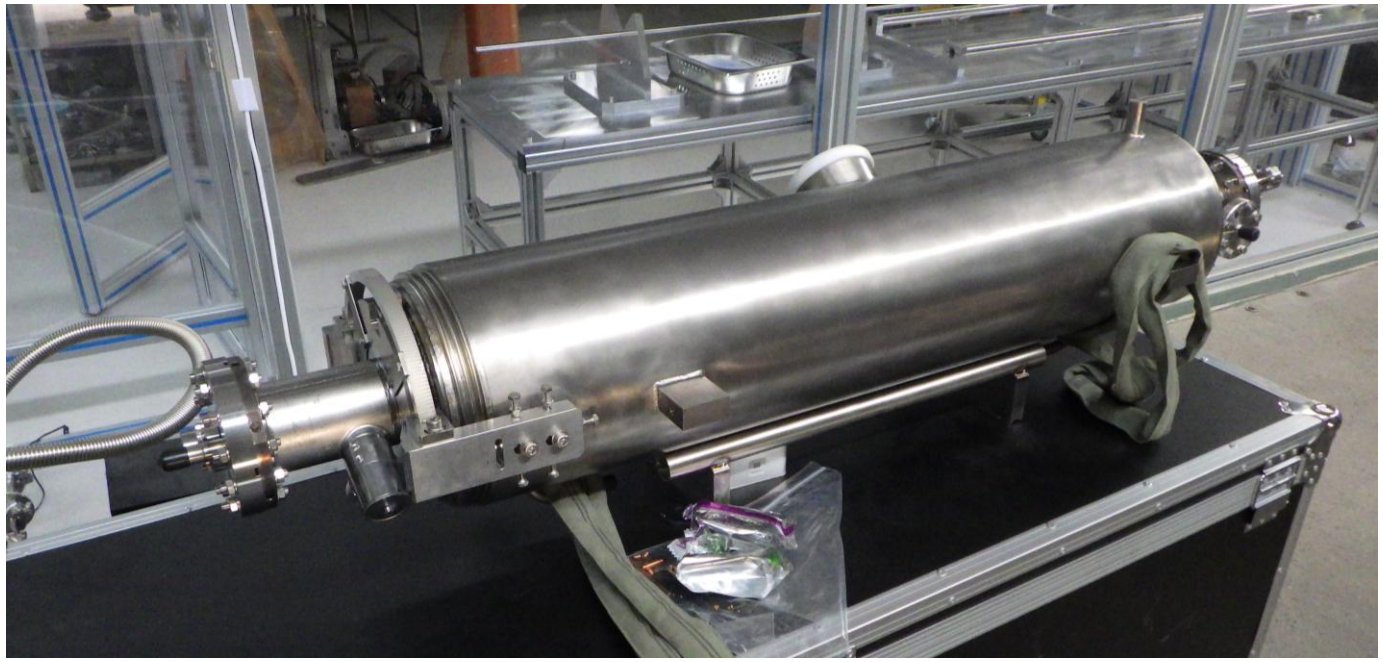


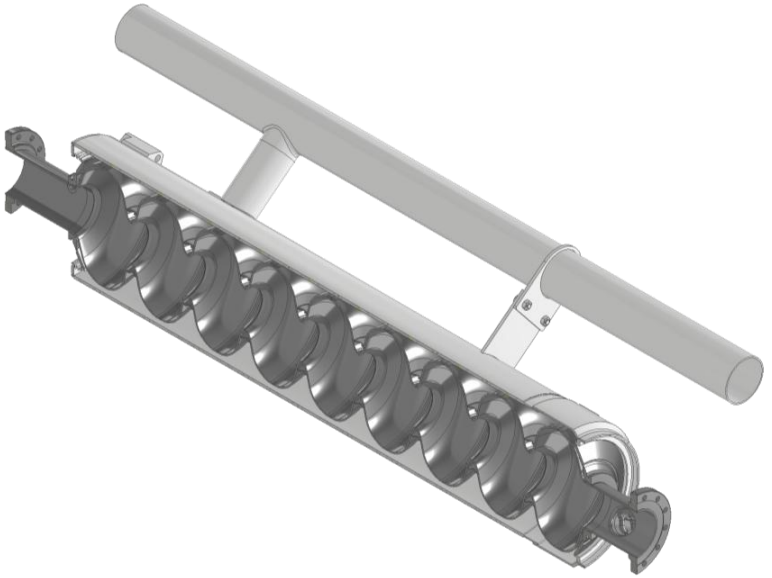




Fabrication: Jacketing

- After completion of bare cavity assembly, external pressure test is performed.
- A helium jacket is welded on the bare cavity which passed above test. Argon gas is purged to avoid oxidation inside the cavity.
- Leak test and pressure test are finally performed to pass the high pressure regulation codes. (Gas helium has 800 times larger volume than liquid helium.)



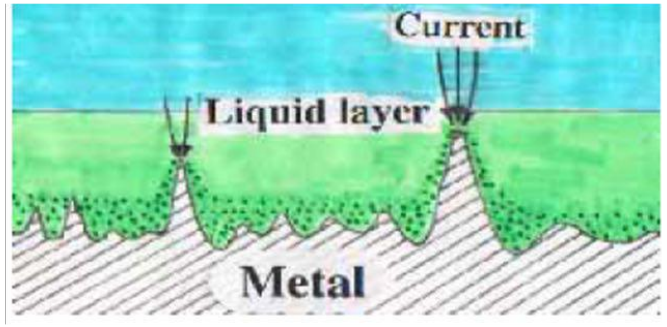


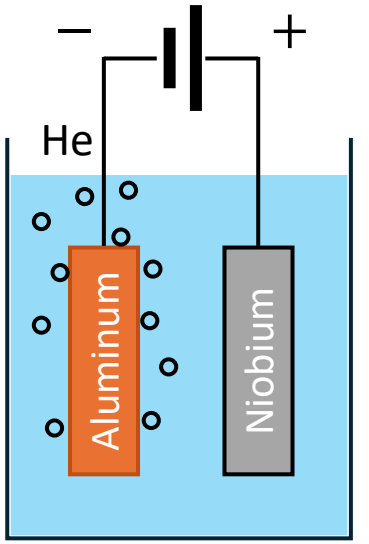
Surface treatment: EP

For cavity R&D, we use bare cavities without helium jacket.

- Electropolishing (EP)

➢Anode(+): Nb, Cathode(−): Aluminum,
EP solution: H_2SO_4:HF = 10:1





➢Chemical reaction $2\mathrm{Nb} + 10\mathrm{HF} + 2\mathrm{H_2O} \rightarrow 2\mathrm{H_2NbOF_5} + 5\mathrm{H_2}$
Nb dissolves into EP solution and hydrogen is produced.

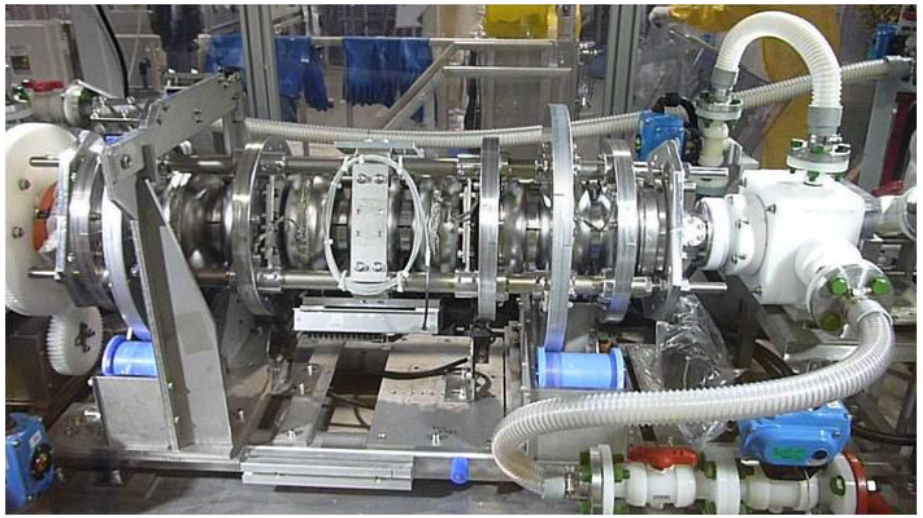
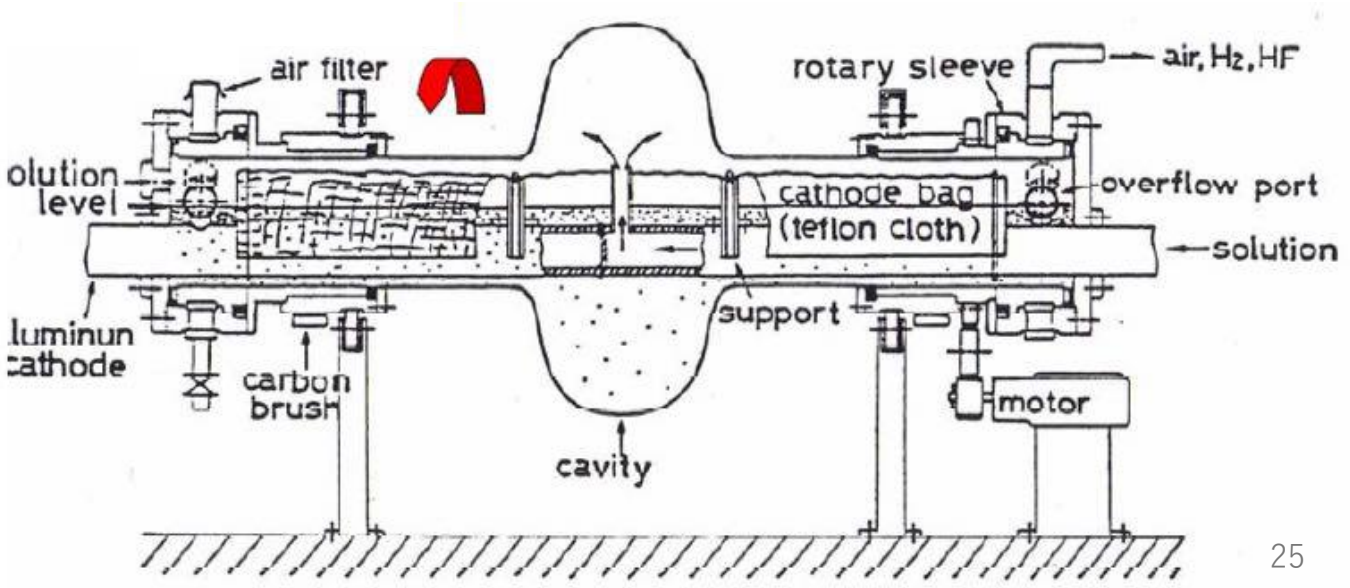


Photo in KEK



Surface treatment: Baking

- Hydrogen Q-Disease

➢Niobium readily absorbs hydrogen.

➢Hydrogen produced by EP and CP processes is absorbed by the niobium surface, but, with this situation, the Q value of the cavity becomes significantly low.

➢This is considered to be due to the poor superconducting properties of niobium hydrate.

- High temperature baking

➢Cavities must be baked at high temperatures, typically 800 degC, to remove hydrogen from niobium surfaces.

➢High temp. baking is also important to release manu-facturing stress.





Surface treatment: HPR and Assembly

- If dusts are on the cavity surfaces, they become sources of field emission when high surface electric field is applied. Field emitted electrons are accelerated by stored cavity energy and become dark current.
- Cavity must be very clean, especially for inner surface. 8-10MPa ultra pure water hit and rinse inside cavity (High Pressure Rinsing, HPR).



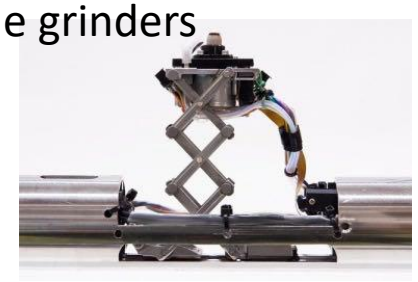
- The cavity must be kept clean so assembly works are done in the clean room (ISO class4).
- Components (flanges, bolts, antennas, bellows, etc…) are washed using ultrasonic bath and ultra pure water.

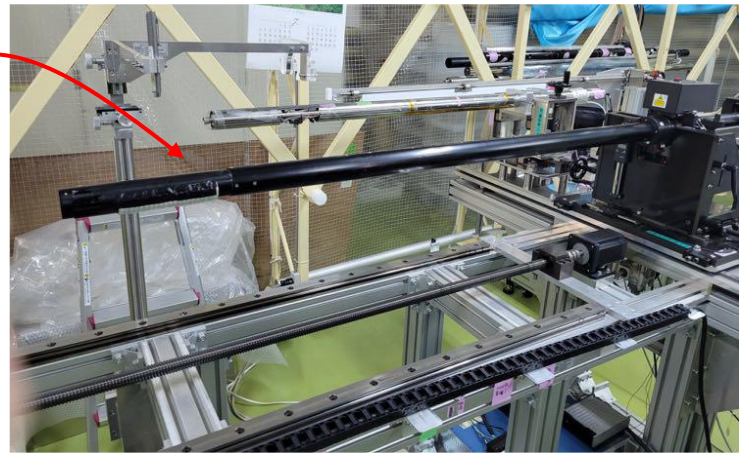


Side notes

- Inner surface inspection camera

Fine grinders

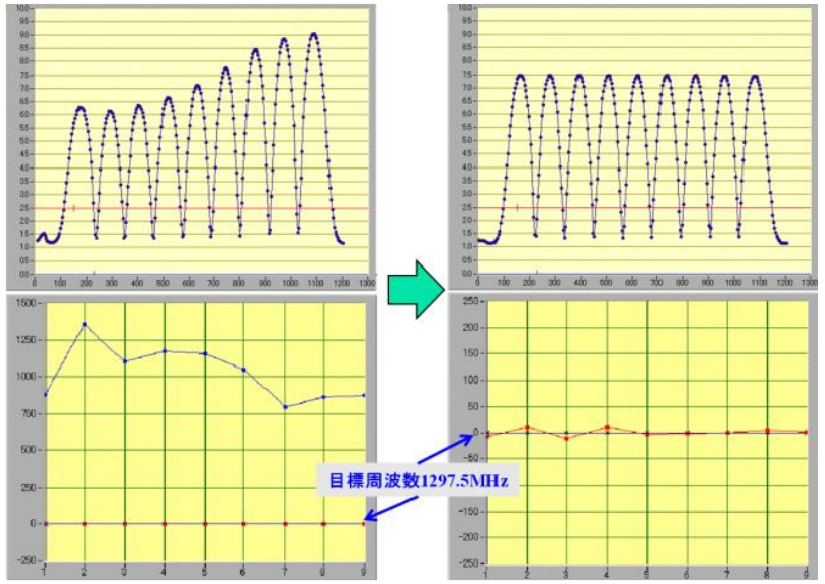






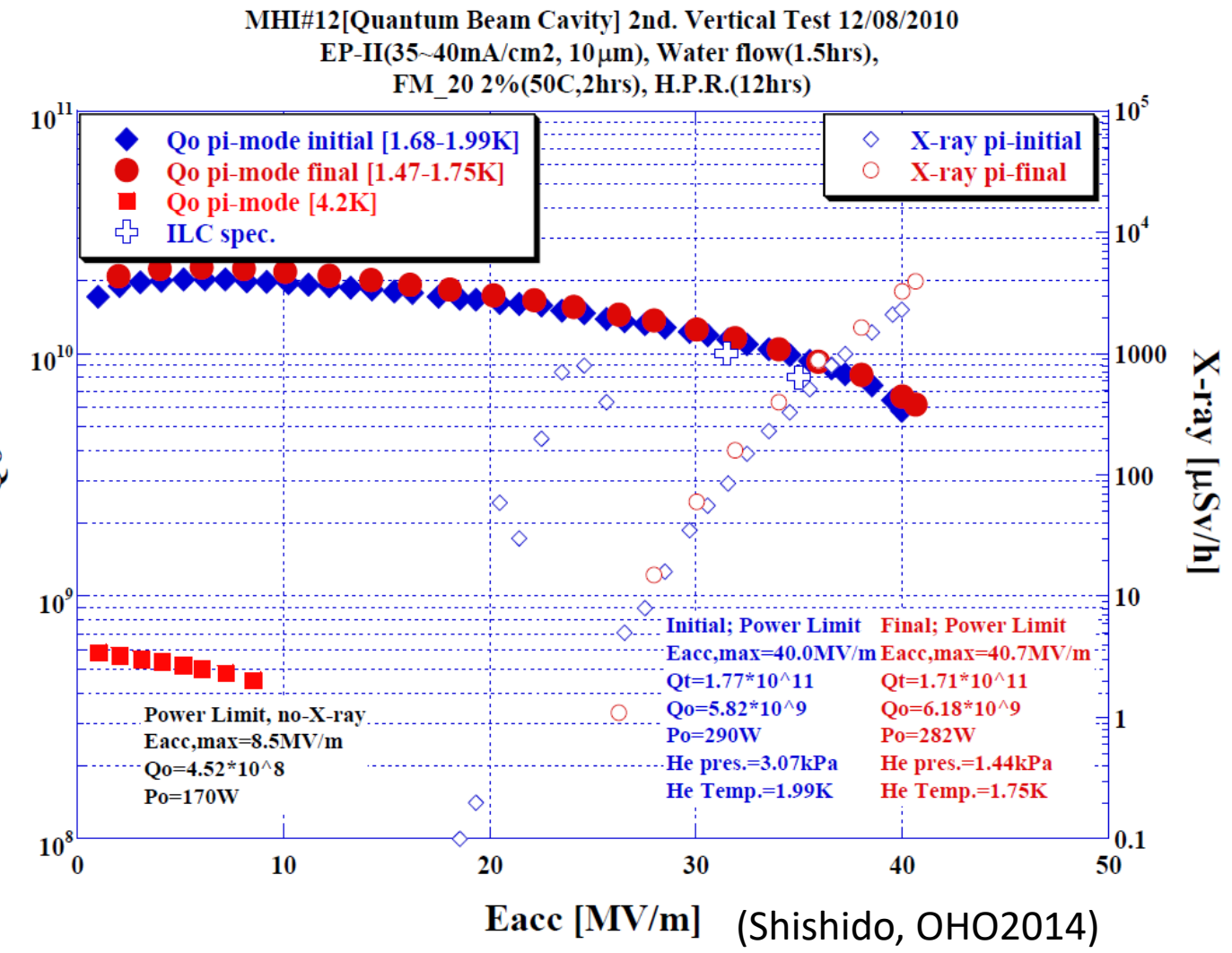
- Frequency tuning machine





Cavity testing: Q_0-Eacc curve

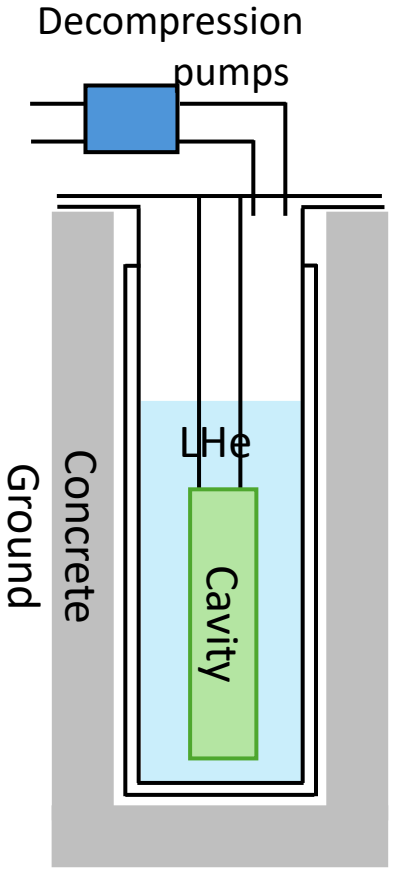
- "Testing cavity" is equal to measuring Q_0-Eacc curve.
- ILC requirements
  VT : **35MV/m at Q0 0.8x10^{10}**
  CM: **31.5MV/m at Q0 1.0x10^{10}**
- X-ray radiation is also recorded.
- Temperature sensors array is also installed to identify quench location.

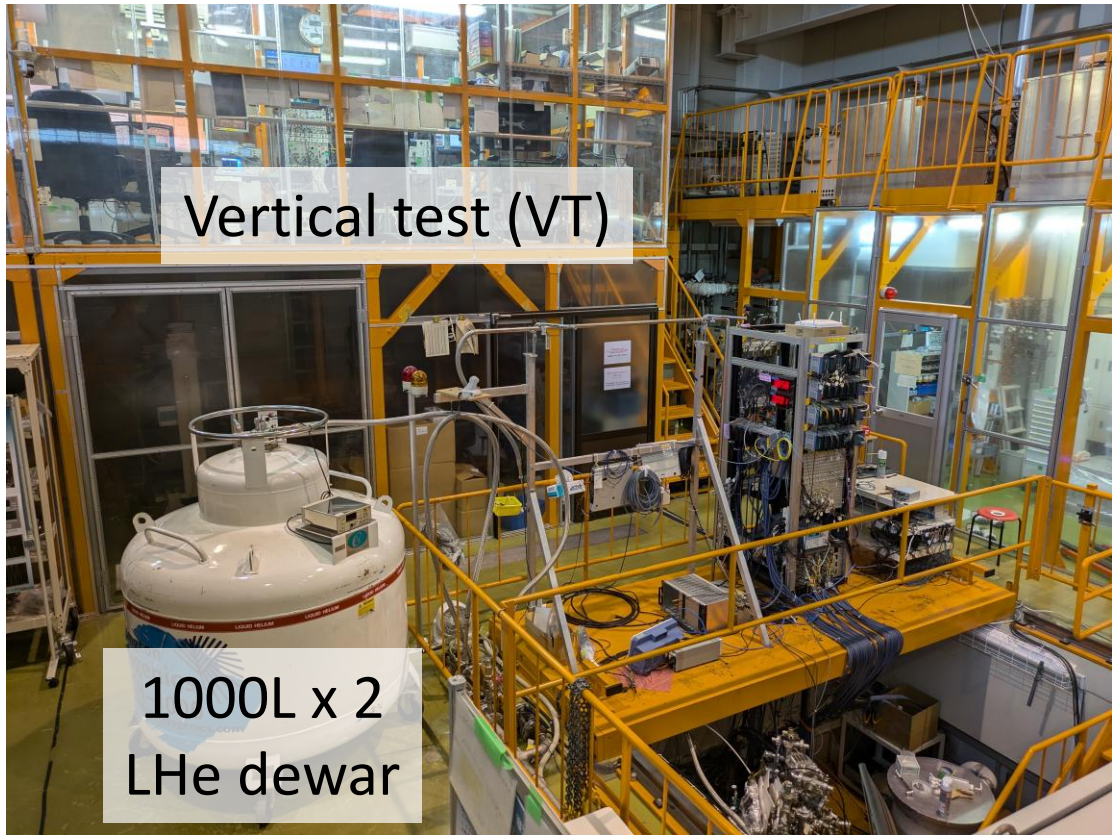


(Shishido, OHO2014)

Cavity testing: Vertical test (VT)

- Cavities are cooled by liquid helium in vertical underground cryostat.
- Since the operation temperature is 2K, 4.2K liquid helium is decompressed to decrease temperature to 2K.

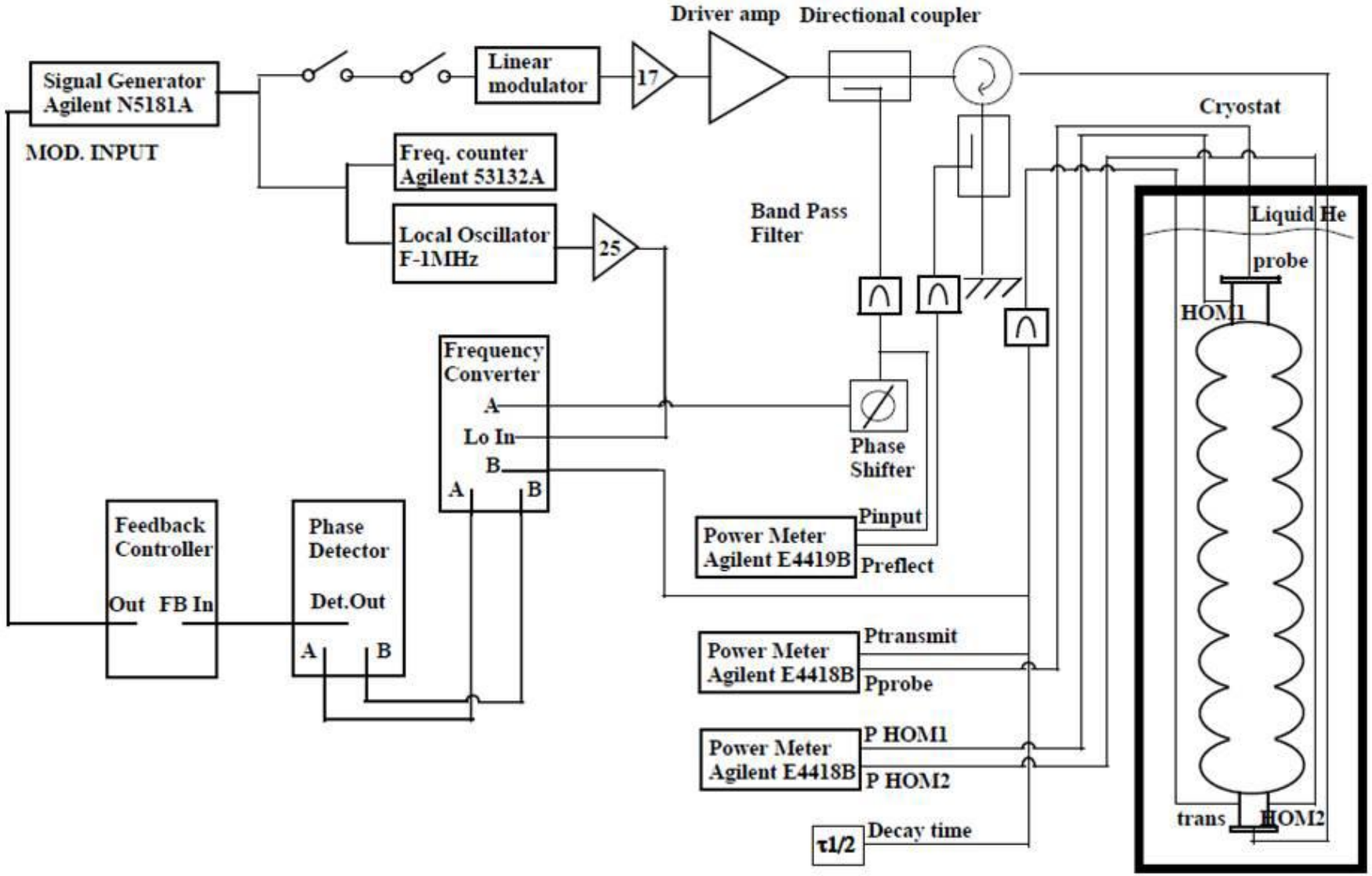






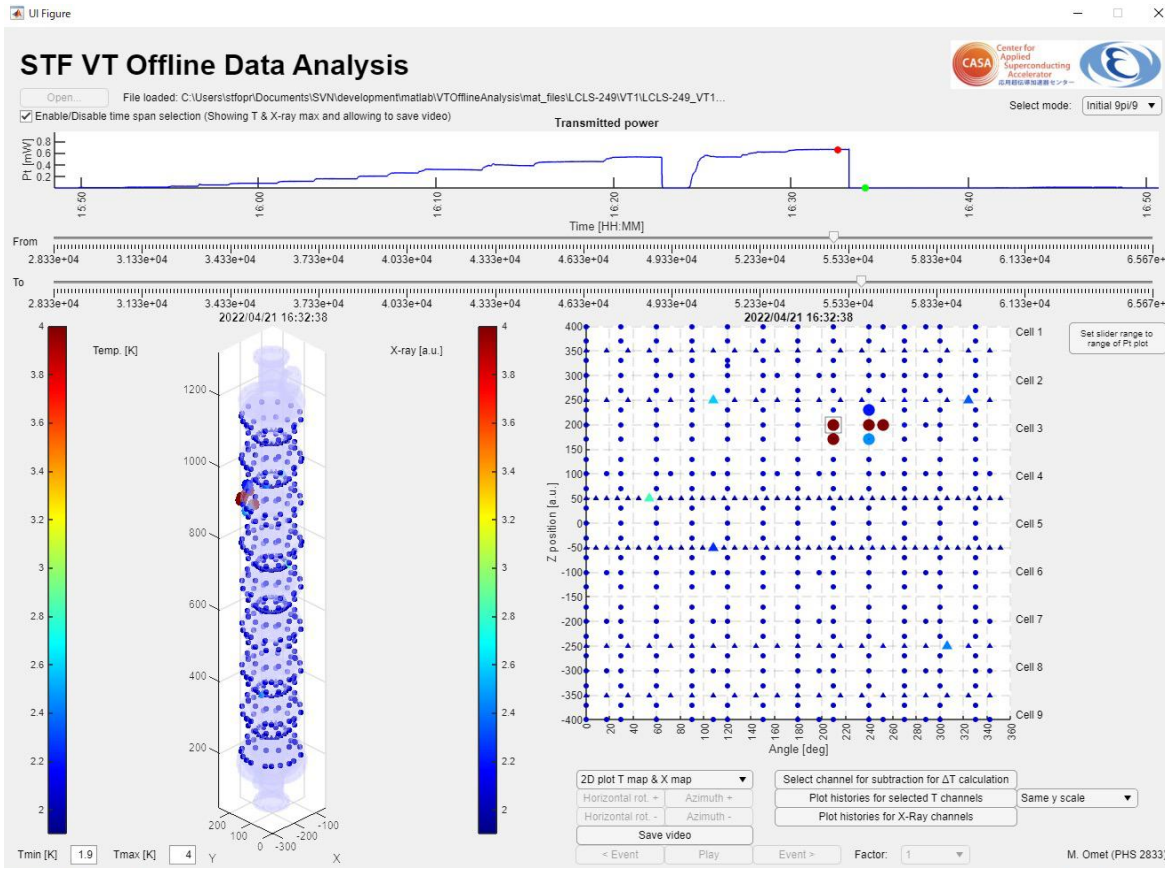


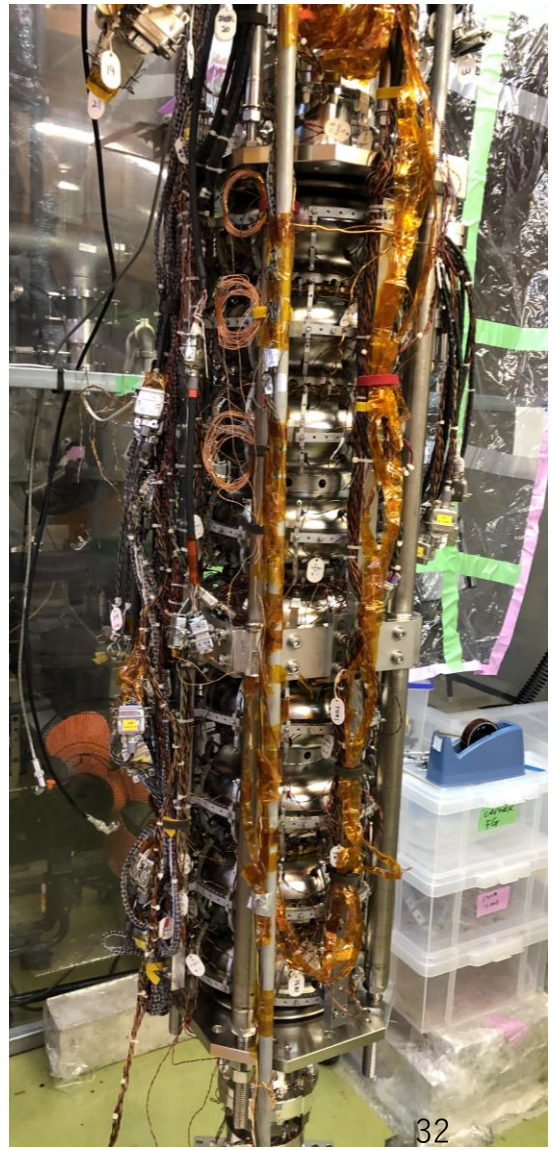
Cavity testing: RF circuit



Cavity testing: Sensors mapping

- Many temperature sensors are used to identify the quench position. Many X-ray sensors identifies the position of field-emitting source.



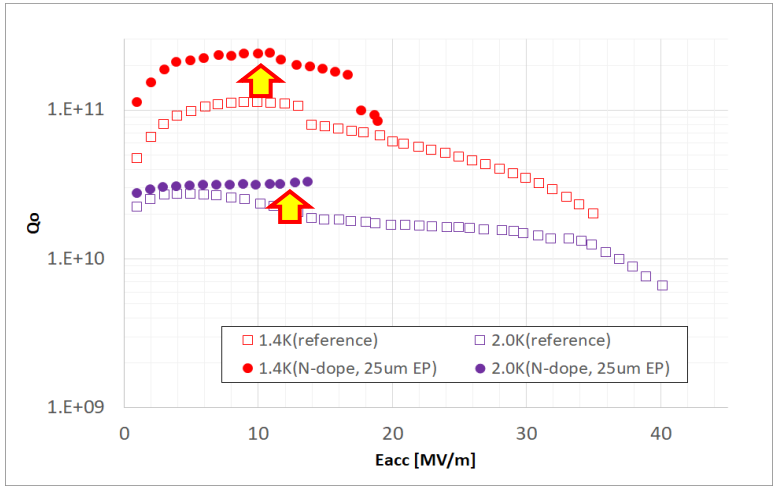


最近の空洞性能

Courtesy: H. Ito, K. Umemori

◆窒素ドープ

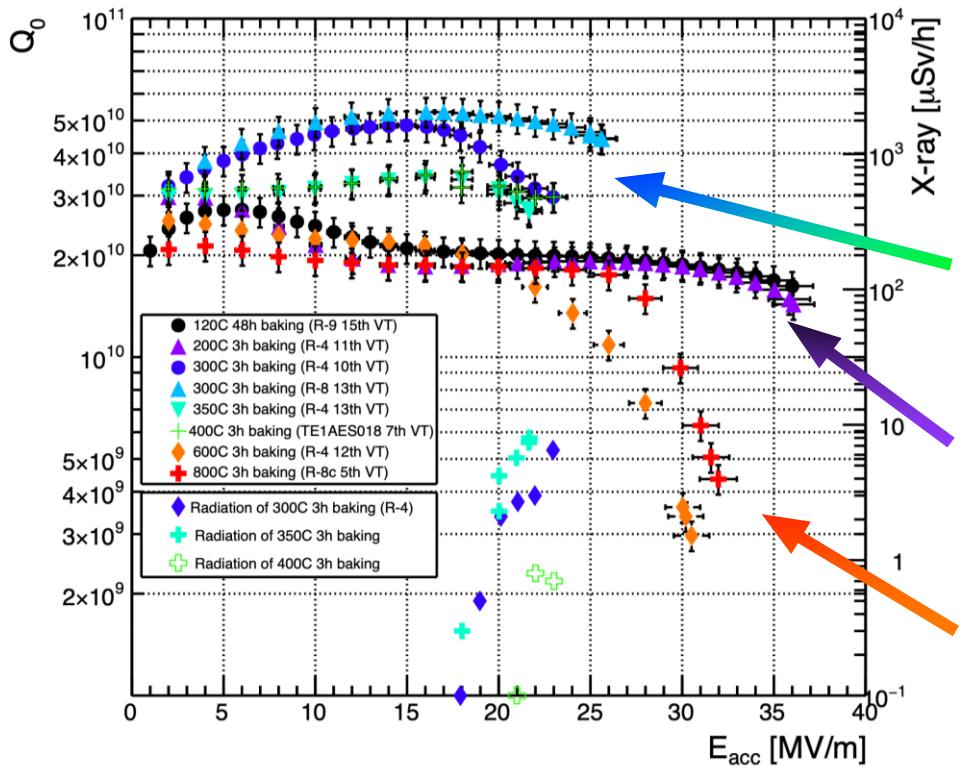
KEK 1.3GHz単セル空洞での窒素ドープの結果→



高温ベーキング(800°C)の際に、短時間(数分～数十分)真空炉に窒素を導入

数10umの深さまで窒素が入り込む。表面層は電解研磨で落とす。

⇨ Q値は向上　加速勾配は減少



◆熱処理温度依存性

真空炉ベーキングの温度・時間により、空洞性能が大きく変わることが発見された。**（KEK発）**

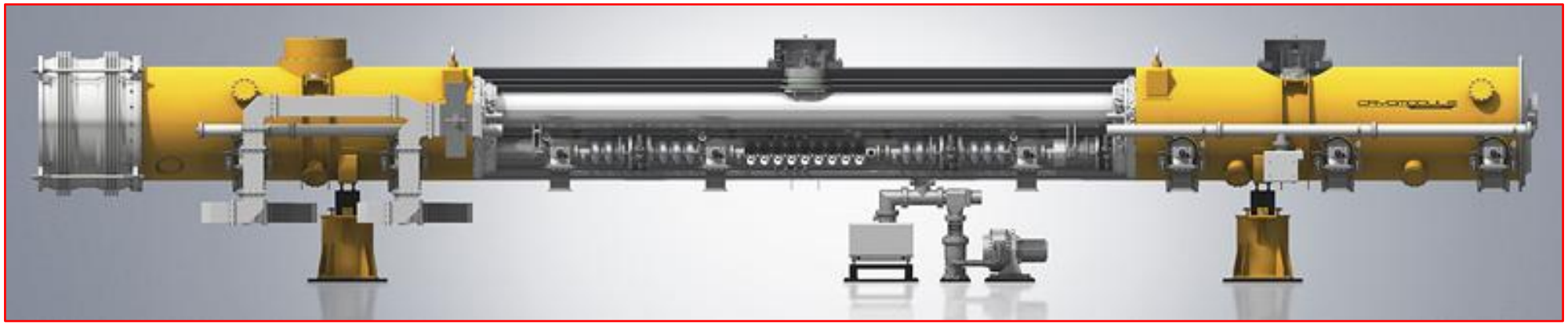
300 ~ 400°C, 3h
- 非常に高いQ値とanti-Q slopeが得られる。
- 300°C熱処理では、2K, 15MV/mで5e10を超えるQ値が得られた。

Standard recipe (120°C, 48h), 200°C, 3h
- 標準処理(120°C, 48時間 ベーキングの結果に近い。
- 加速勾配は一番高い。

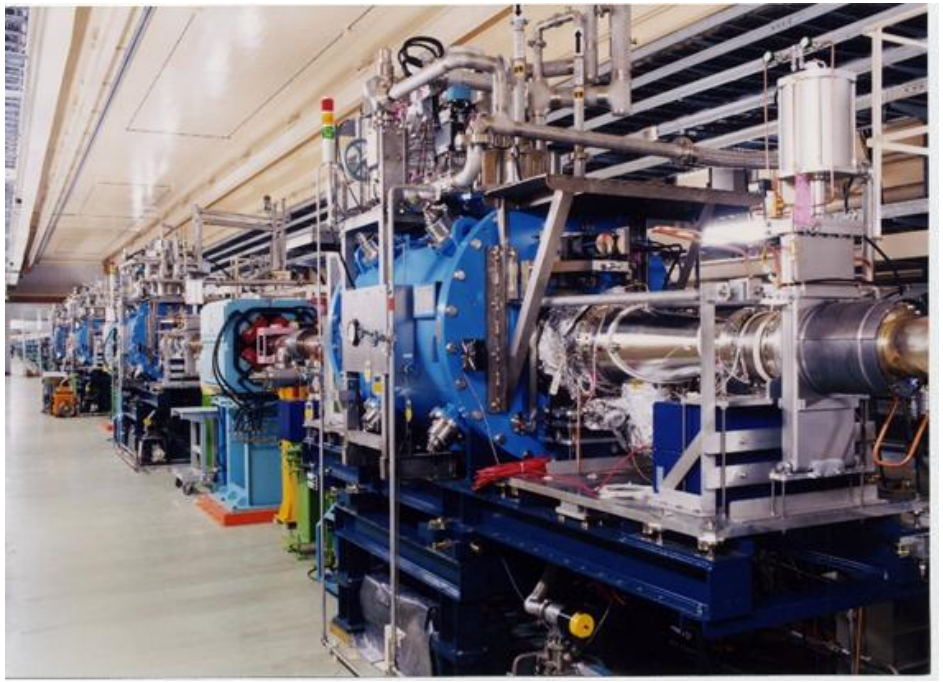
600 ~ 800°C, 3h
- 高いQ値は得られない。
- 25MV/mを超える加速勾配でQ値が劣化

高Q値、高Eaccに向けて、熱処理条件の最適化を理論と実験の双方から実施中

Cryomodule (CM)



ILC CM



SuperKEKB CM, KEK, Japan

A SRF CM consists of

- SRF cavity
- RF coupler
- Magnetic field
- Thermal shield
- Vacuum vessel
- SC magnet

+

Cryogenics



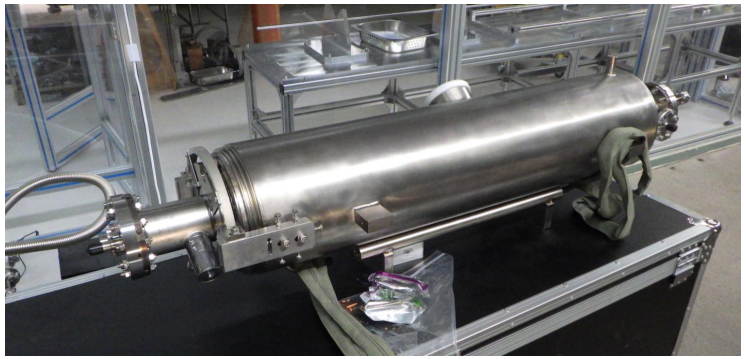
SRILAC CM, RIKEN, Japan

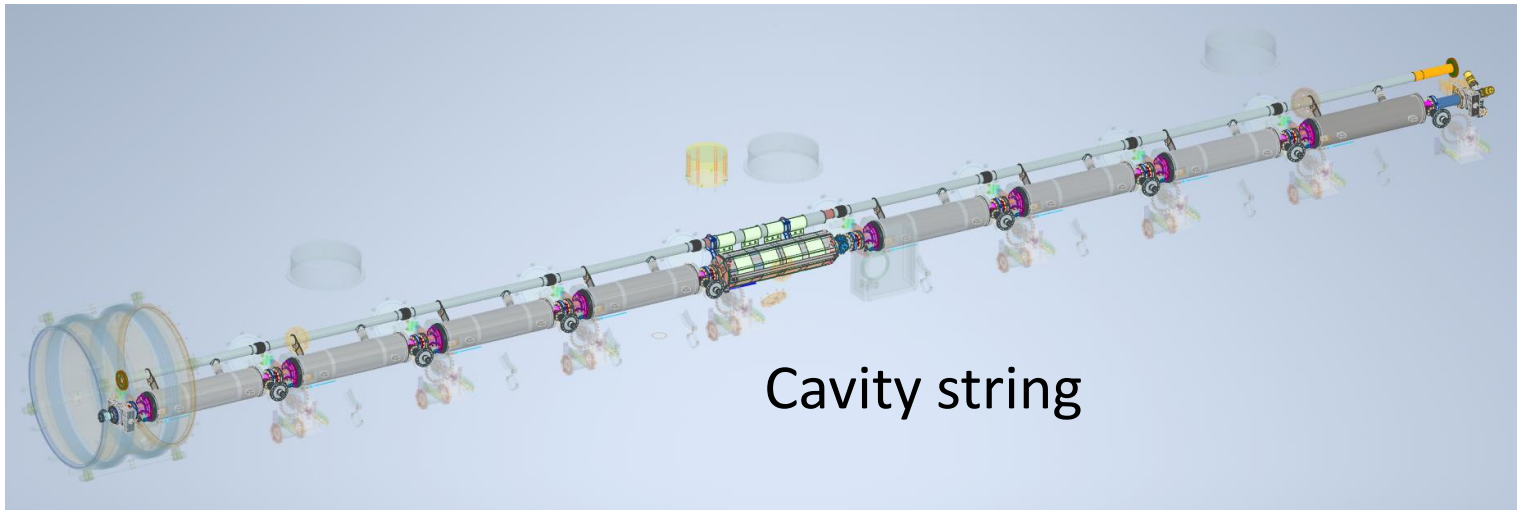
CM: SRF cavity

- Type A CM: 9-1.3 GHz cavities
- Type B CM: 4-1.3 GHz cavities





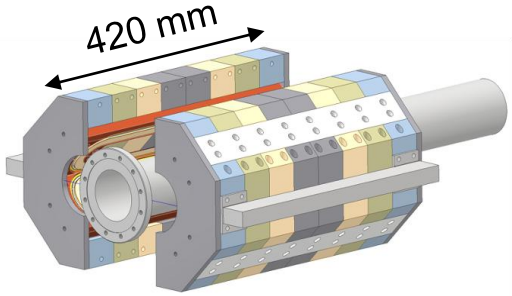




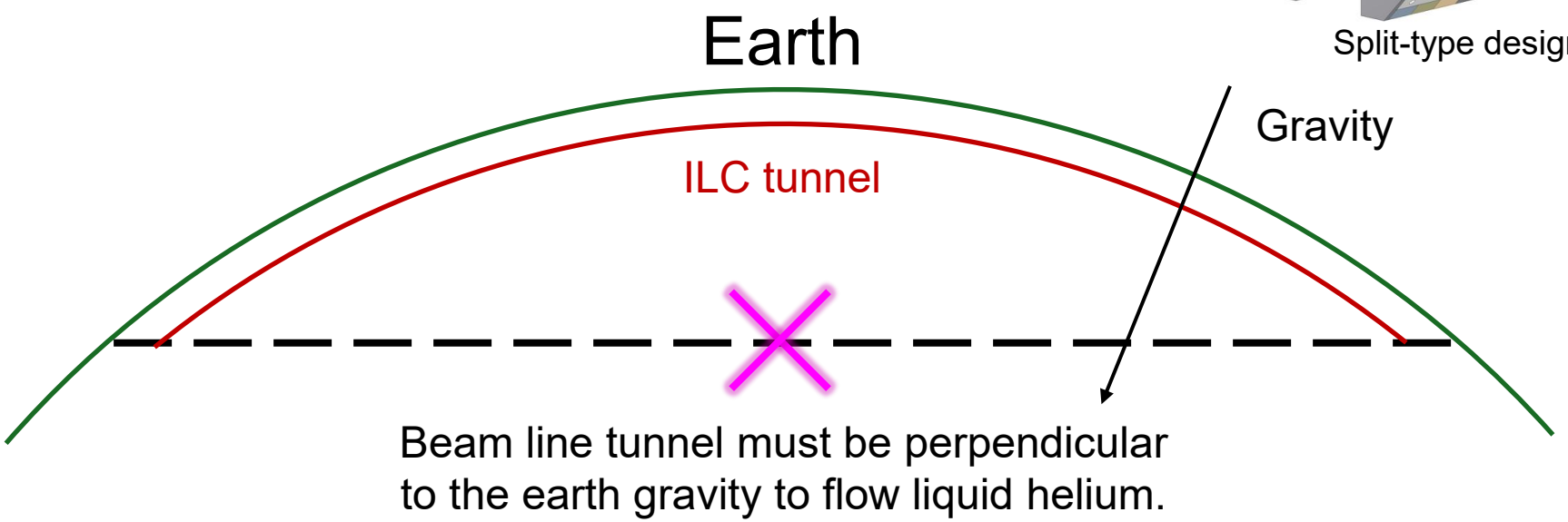
CM: Superconducting magnet

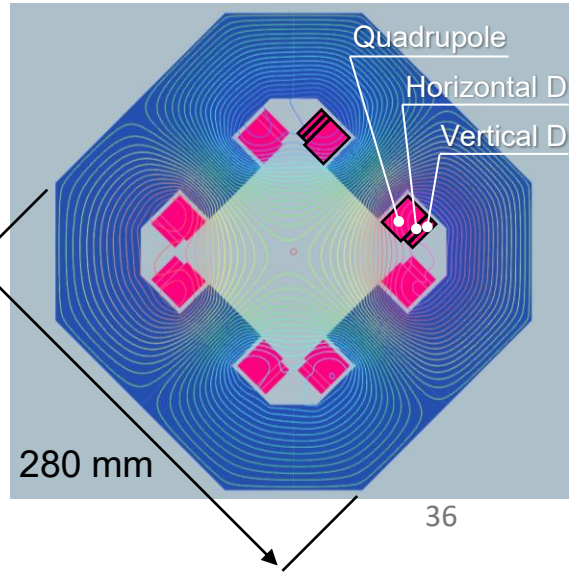
- Combined function: Quadrupole, Dipole horizontal, Dipole vertical
  - Quadrupole: Beam focusing
  - Two Dipoles: Beam handling, bending along with earth curvature
- Split type design to enable assembly outside cleanroom
- Precise magnet axis with stability of 5um
  - ➢ Iron-dominant (superferric) design to maintain axis position over cooling

Yoke	
Overall length	420 mm
Field length	~300 mm
Quadrupole	
Field gradient	40 T/m
GL integral	13 T
Current (Max)	55 A
Dipole	
Field	0.1 T
B0L integral	~0.03 T
Current (Max)	37 A



Split-type design





CM: SRF cavity string assembly

- Precise and well considered methods must be used to prevents dusts into cavities.

➢Human is the biggest dust source in the clean room.

➢Everything needs to be air-blown with particle counter. (0.3 um or more particles must be zero)





KEK STF

➢Robotics is recently introduced to take over human.



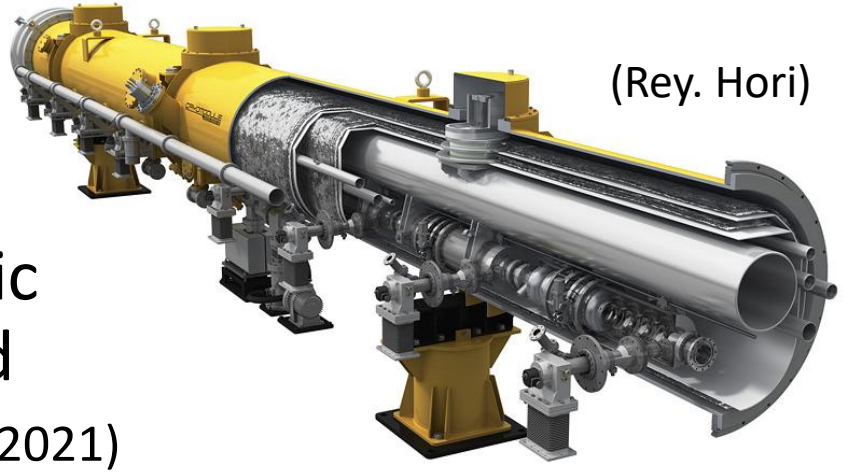
KEK COI



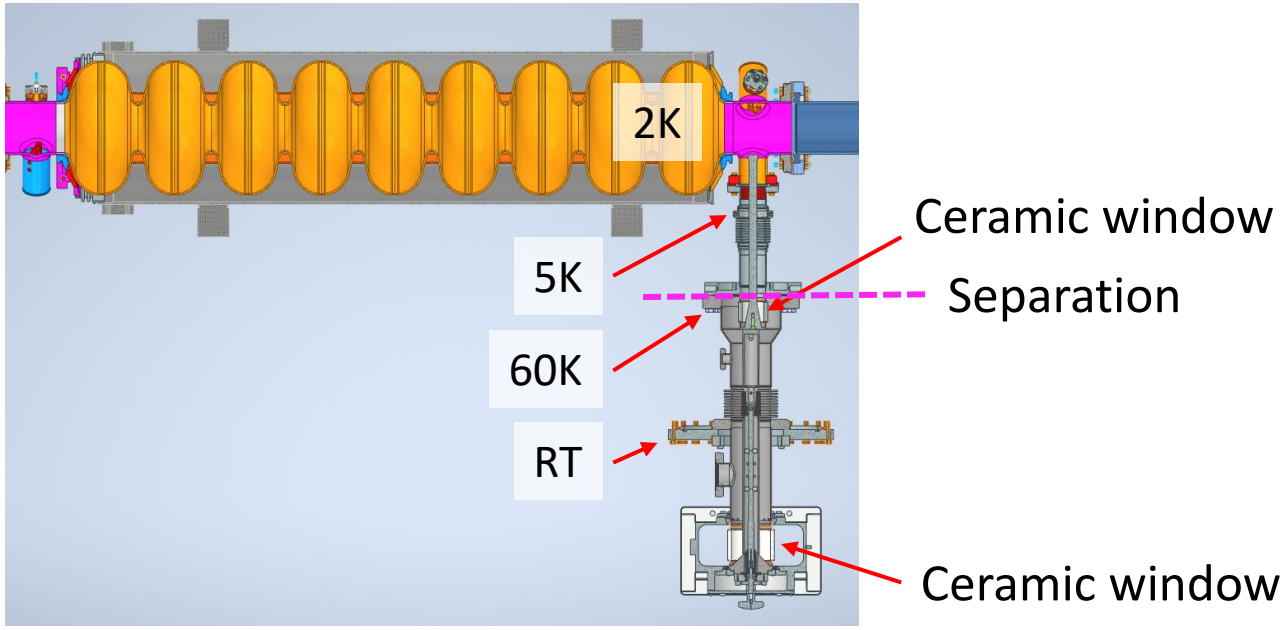
CEA Saclay

CM: RF coupler

- The Power Coupler has to transfer the RF power of the generator into the cavity ensuring the beam vacuum integrity. In addition, with SRF cavities, power couplers have to cope with specific requirements such as cold to warm transition and integration with the cryomodule. (Eric Montesinos, SRF2021)



(Rey. Hori)





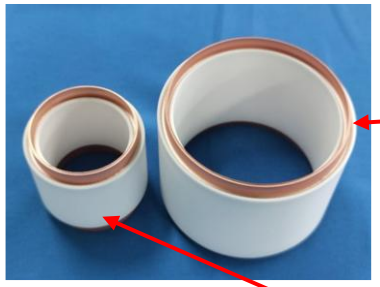
CM: RF coupler

Motor enables remote tuning of coupling by moving inner conductor.

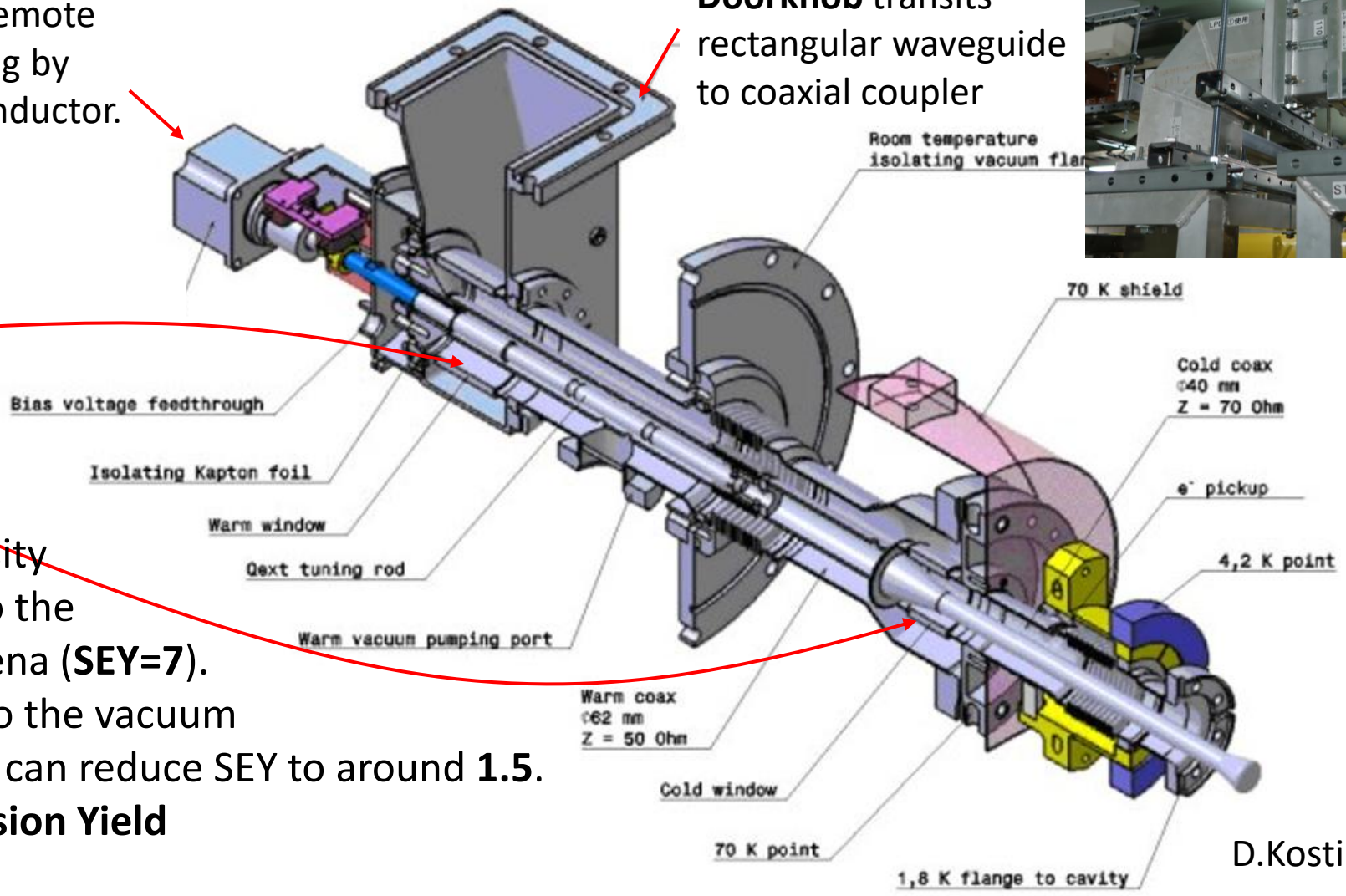
Doorknob transits rectangular waveguide to coaxial coupler



Ceramic windows



PRAB **25**, 113501 (2022)



Ceramic has a propensity to provide electrons to the multipacting phenomena (**SEY=7**).

TiOx or TiN coating to the vacuum surface of the ceramic can reduce SEY to around **1.5**.

***SEY: Secondary Emission Yield**

D.Kostin, SRF2013

CM: Frequency tuner

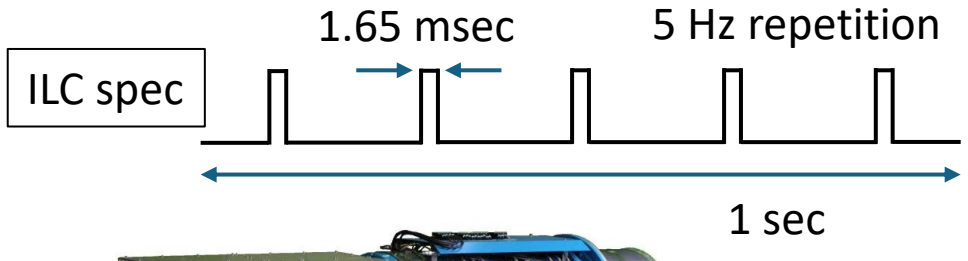
- The SRF cavity tends to be easily changed its own frequency by:

➢thermal shrink during cooling from room temperature to 2K,

➢forces from electro-magnetic fields inside the cavity (=Lorentz Force) when RF power is supplied,

➢fluctuations of pressure in the surrounding liquid helium bath,

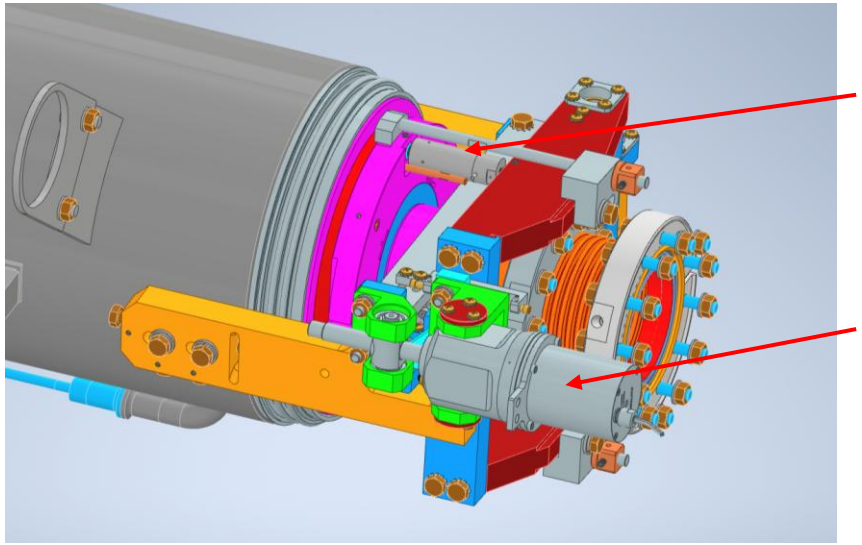
➢mechanical vibrations from external sources such as vacuum pumps.





Klystron

Double levers tuner system

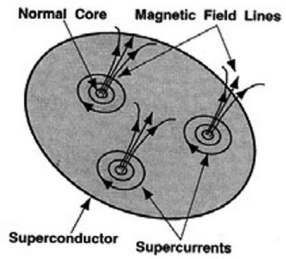


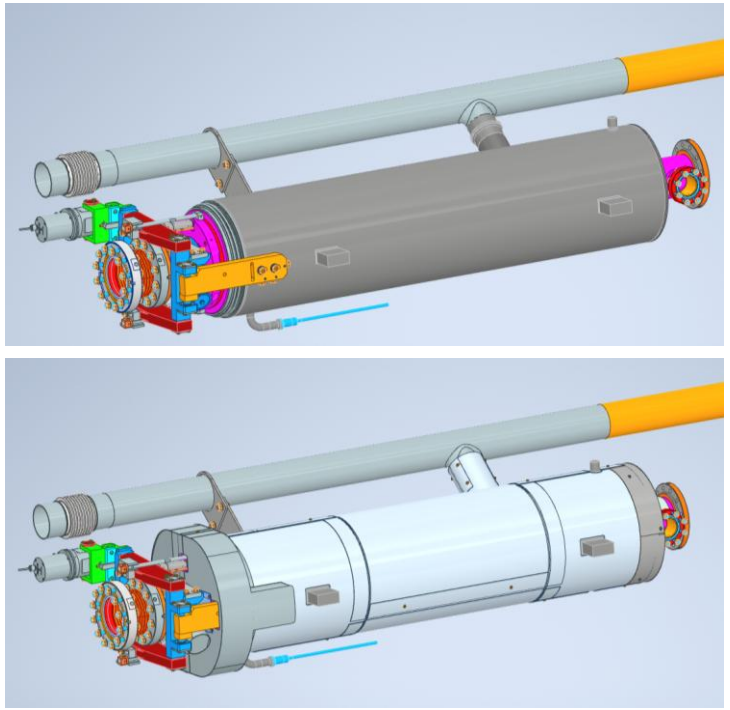
Piezo
Speed: fast
Range: small

Motor
Speed: slow
Range: large

CM: Magnetic shield

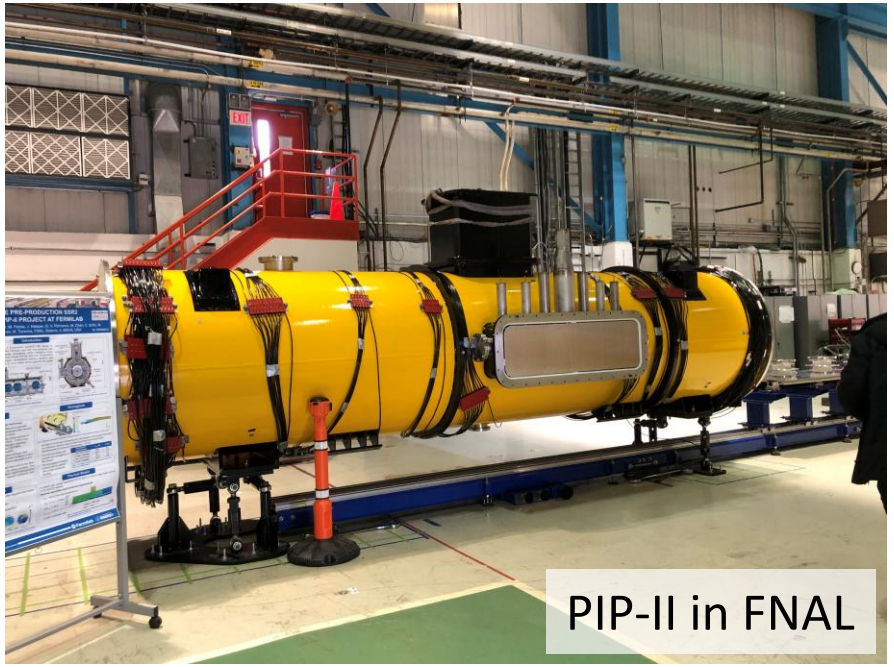
- Magnetic field is the greatest enemy for the SRF cavity.
- Magnetic flux trapping during superconducting transition largely deteriorate cavity performance because trapped fluxes act as R_{res}.



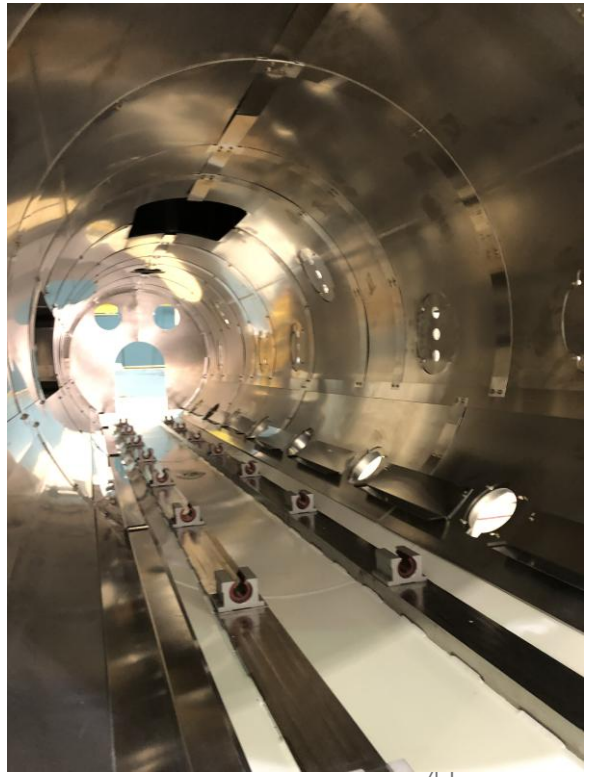


One shield for one cavity

No shield for each cavity, but a global shield covers overall cavity string.



PIP-II in FNAL

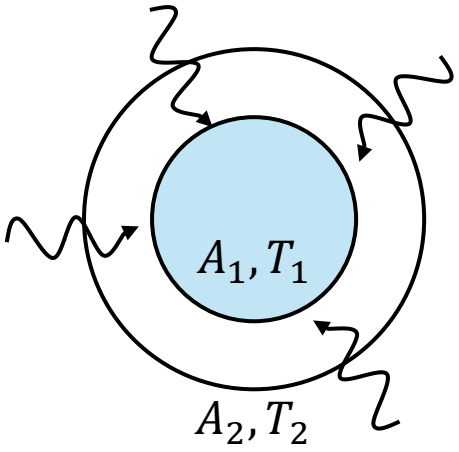


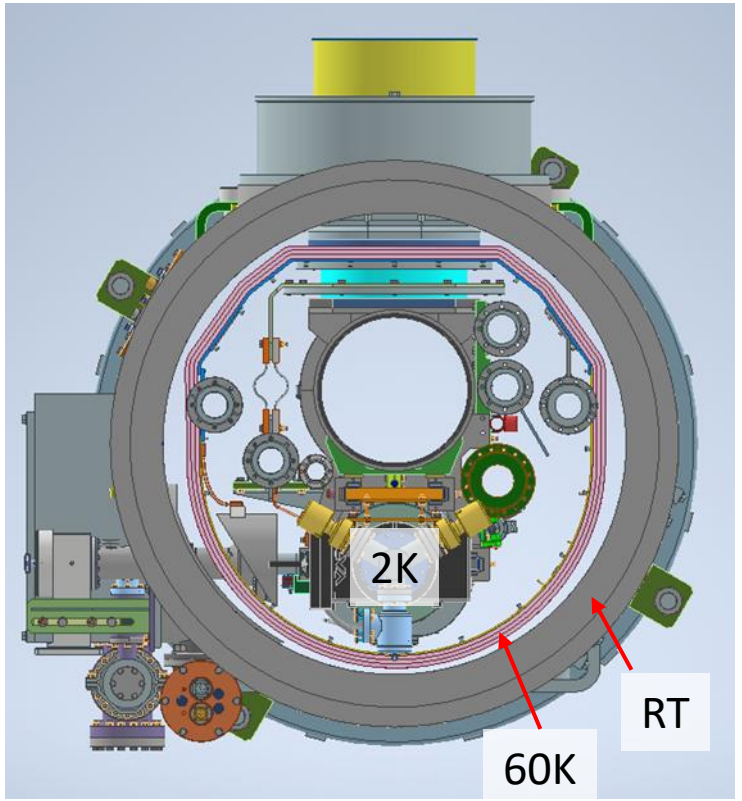
CM: Thermal shield

- Thermal shield is for shielding thermal radiation from high to low temperatures.
- It is also used as a base for anchoring cables to reduce thermal conduction heat load.

- Stefan-Boltzmann law
  For 2 enclosed cylinders or spheres,

$$Q_{1_2} = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2}\left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}$$





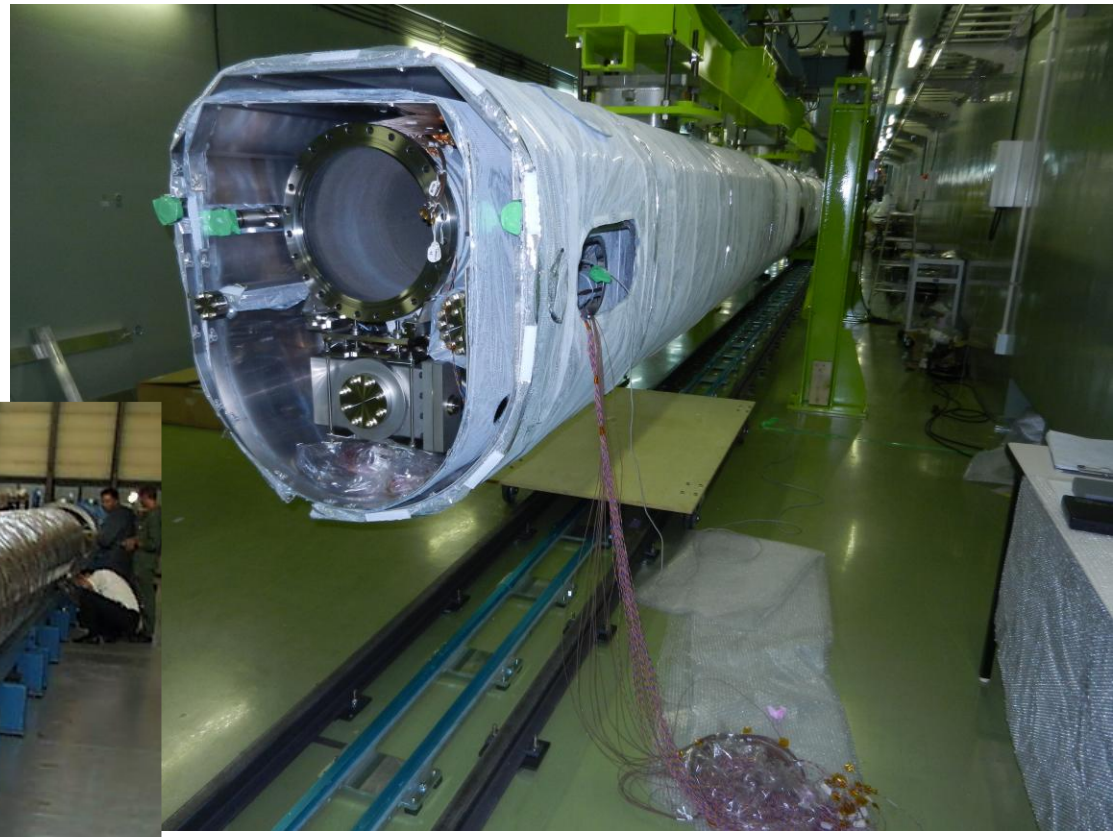
N-layers Multi layer insulation (MLI) can reduce radiation to 1/N+1. MLI stacks high emissivity aluminum layers and thermal insulation layers. Typically, 30 layers between RT to 50-80K and 10 layers for 2K.



CM: Thermal shield



CERN



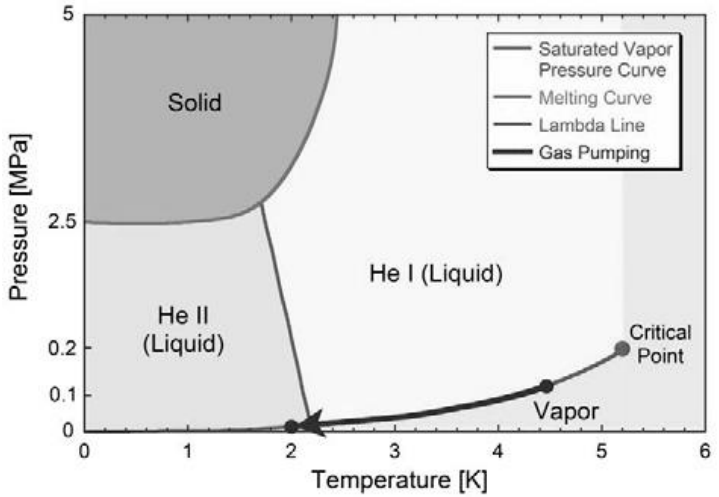
KEK STF



KEK COI

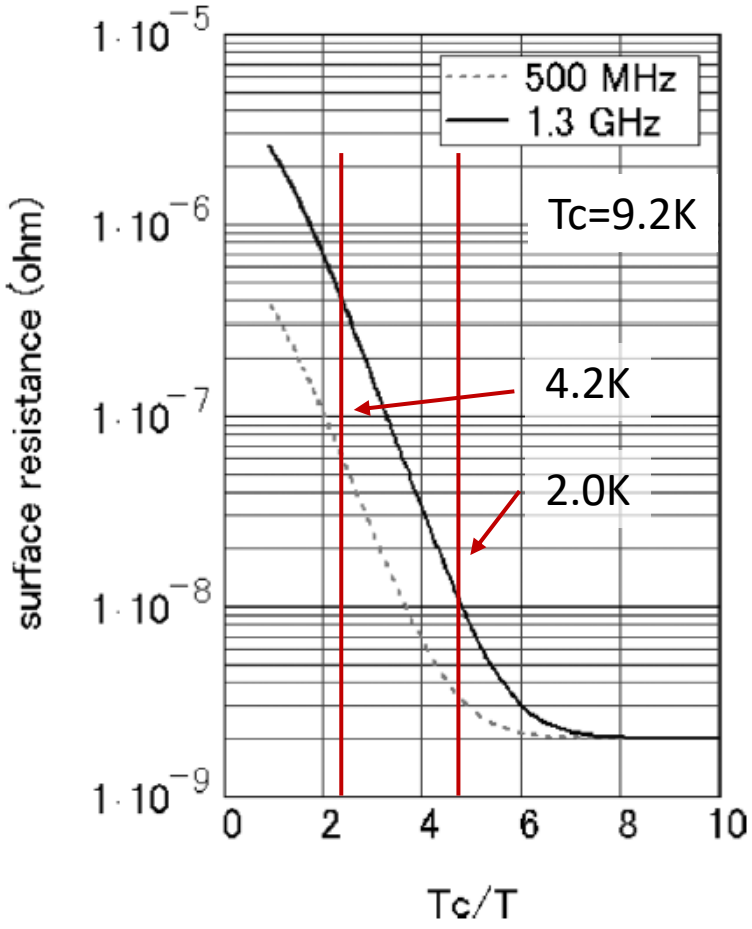
CM: Cryogenics

- Cavities needs to be cooled initially and kept at cryogenic temperature during operation.
- Although 100 MHz range cavities are often operated around 4K, 1.3GHz is typically operated at 2.0K superfluid helium. (E-XFEL, LCLS-II, SHINE, ILC…)
- Thanks to low viscosity, superfluid helium can flow in very narrow gap (a few atom size). **Film flow**
- Superfluid helium has super thermal conductivity so that boiling doesn't occurred and cavities are uniformly cooled.



(Nakai, OHO2014)

2.0 K = 3.13 kPa



$R_{\mathrm{res}} = 2\ \mathrm{n\Omega}$ was assumed.

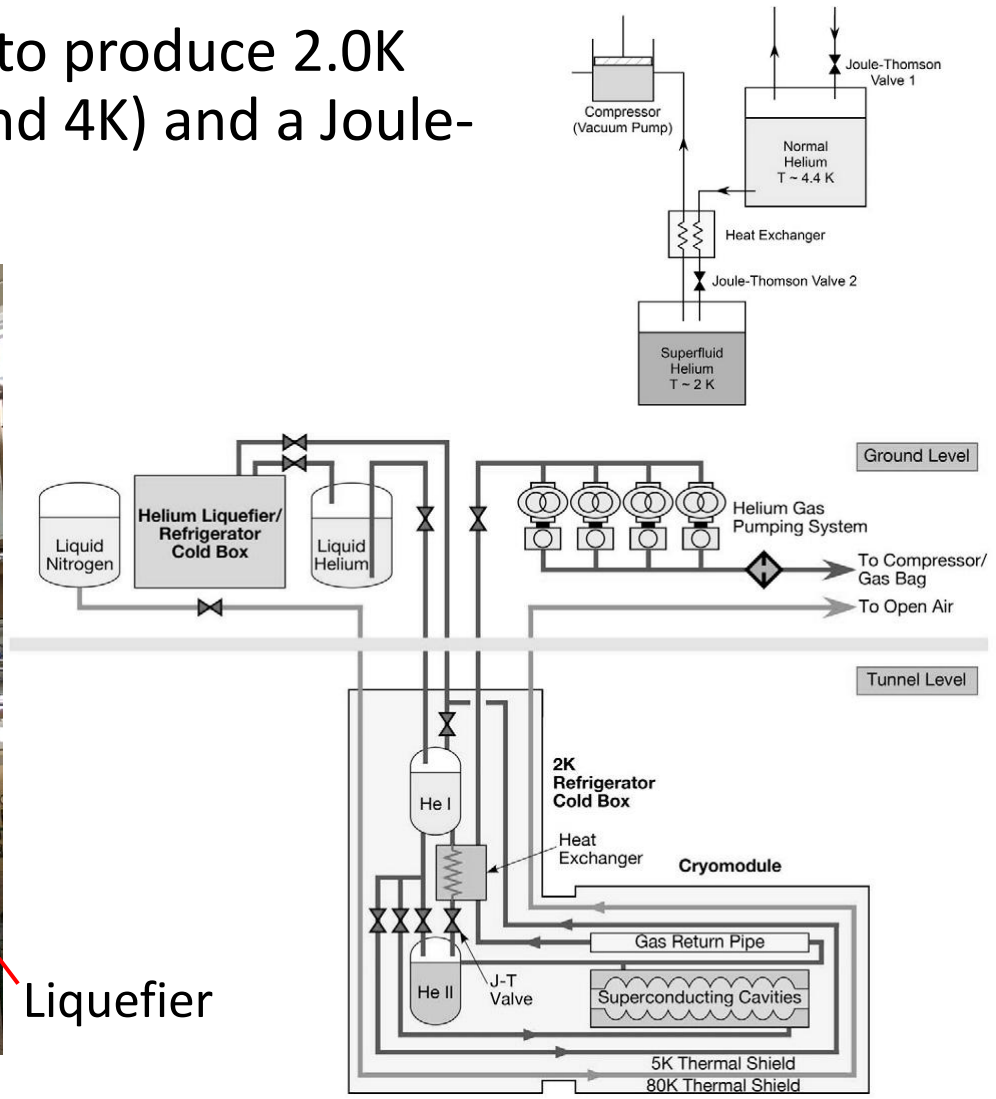
CM: Cryogenics

- Normal helium is decompressed by vacuum pumps to produce 2.0K superfluid helium. A heat exchanger (between 2K and 4K) and a Joule-Thomson valve are inserted in between.



Decompression pumps

4K liquid helium tank



Liquefier

これまでのKEKでのSRF開発

Courtesy: H. Sakai



COI: Nb_3Sn成膜,
大型クリーンブース

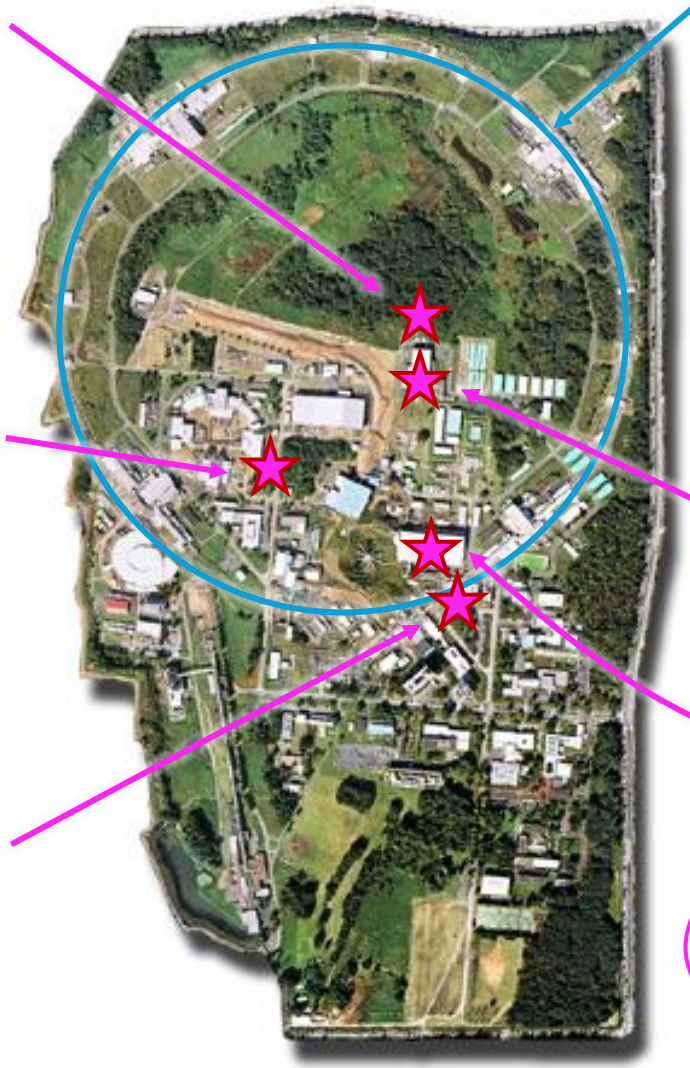


AR東第2: Nb_3Sn伝導冷却



CFF: 空洞製造

KEKつくばキャンパス



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



508 MHz TRISTAN (1989)



508 MHz KEKB (1998)





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

compact ERL (2013-)
エネルギー回収実証、
モジュール試験
産業応用利用でCWビーム運転

STF加速器での技術実証

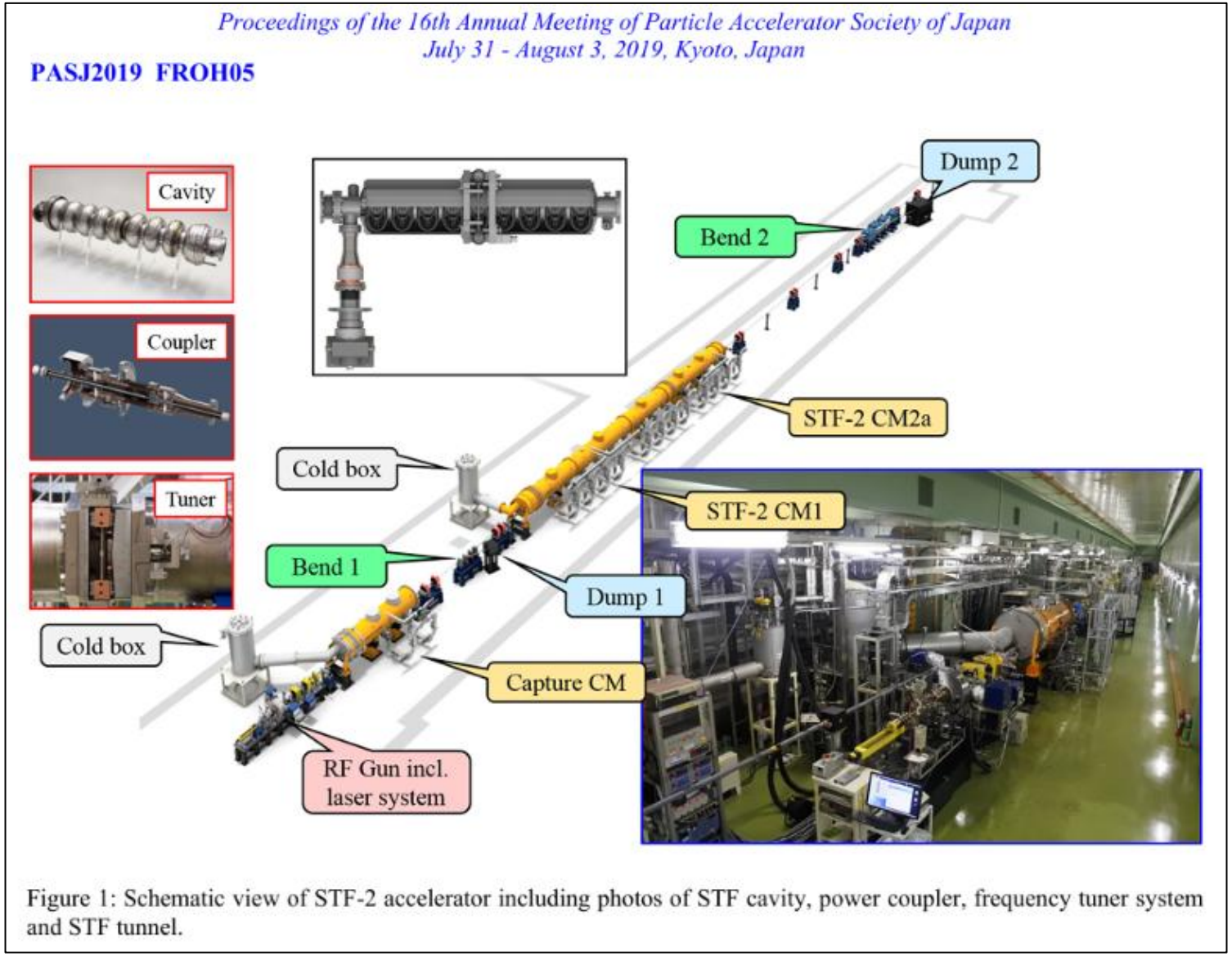


Figure 1: Schematic view of STF-2 accelerator including photos of STF cavity, power coupler, frequency tuner system and STF tunnel.

- STFはILC主線形加速器用超伝導空洞クライオモジュール試験施設として、2006年から研究開発が始まった。
- これまでの運転で、
  - Pulse長：726 us
  - ビーム電流：5.8 mA
  - 加速勾配：33.8 MV/A (要求31.5 MV/m)

  を達成している。

- 現在、文部科学省 先端加速器共通基盤技術研究開発費補助金を使用した、ILC仕様クライオモジュール1台の製造が進められている。

目次

◆ILC加速器の構成

- 電子源
- ダンピングリング
- 主線形加速器
- 陽電子源
- 最終収束光学系
- ビームダンプ

◆KEK-iCASAで展開するILC線形加速器向け超伝導クライオモジュール開発

◆まとめ

まとめ

- ILCは将来の電子－陽電子衝突型大型線形加速器計画
- 各構成部分での重要なキーワード
  - 偏極電子を生成するための高圧DCフォトカソード電子銃
  - 低エミッタンス高品質ビームを作り出すためダンピングリング
  - 125 GeVまで加速させるための超伝導主線形加速器
  - ルミノシティ向上のためのナノビーム技術
  - クラブ空洞を使用した平行衝突技術
  - 超大強度ビームダンプ

- SRF空洞について、製造技術、表面処理、性能評価について紹介した。
- 性能を上げるところは上げる、カットするところはカットすることが、ILCコスト削減につながる。
- 空洞は空洞単体では使えず、周波数チューナー、磁気シールド、入力カップラーなどと共にクライオモジュールに格納してようやく使える。
- KEK-STF加速器での研究で、主線形加速器の超伝導高周波加速技術はILC要求スペックを満たせることが実証されている。