

KEKにおけるILCのための 超伝導空洞開発の歴史と現状

～物理学会シンポジウムで話す内容～

山本 康史 (KEK加速器)



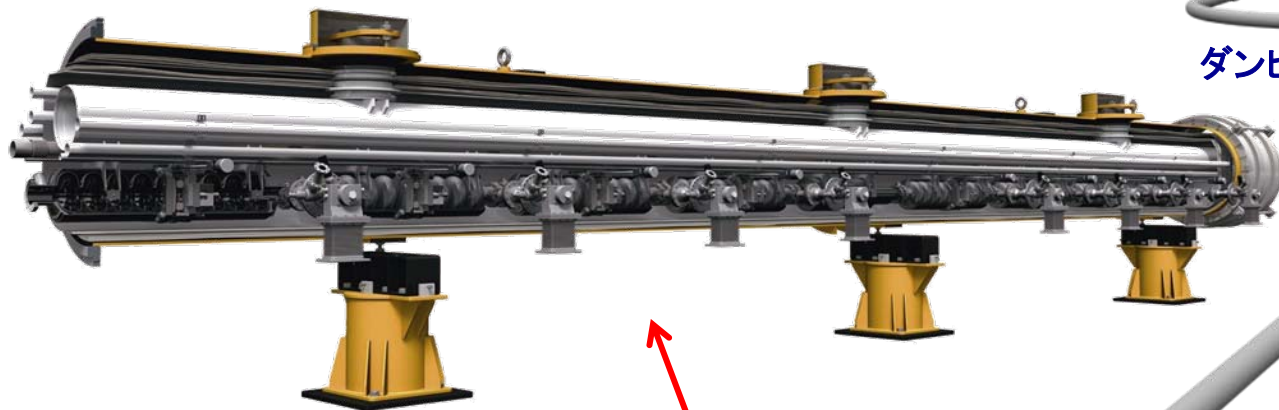
- ILC加速器の概要
- STFの目指すもの
- STFの歴史
- STFのインフラについて
- 空洞性能と制限理由およびその対処について
- クライオモジュールテストとビーム運転
- 大量生産への取り組み
- 今後の展望とまとめ



ILC加速器の概要



STFでは主リニアックの技術開発をしている



超伝導空洞 9 台を内蔵する
クライオモジュール

ダンピングリング

検出器

主リニアック

11km

電子・陽電子 主リニアック

エネルギー : 250GeV + 250GeV

主リニアック長 : 11km + 11km

クライストロンの数: 373 台

クライオモジュールの数: 1680 台

超伝導空洞の数: 14560 台





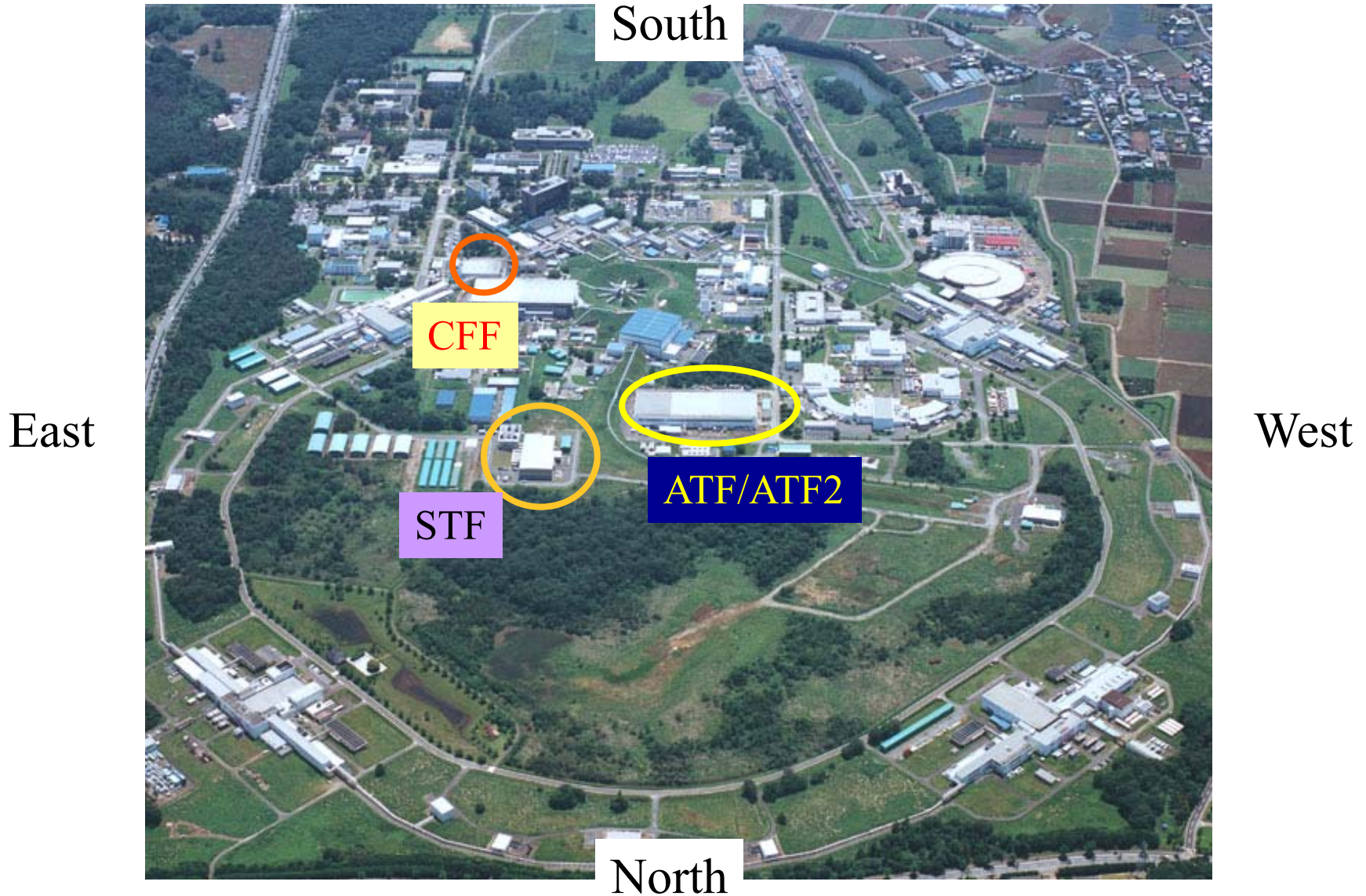
- 空洞性能の向上および制限理由の解明
- クライオモジュールでの高電界安定運転の実証
- ビームを含む安定な加速器運転の実証



- 2004年 ITRPの勧告
- 2005年 TESLA-like/Low Loss型空洞の開発着手
- 2006年 STFの建設/最初の9連空洞完成
- 2007年 STF Phase-0.5実施/TESLA-like型空洞開発へ一本化
- 2008年 STF Phase-1実施(初の4空洞同時運転実施)
- 2010年 S1-Global計画実施(初のILCタイプクライオモジュールテスト)
MHI-12, -13号機がILCスペックに到達
- 2011年 CFF完成/KEK内での空洞製作着手
- 2012年 量子ビーム計画(初のビーム運転実施)
CM-1(Phase-2)用の全空洞が35MV/m以上に到達
高圧ガス法対応への取り組みに着手
- 2014年 STF Phase-2実施予定



STFの場所





STFのインフラ整備



STFのインフラ



STF外観



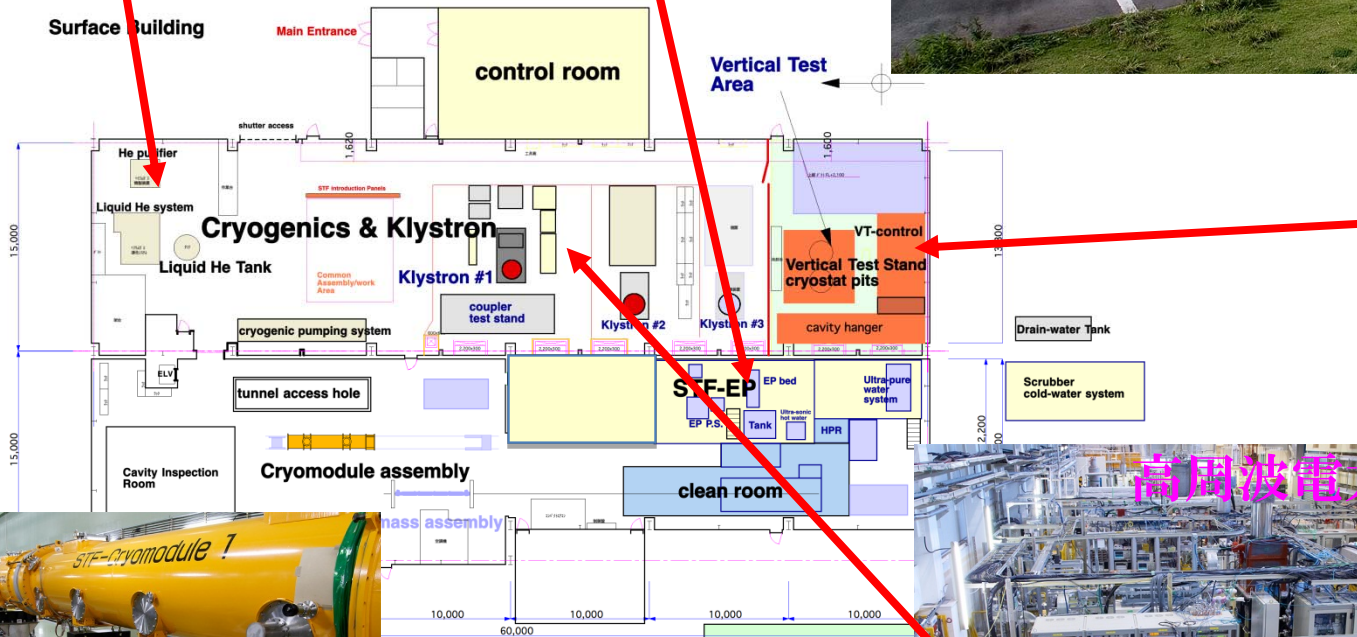
冷凍機設備



電解研磨設備



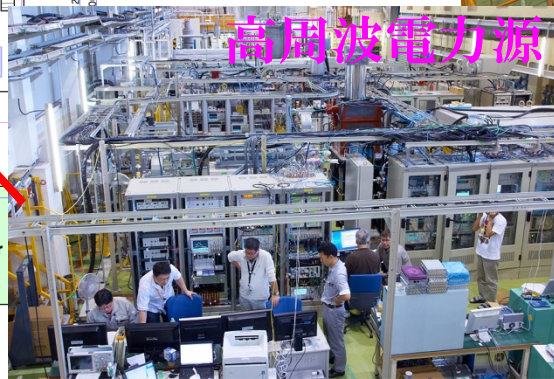
STF (Supercol)



空洞性能試験設備



高周波電力源



加速器トンネル

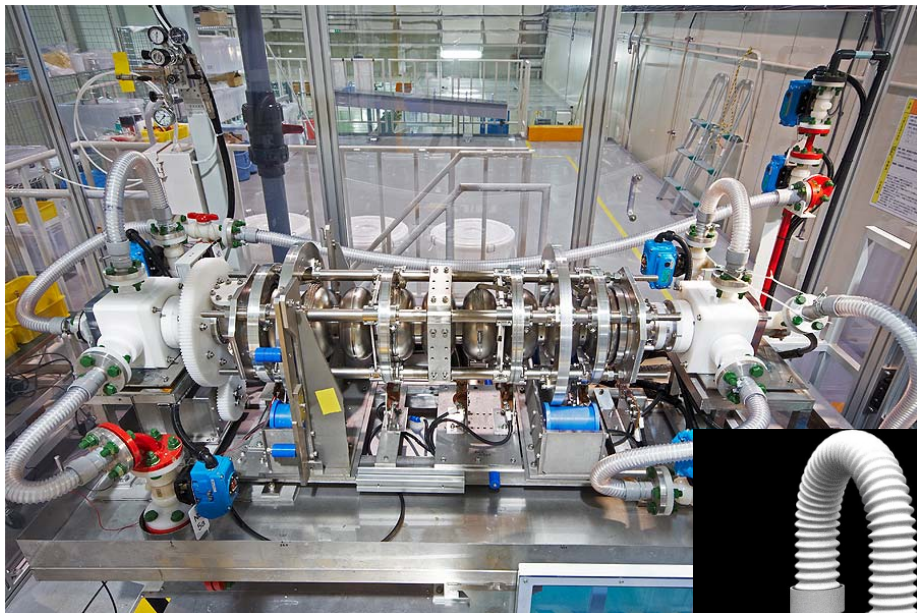


DC-HV power supply for Klystron #1 modulator



超伝導空洞に必須の内面電解研磨処理

superconducting rf test facility



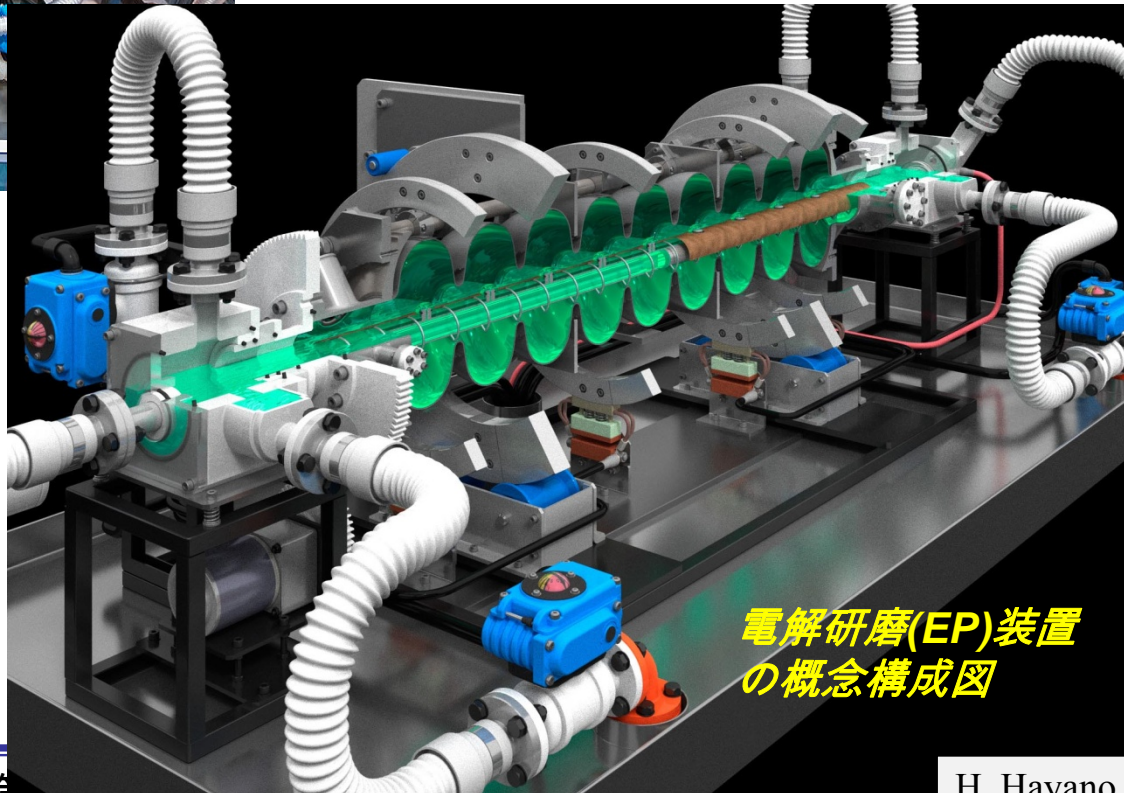
電解研磨 (Electro-Polish)

硫酸とフッ酸の混合液を使用
中心のアルミ電極とNb空洞の間に電圧をかけ、
Nb内面をエッチングする。

なめらかな空洞内面を得、かつ空洞内面に生じる
イオン生成物微粒子を抑制するパラメータに最適
化するのがキーテクノロジー。

KEK STF に設備されている
電解研磨(EP)装置
(実際の写真)

年40回程度の電解研磨処理
を行っており、定常的に
高電界性能を達成している。



電解研磨(EP)装置
の概念構成図

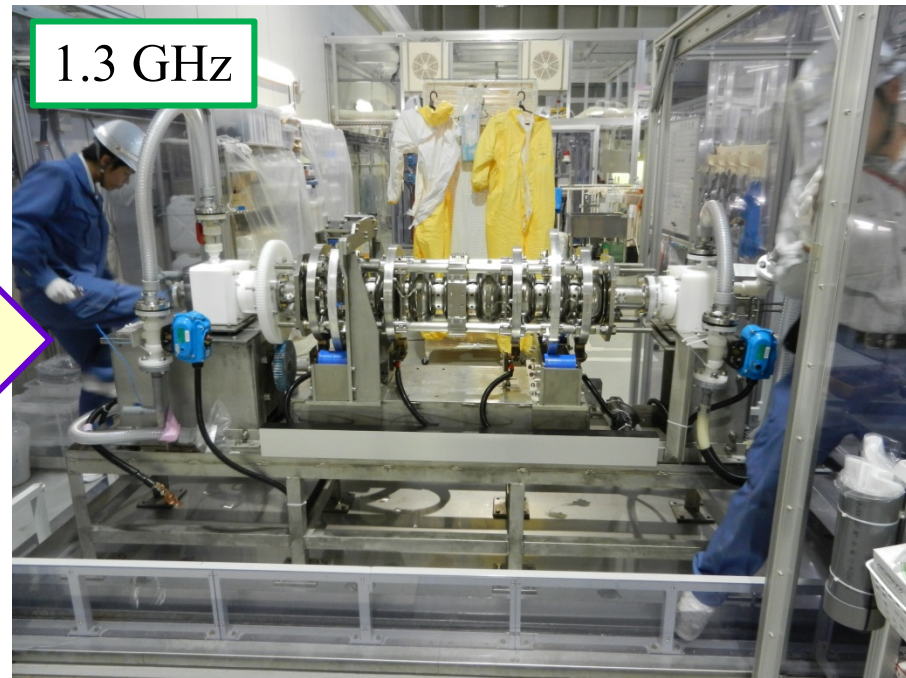


500MHz専用のシステムを1.3GHzにも対応できるように改良した。

500 MHz



1.3 GHz



今後は2つのシステムを使い分けることが可能になる。



効率化



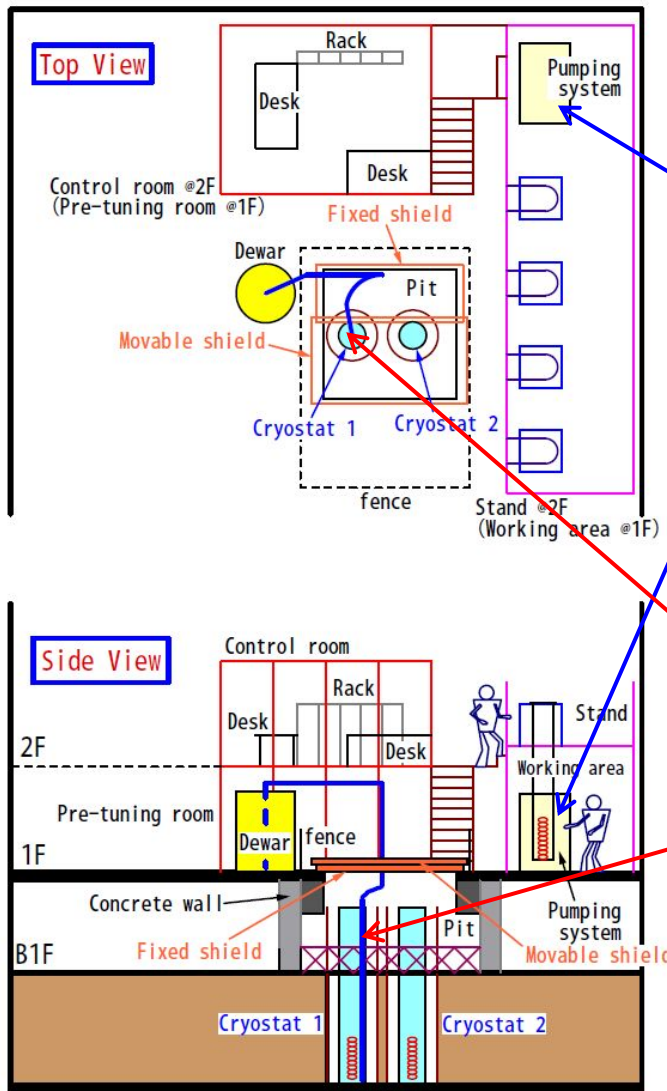
空洞性能試験(縦測定)設備



空洞性能試験設備

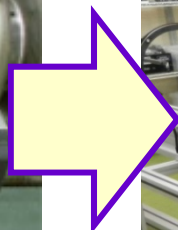
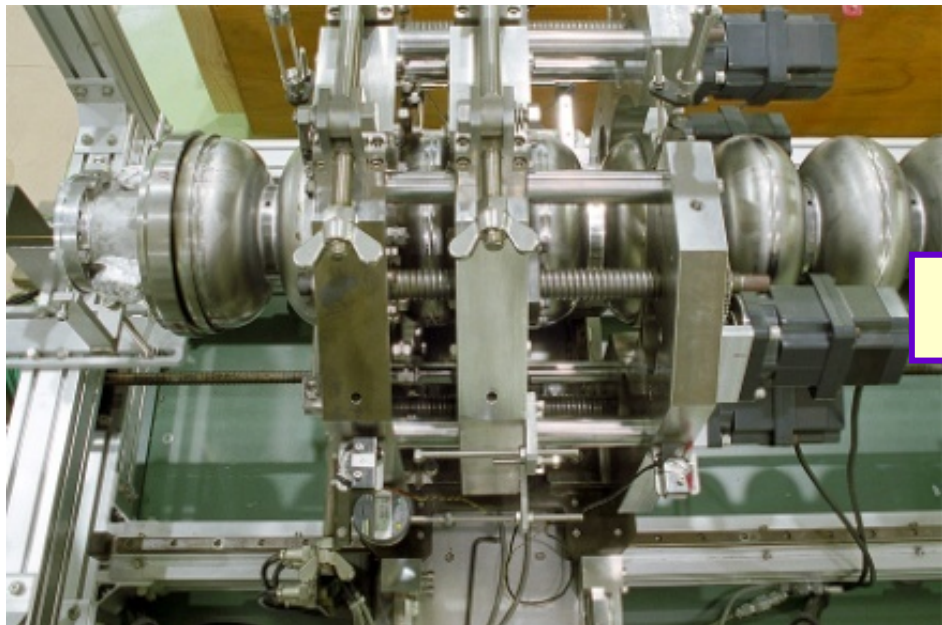


- ✓ 2 cryostats
- ✓ 4 stands
- ✓ radiation shield
- ✓ pumping system
- ✓ control room





これまででは手動で行っていた作業を自動化するよう改良中。



2日かかっていた作業が数時間で終了する。



効率化

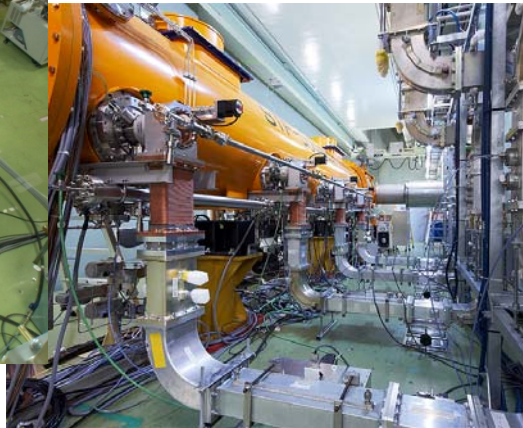
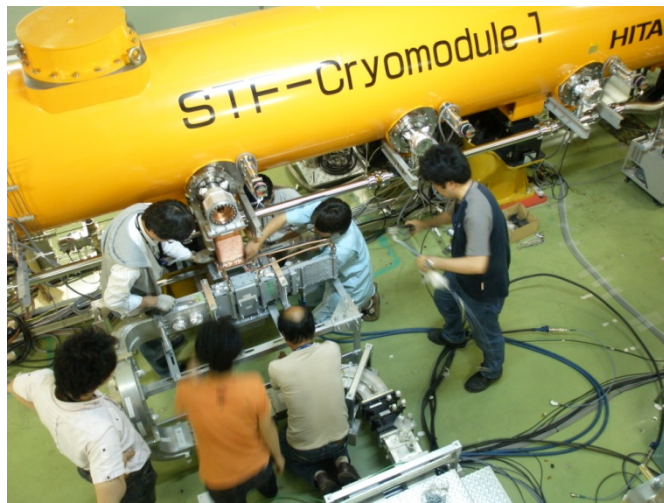


DESY-FNAL-KEK collaboration



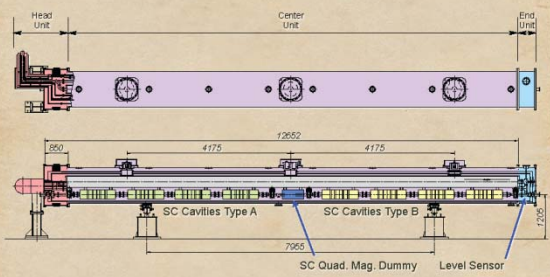
クライオモジュール組み立てエリアとトンネル内整備

superconducting rf test facility



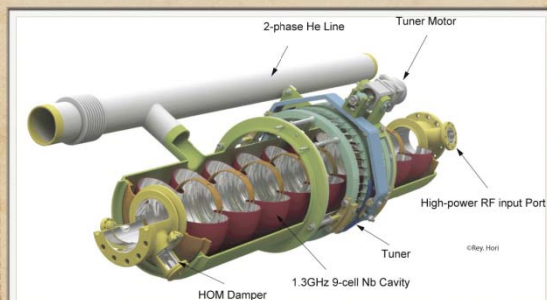


STF2-CM1 クライオモジュール



8

超伝導加速空洞とヘリウムジャケット



5

設計方針

- 基本的にはILC-RDRに準拠する
- 2種類の超伝導加速空洞を使用
 - チューナーの位置が異なる
 - それぞれ4台ずつ合計8台
- 超伝導四極電磁石のダミー1台
- クライオモジュールを3分割し、それぞれをフランジで接続
 - 上流部：冷却システムとの接続
 - 中央部：空洞8台と四極電磁石のダミー1台
 - 下流部：超伝導液面計を設置

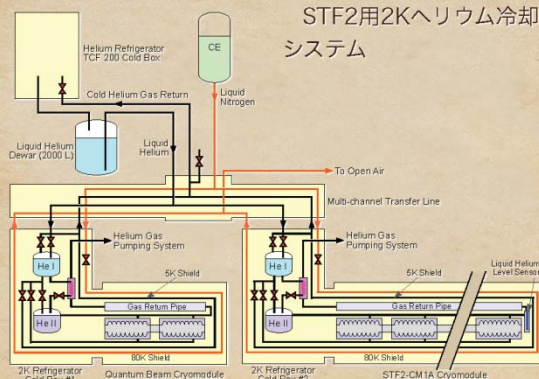
7

クライオモジュールと法律

- 高圧ガス
 - 液体ヘリウム
 - 液体窒素
- 高圧ガス保安法
 - 空洞+ヘリウムジャケット：一般則適用（配管と同じ扱い）
 - 使用する材料の2Kでの定義なし
 - 高圧ガス保安協会による高圧ガス設備試験
 - 県による完成検査

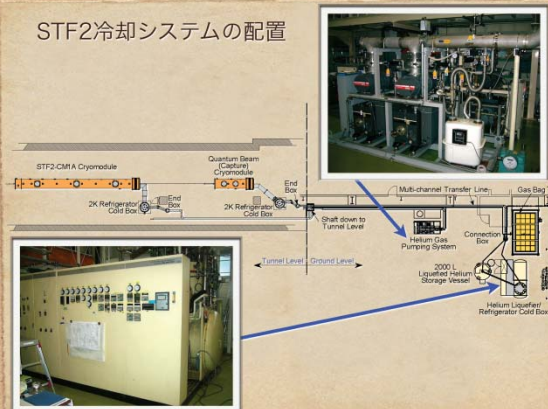
10

STF2用2Kヘリウム冷却システム



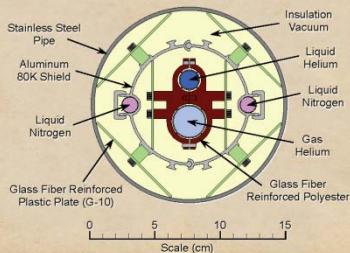
19

STF2冷却システムの配置

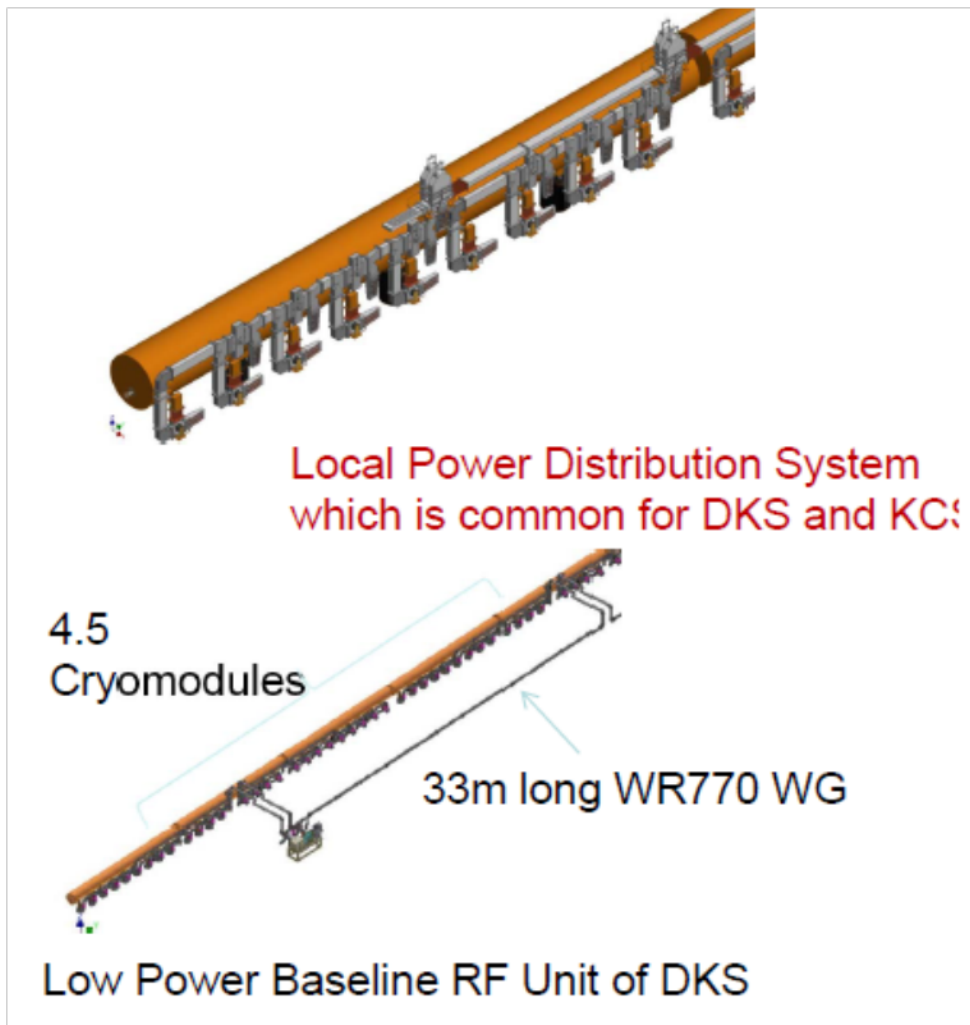
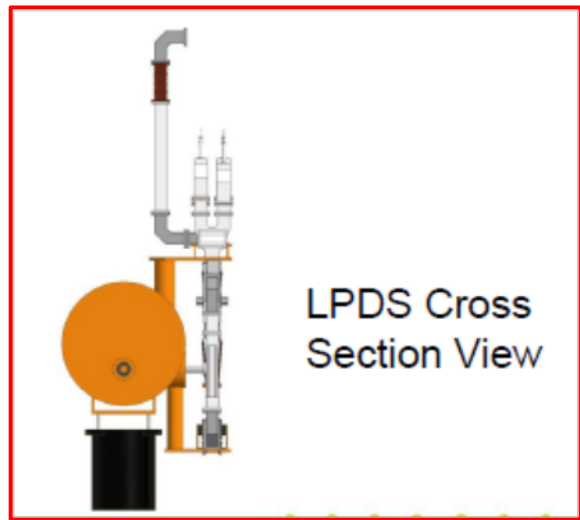
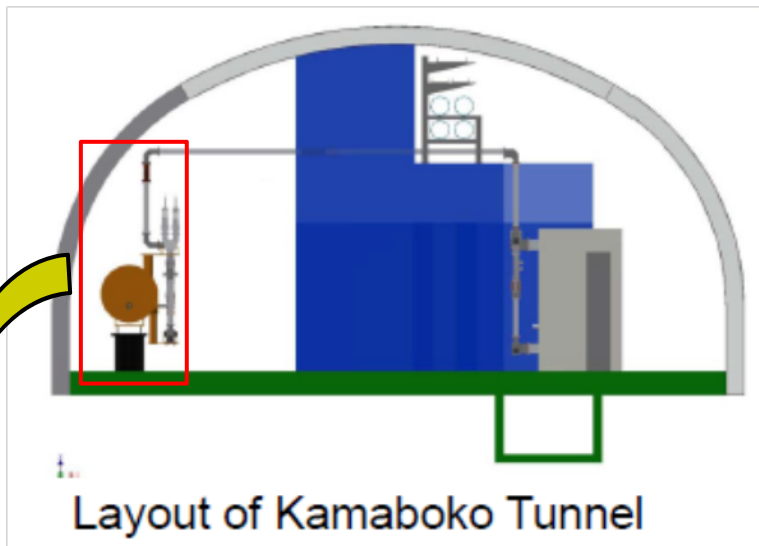


20

高性能トランスファーライン



22





S1-global

Two RF systems - RDR (Local PDS) and DRFS -
- RDR configuration

Power Distribution System (PDS)

Diagnostic tools for operation

Result of vector-sum feedback operation

Quantum Beam Project

RF and PDS for RF gun and Capture cryomodule (CCM)

Field calibration for RF-gun operation

$P_k Q_L$ control

STF-2

Multi beam klystron and Marx modulator

TDR-like PDS



STFにおける高周波源の変遷

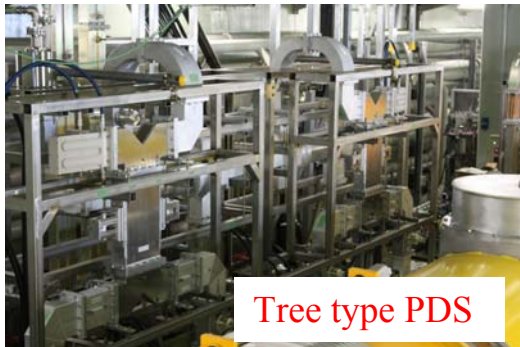
superconducting rf test facility



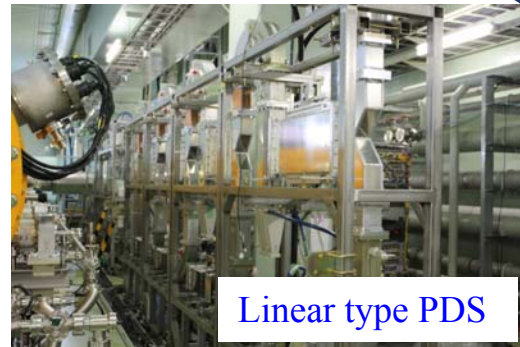
S1-Global

5MW Klystron

地上に設置



Tree type PDS



Linear type PDS

量子ビーム

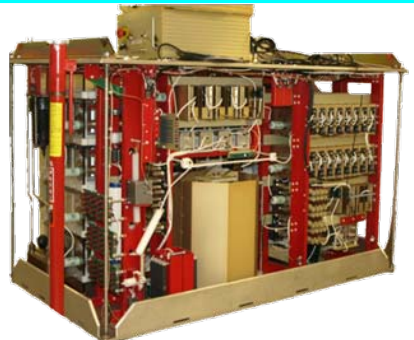
800kW (DRFS) Klystron

地下に設置



STF-2

DTI Marx modulator
(Collaboration with SLAC)
120kV, 140A, 1.5ms



地上に設置

Multi Beam Klystron
(Toshiba E3736H)

10 MW 1.5ms 67% efficiency



超伝導空洞の性能向上および 性能を制限する理由とその対処



Measured(Fabricating) Cavities

superconducting rf test facility



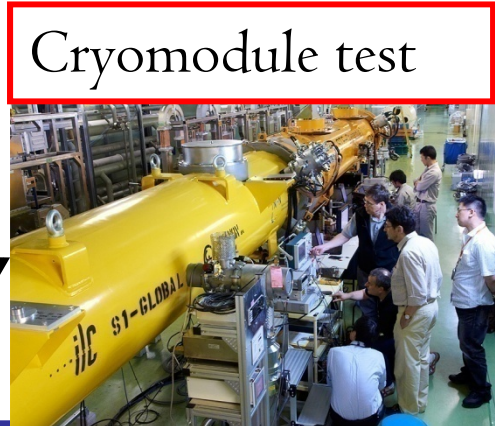
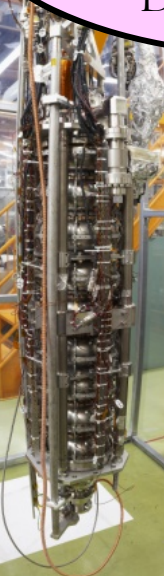
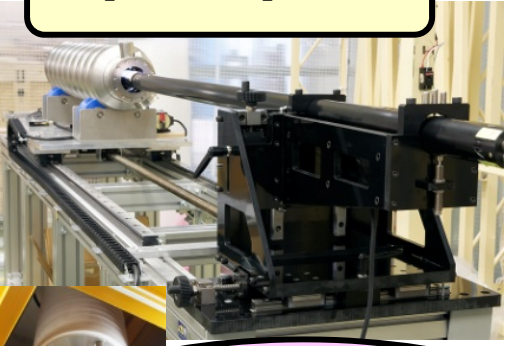
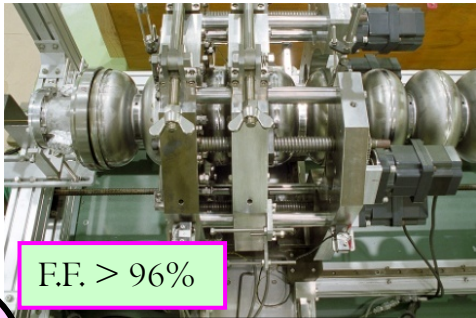
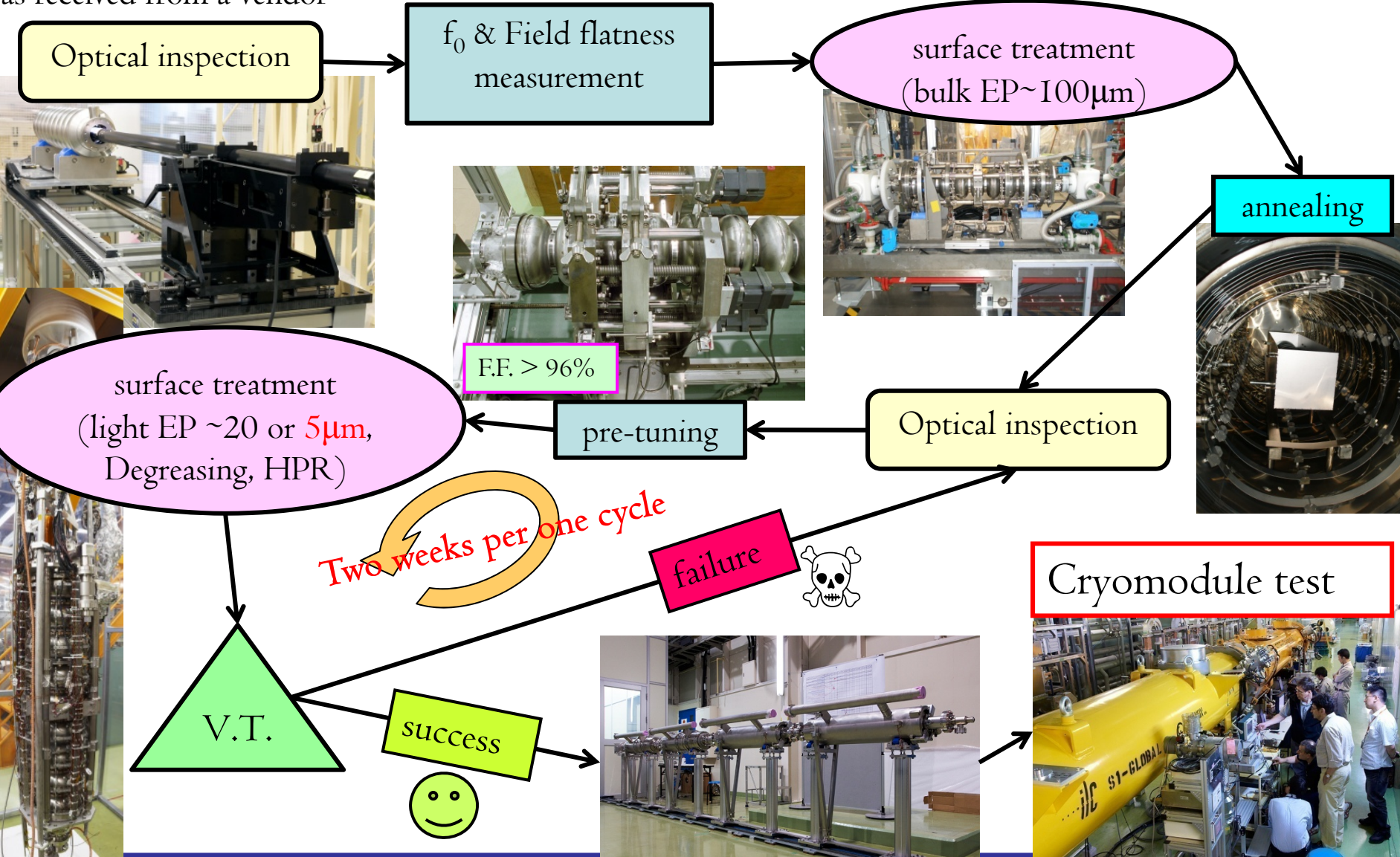
- MHI-01~04 Phase-I (already done)
- MHI-05~09 SI-Global (already done, except for MHI-08)
- MHI-10, 11 S0 plan (already done)
- MHI-12, 13 Quantum Beam (under beam operation)
- MHI-14~22 Phase-2 (for CM-I)
- MHI-23~26 Under fabrication @Mihara (for CM-2a)
- MHI-A, B, C New fabrication method
- HIT-01, 02 New vendor
- TOS-01, 02 New vendor
- KEK-00, 01 In house
- AES-001 International Collaboration (commissioning)
- IHEP-01 International Collaboration
- PKU-04 International Collaboration



Sequence of cavity process



as received from a vendor





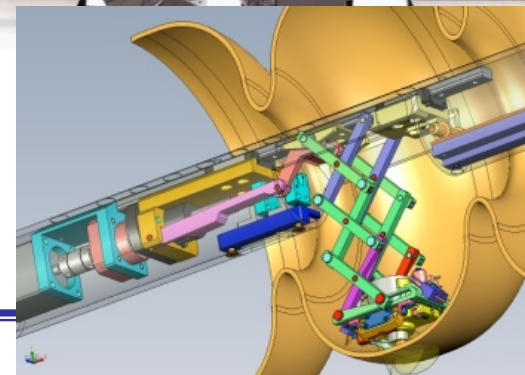
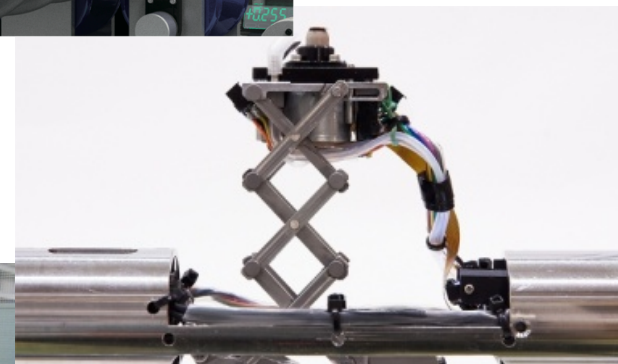
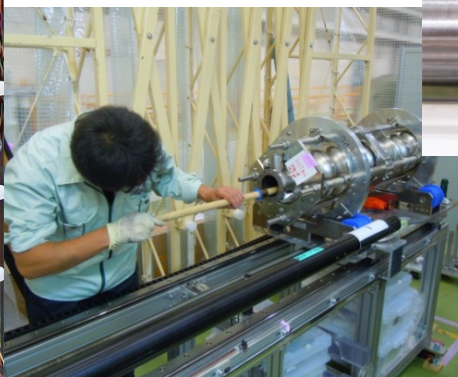
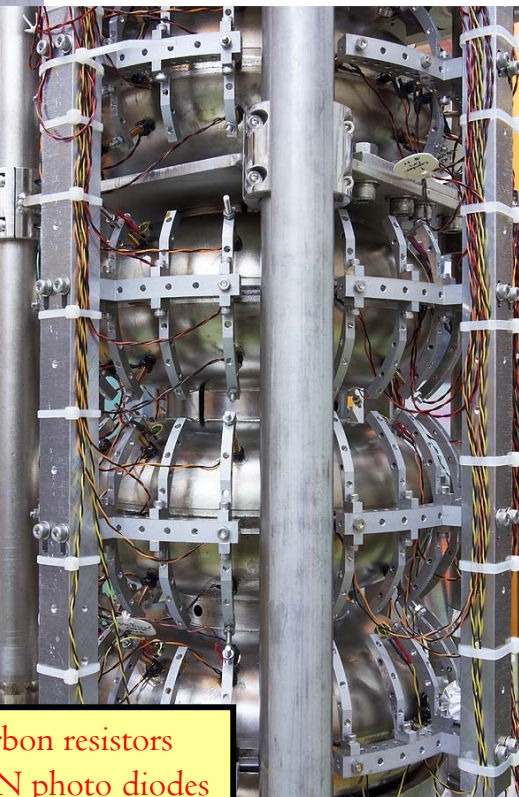
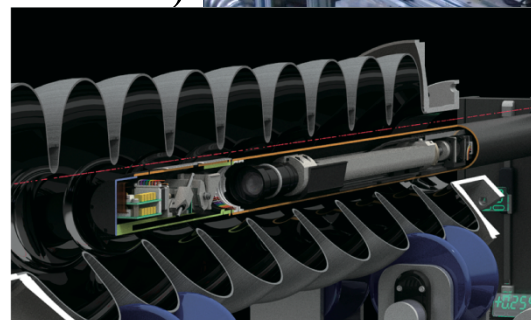
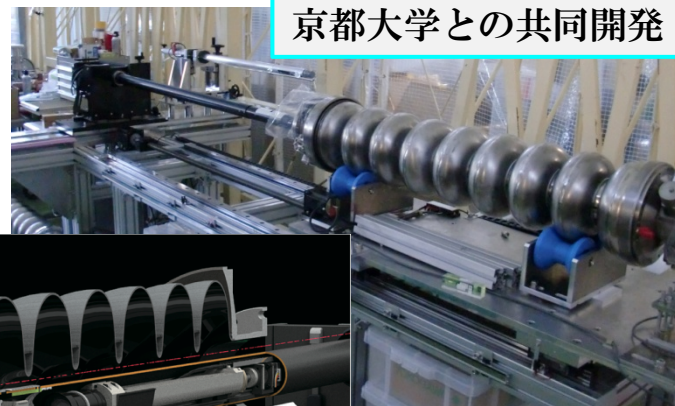
空洞性能向上に向けた取り組み

superconducting rf test facility



京都大学との共同開発

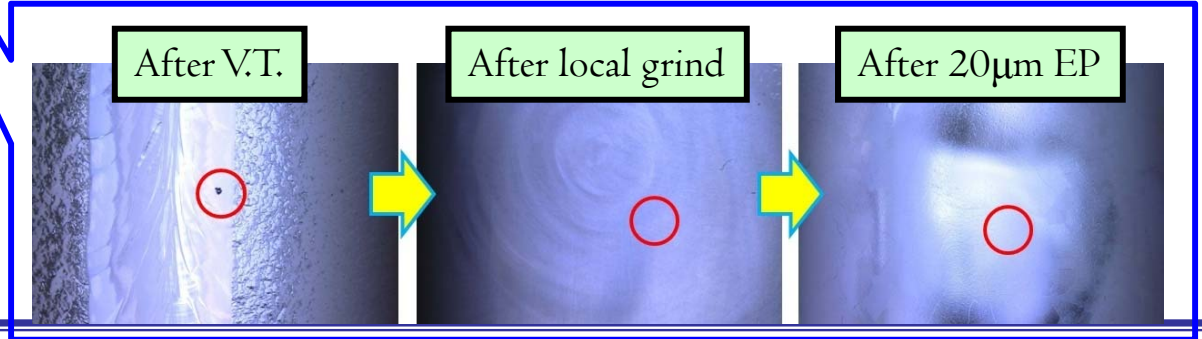
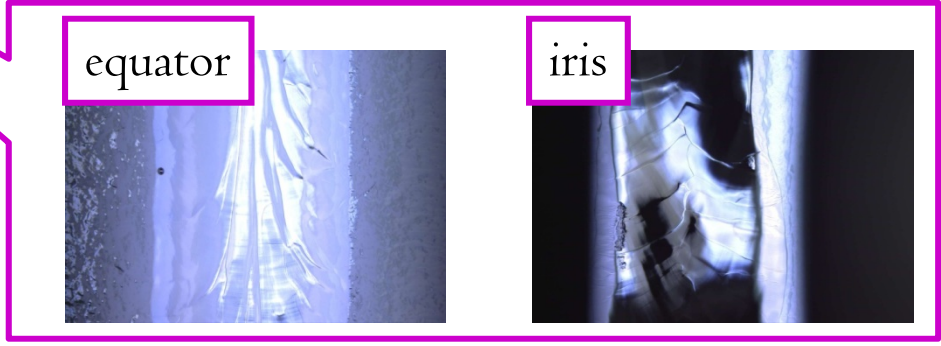
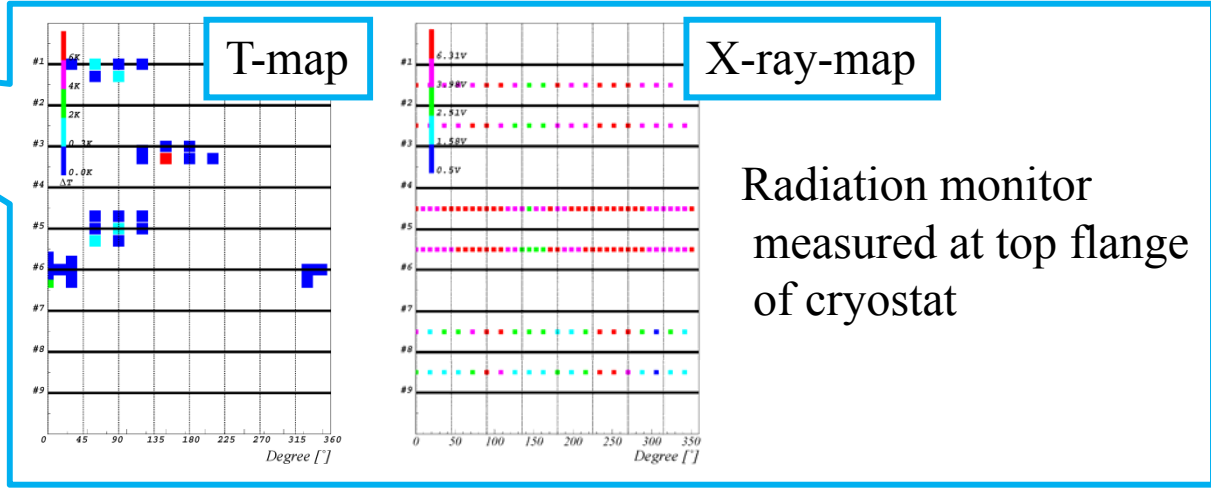
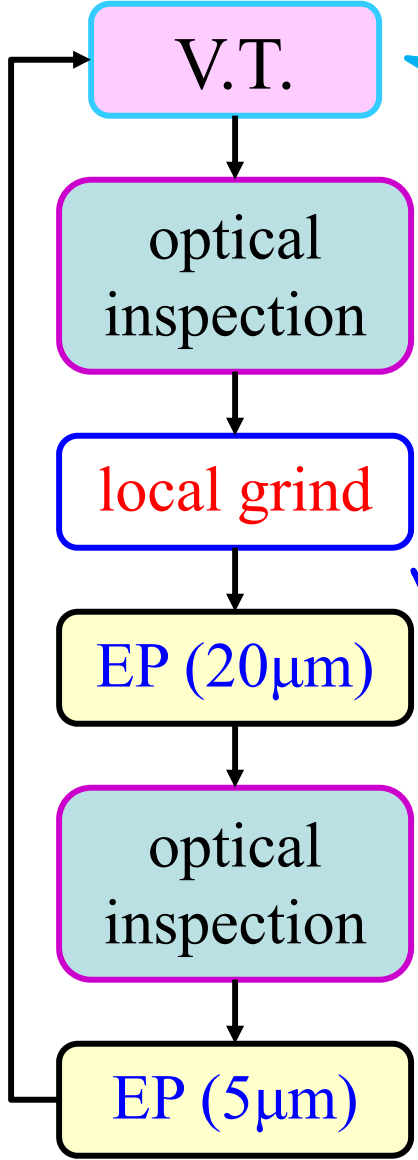
- 1) T-mapping/X-ray-mapping
- 2) Optical inspection (Kyoto Camera)
- 3) Local Grinding Machine



396 carbon resistors
182 PIN photo diodes
Radiation monitor



Cure for Failed Cavity

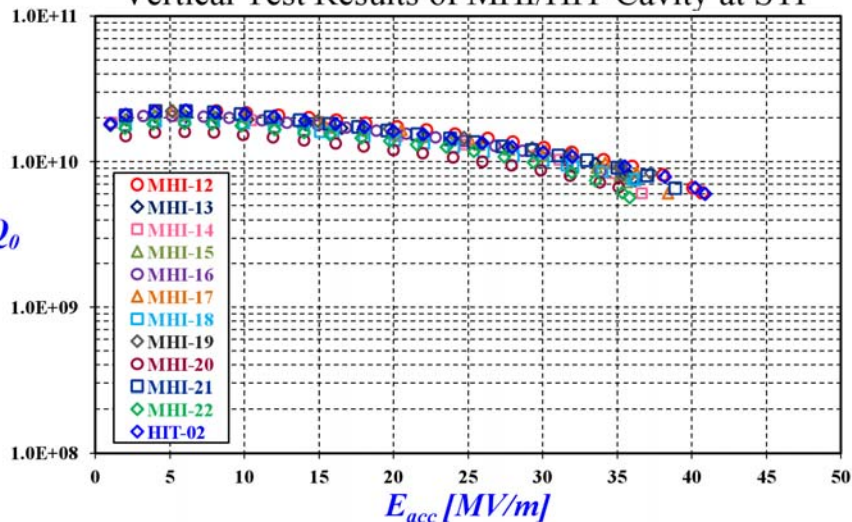




空洞性能の最近の結果

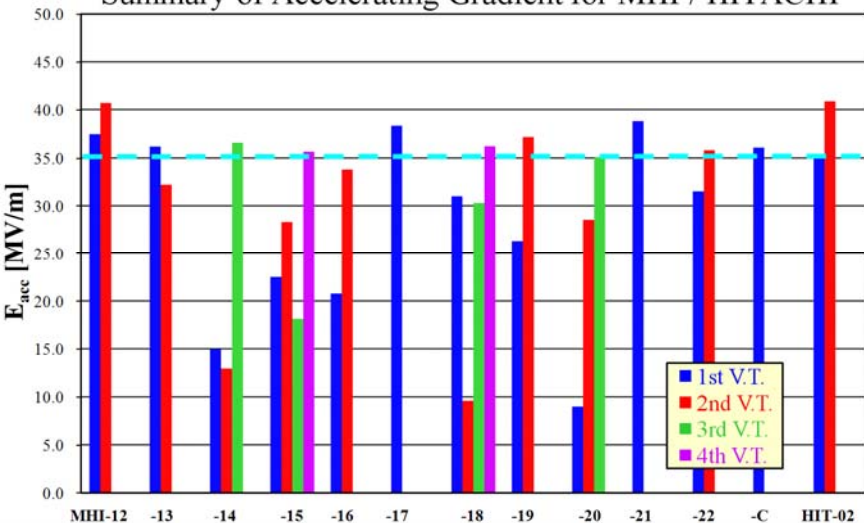


Vertical Test Results of MHI/HIT Cavity at STF



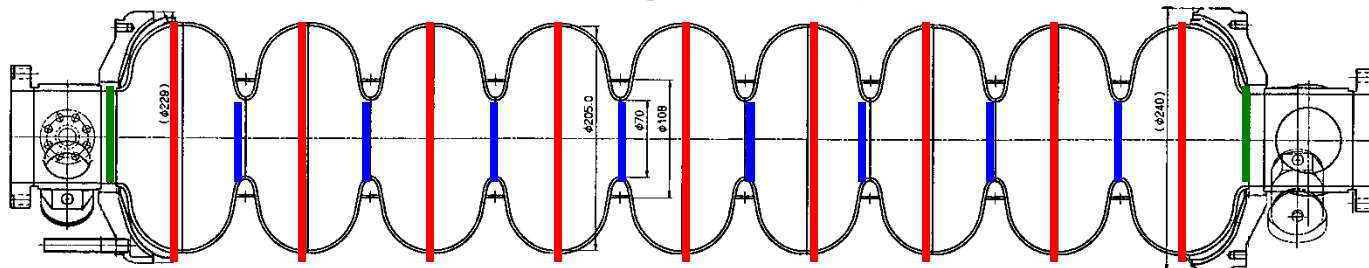
- ◆ STF Phase-2用の 8 空洞はいずれも35MV/m以上に到達した
- ◆ 平均加速勾配は 36.8 ± 1.8 MV/mである
- ◆ HIT-02号機が国内最高の41MV/mに到達した
- ◆ 大量生産を意識した試作機も36MV/mに到達している

Summary of Accelerating Gradient for MHI / HITACHI



これらの空洞のほとんどは最大フィールドでクエンチしておらず、RF powerで制限されている。従って、**限界値はまだ上がる可能性が高い。**

- Type I : Defect on bead of Equator
 - Cavity performance is limited certainly (worst case)
- Type II : Defect on bead of Iris
 - Heavy F.E., sometimes with explosive event
- Type III : Defect on bead of End-cell/Beam-pipe
 - F.E., sometimes with explosive event, but not understood well
- Type IV : Defect at other location
 - Not on bead or far away from equator

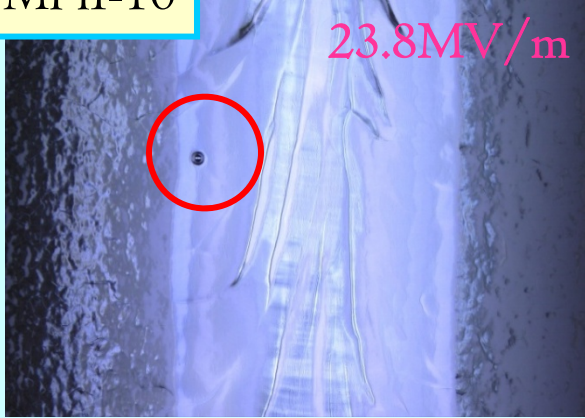




superconducting rf test facility

赤道部

MHI-10

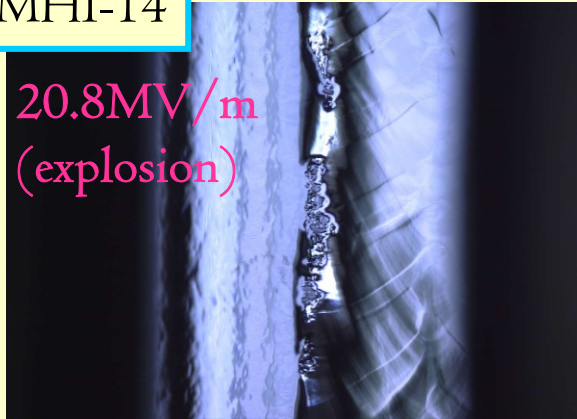


MHI-16



アイリス部

MHI-14

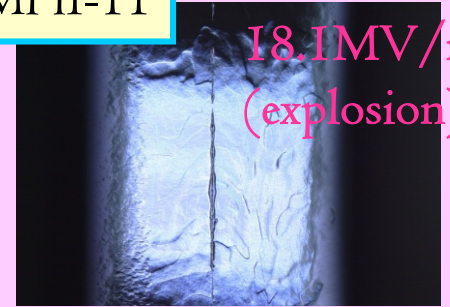


MHI-09



ビームパイプ 湾曲部

MHI-11



MHI-18



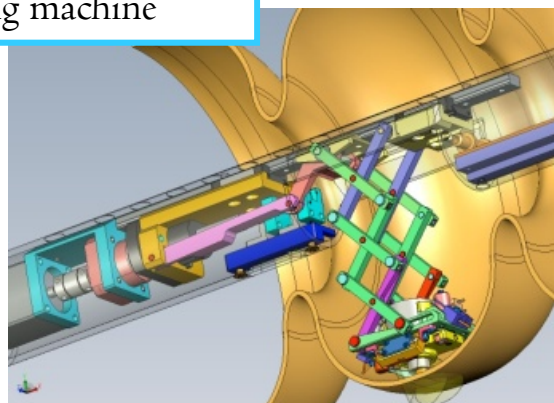
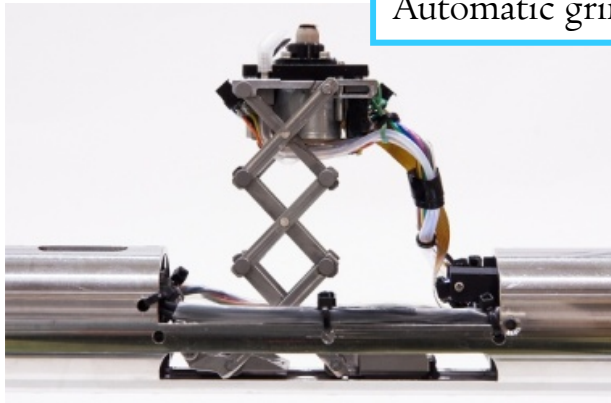
TOS-02





空洞性能を向上させる手段

Automatic grinding machine



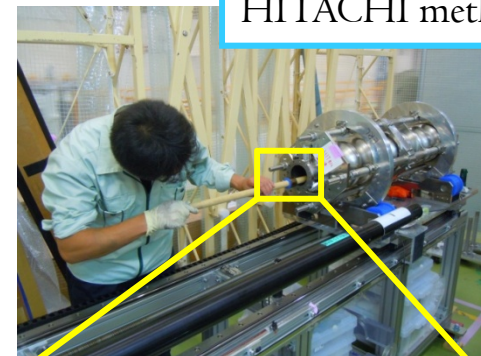
Handy grinding



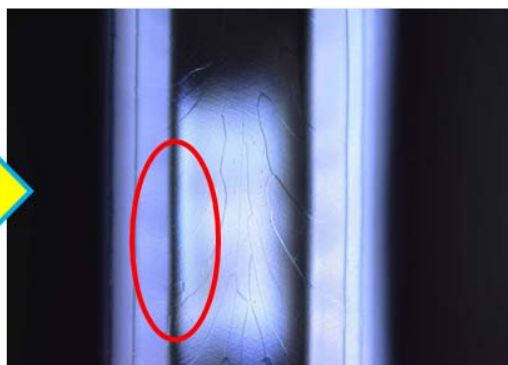
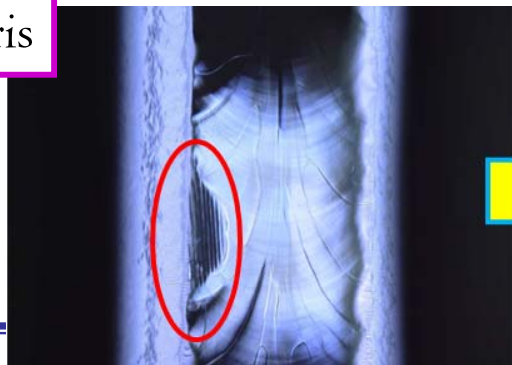
equator



HITACHI method



iris

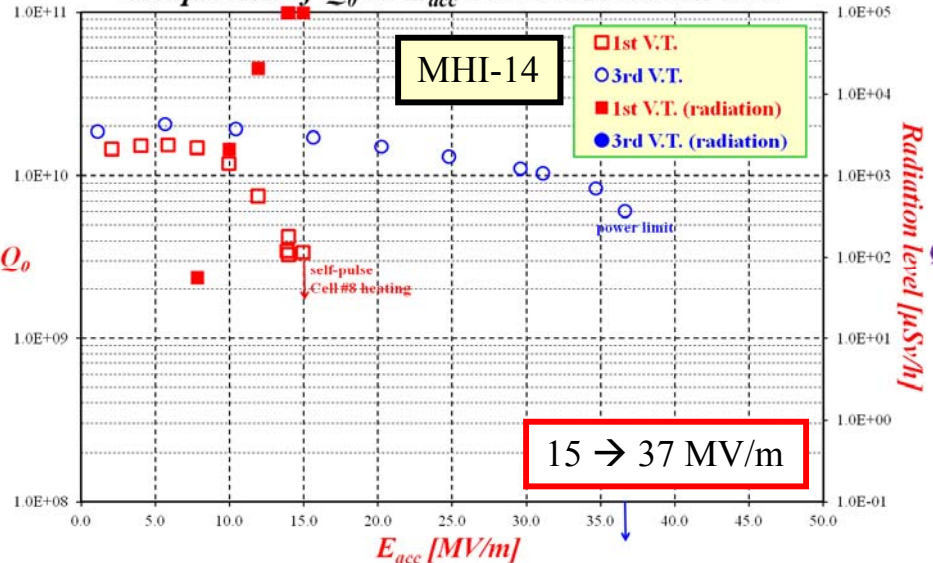




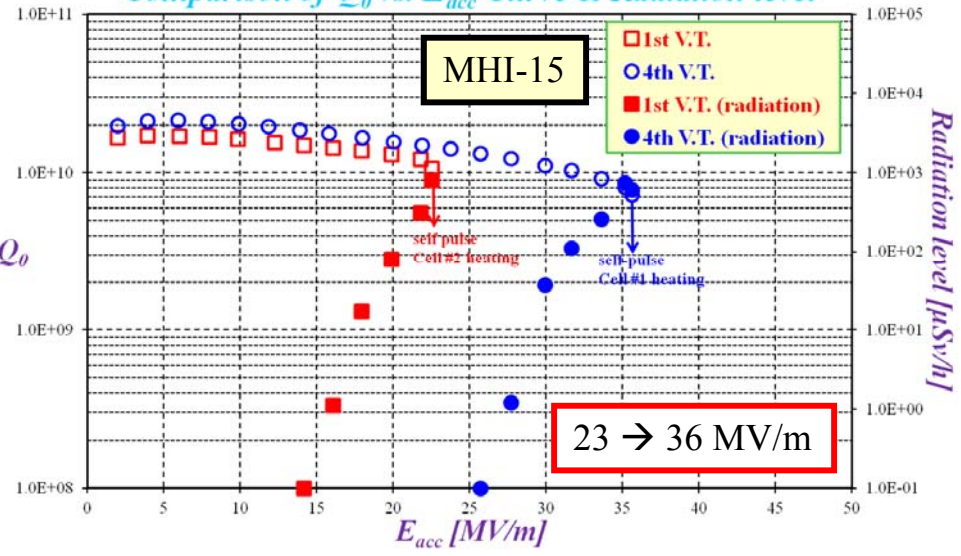
Improvement of cavity performance by local grind



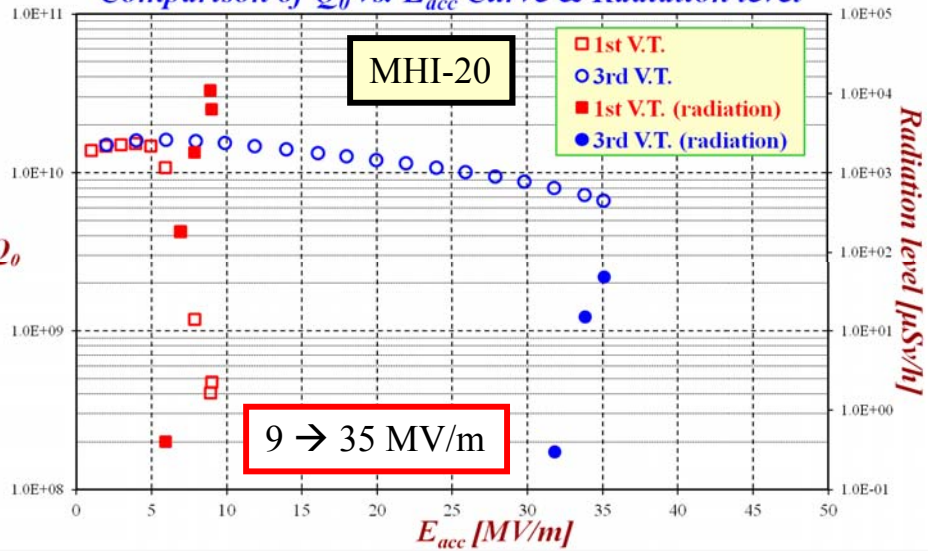
superconducting rf test facility
Comparison of Q_0 vs. E_{acc} Curve & Radiation level



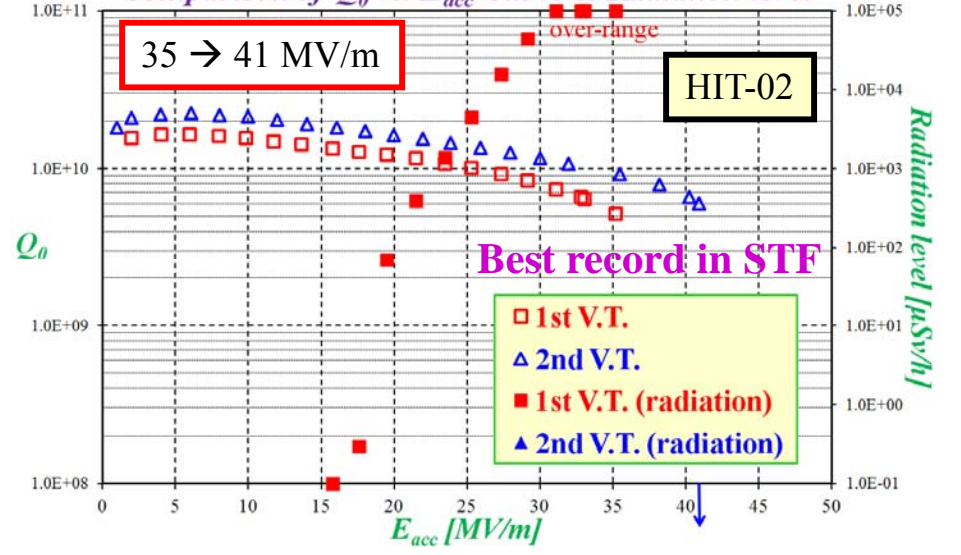
Comparison of Q_0 vs. E_{acc} Curve & Radiation level



Comparison of Q_0 vs. E_{acc} Curve & Radiation level



Comparison of Q_0 vs. E_{acc} Curve & Radiation level



The radiation level also decreased drastically!



クライオモジュールテストと ビーム運転

クライオモジュールでは以下の項目について実証試験が行われる。

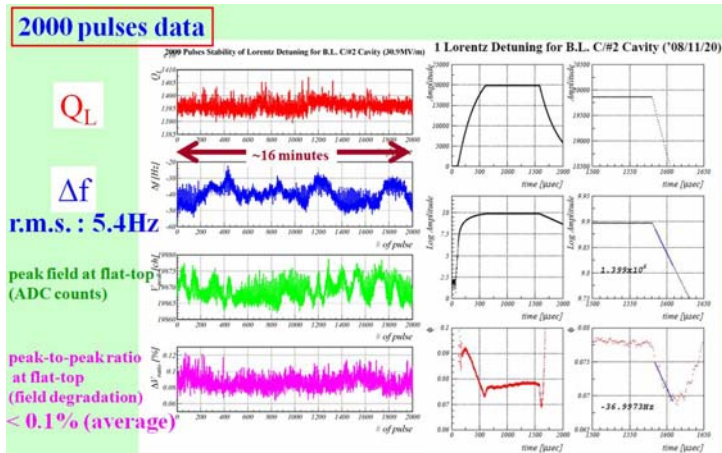
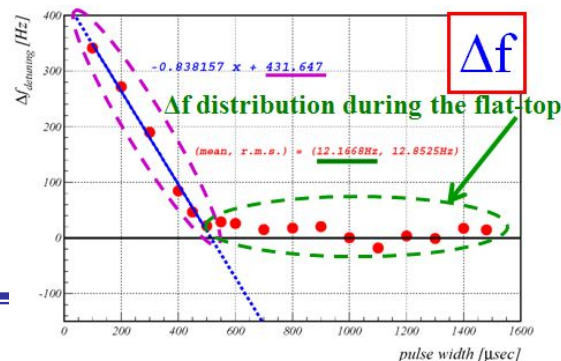
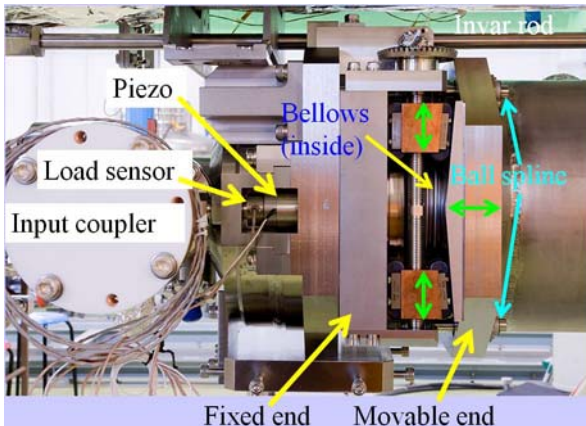
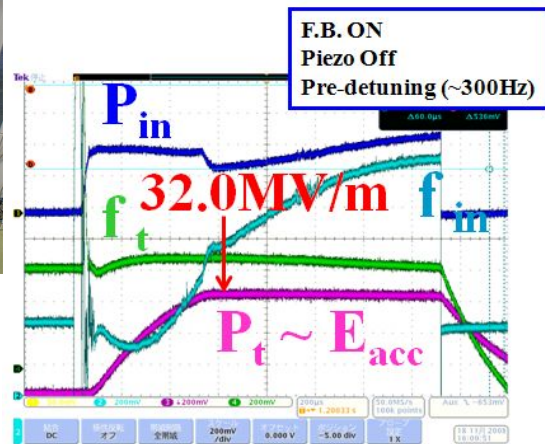
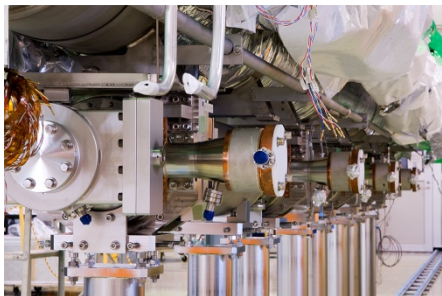
設計、製作、アセンブリー技術の習得、
2K冷凍機技術、
低熱負荷クライオスタット技術、
高性能空洞製造と大電力パルス運転技術、
デジタル制御による空洞電圧安定化技術、
大電力分配系、空洞外部Q制御、など。



STF Phase-0.5/Phase-1



- Phase-0.5ではベースライン空洞の技術選択が行われた。
- Phase-1では空洞4連化、32MV/mの達成、4空洞同時運転などが実証された。

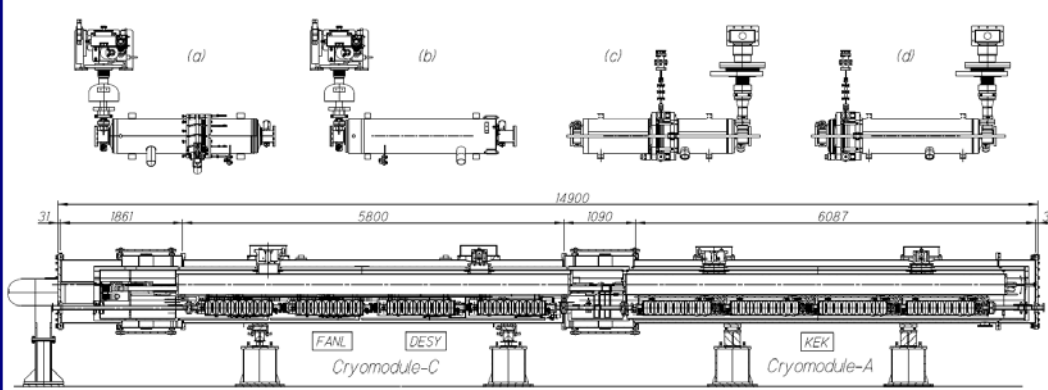
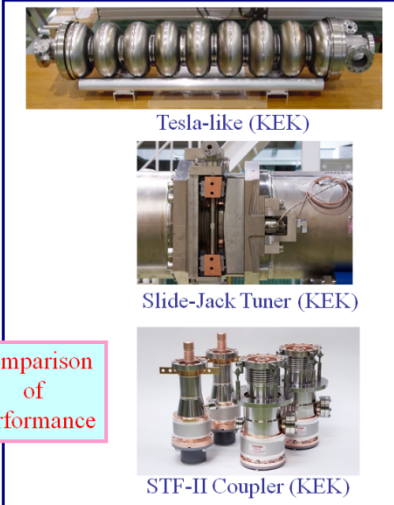
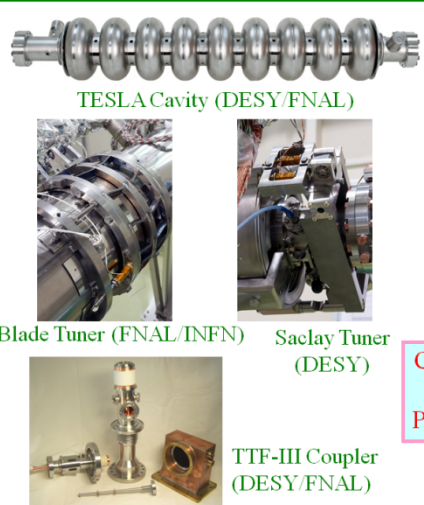




superconducting rf test facility

S1-Global計画

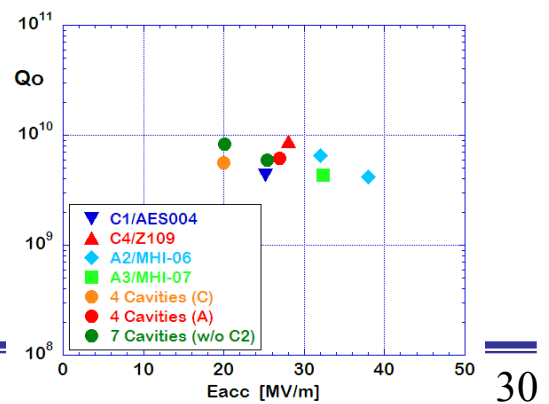
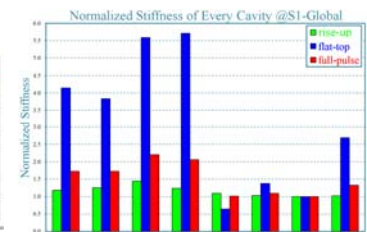
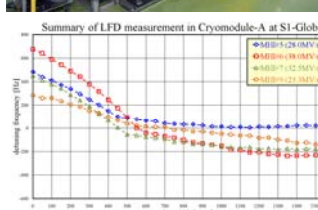
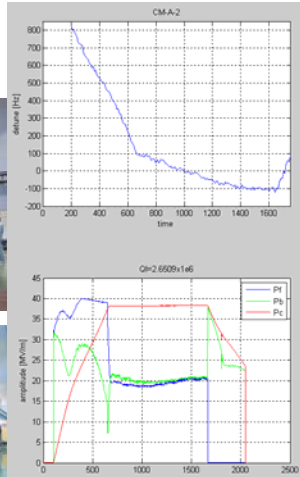
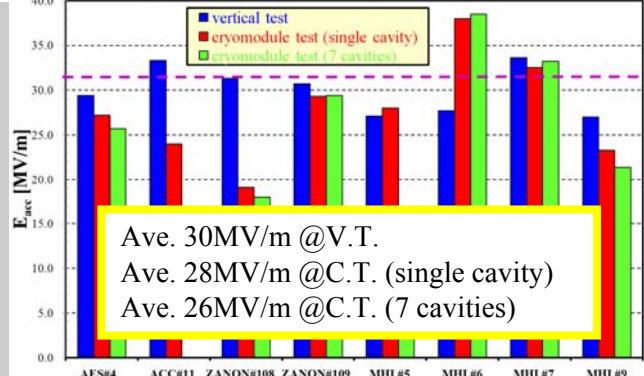
61 persons from 5 Labs!



Comparison of Performance

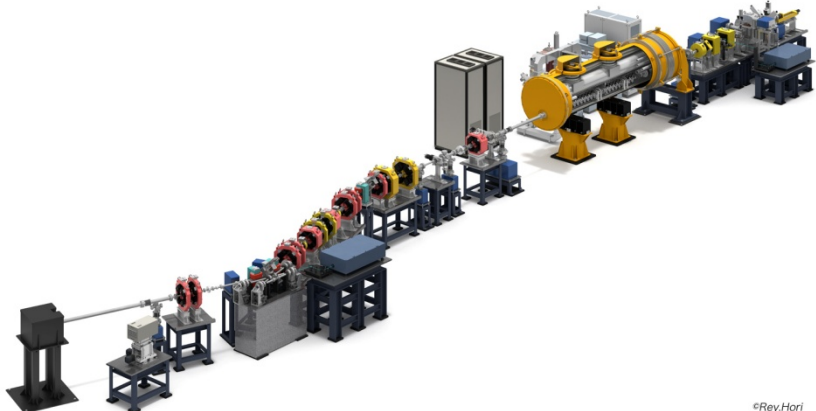


Summary of Achievable Gradient for all Cavities at S1-Global

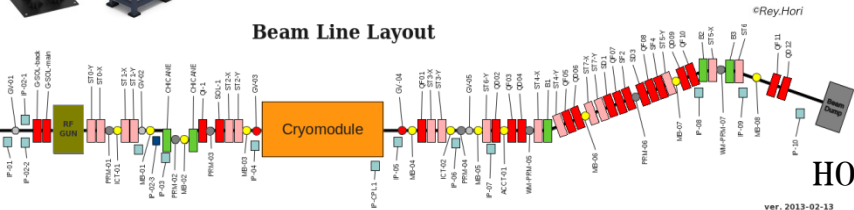




量子ビーム計画

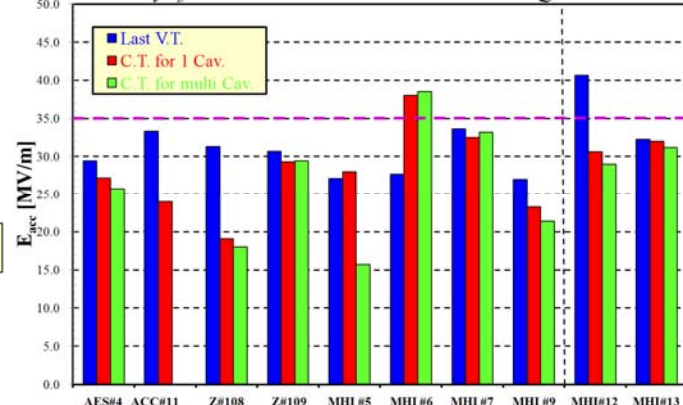


Beam Line Layout

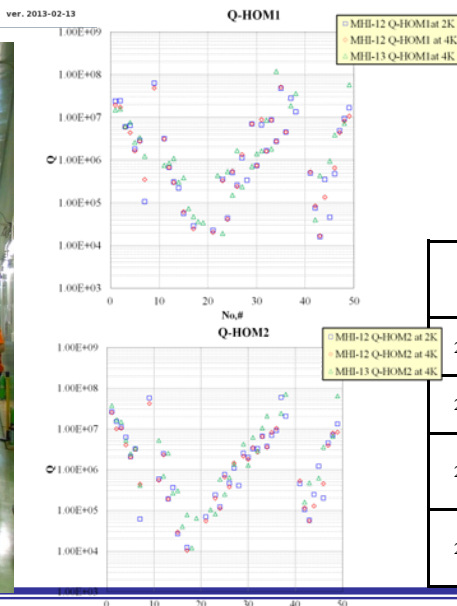


レーザーコンプトン実験のための電子ビーム加速のために2台の超伝導空洞を用いたクライオモジュールが導入された。平均運転勾配20MV/mで安定な運転が行えている。Studyとして平均運転勾配28MV/mのビーム加速を実施し、問題が起こらないことを確認した。大電力試験中に一台の性能が劣化したが、ビーム運転後の性能劣化は起こっていない。

Summary of Achievable Gradient at S1-Global & Quantum Beam



HOMのQもほぼ狙い通り！



日付	時間	震度	運転状態	Detune	
				MHI-12	MHI-13
2012/10/12	13:57	3	Beam Tuning [RF @Cavity = ON]	-	-
2012/10/24	16:05	2	Beam Tuning [RF @Cavity = ON]	-	+
2012/10/31	15:50	2	Beam Tuning [RF @cavity = 30sec. ON ⇒ RF Off (手動)]	-	+
2012/12/07	17:18	4	LLRF study [RF @Cavity = 60sec. ON ⇒ LV Off (LL)]	-	+



STFクライオモジュールの変遷



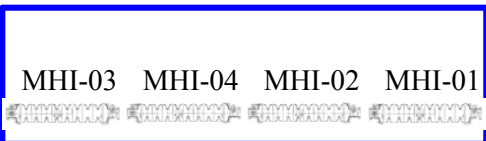
superconducting rf test facility

Phase-0.5



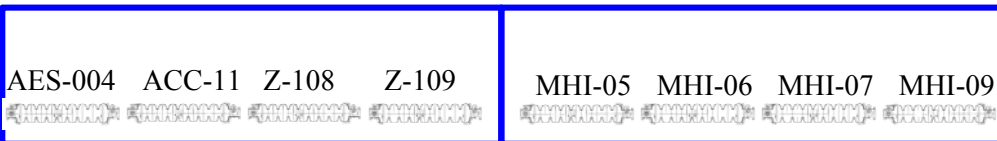
一空洞大電力試験

Phase-1



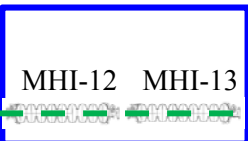
四空洞大電力試験

S1-Global



七空洞大電力試験(国際協力)

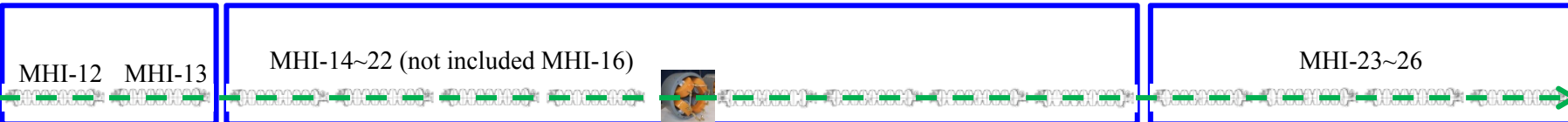
Quantum Beam



二空洞ビーム運転(capture cryomodule)

Phase-2

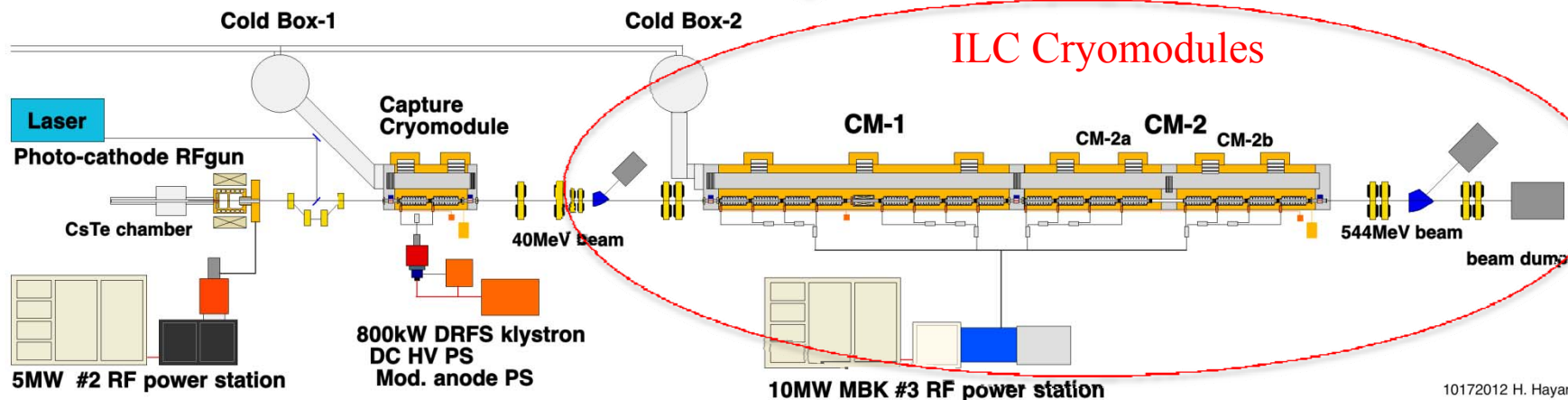
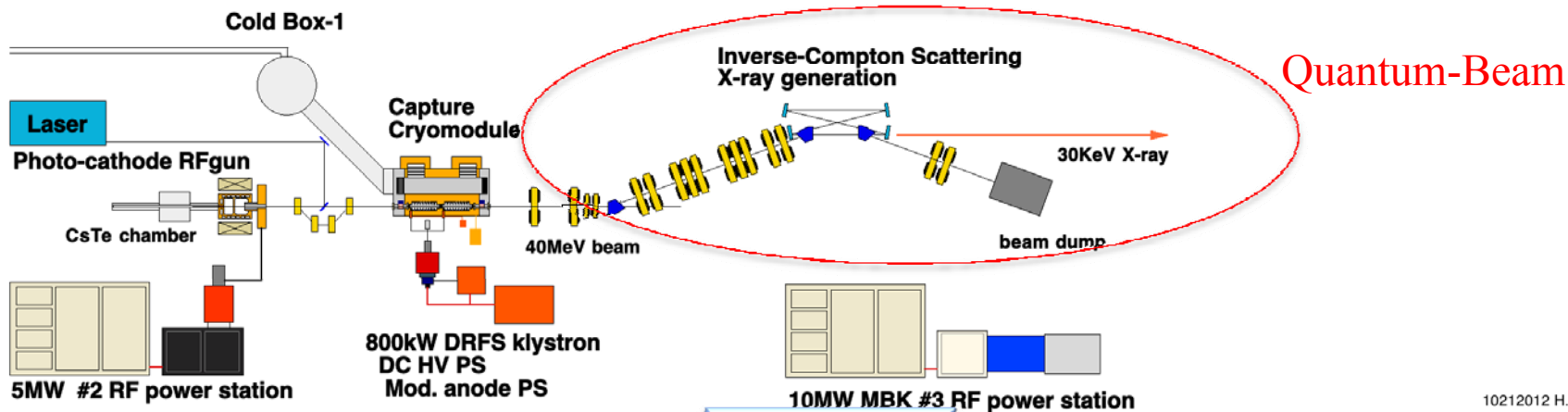
capture cryomodule + ILC spec.での十二空洞ビーム運転





量子ビームからSTF-2へ

STF Phase-2 Injector part (Quantum Beam Experiment)





大量生産への取り組みと KEK製空洞の製作



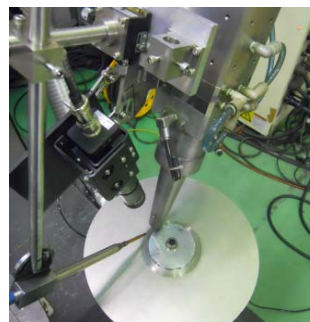
大量生産に向けた空洞製作の効率化

superconducting rf test facility

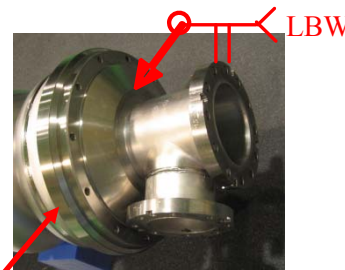
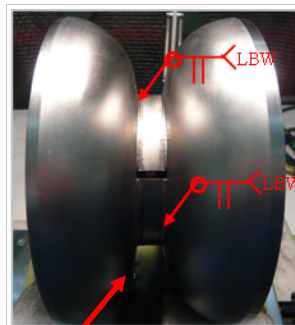
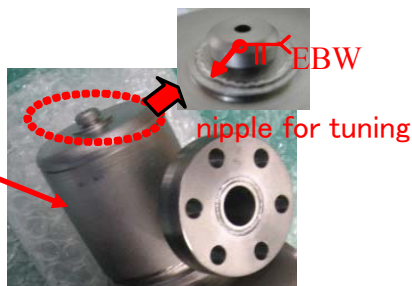
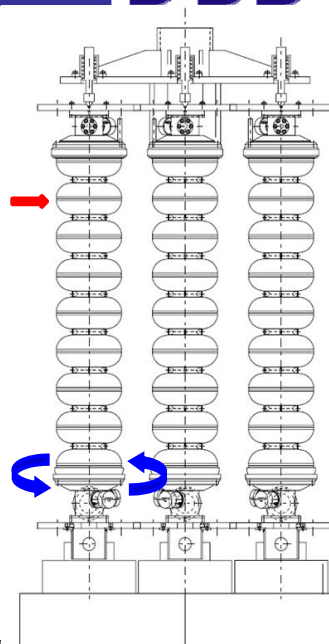


- レーザービーム溶接の使用
- 多ダンベル連続溶接

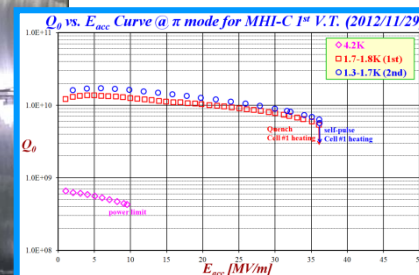
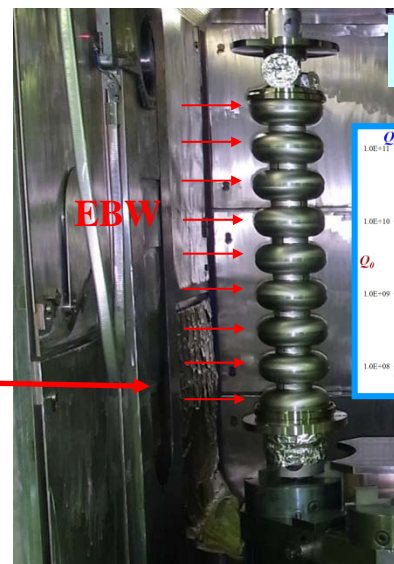
→ コスト削減



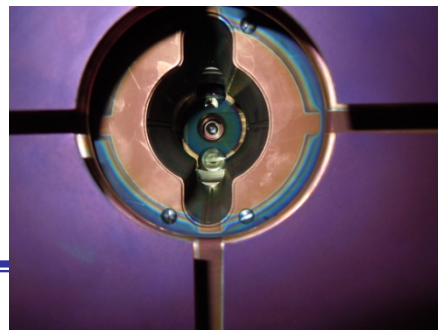
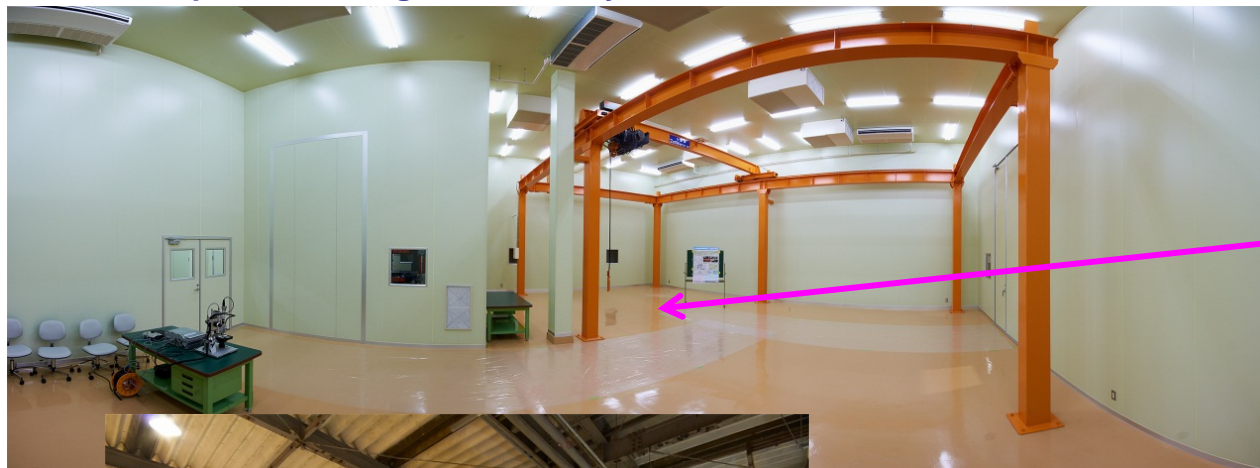
EBW →



4 cavities / 1 batch



36MV/m達成!



KEK製1号機を鋭意製作中。
高圧ガス法への取り組みも
同時に進めている。



- STF Phase-2用のCM-1およびCM-2aの組み立て、高電界試験および31.5MV/mでのビーム運転の実施。
- 35MV/m以上の高電界性能の達成(目標：40MV/m)。
- 高圧ガス対応のKEK製空洞の完成。
- 空洞量産化に向けた製造工程の改善。



- STFにおける超伝導空洞の技術開発は着実に進展している。
- 最近の空洞性能は平均加速勾配で36.8MV/m、最大で40.9MV/mに到達している。
- S1-Global計画を通じて空洞およびその周辺機器の性能比較を行い、各機器の性能に違いは無いことを明確にした。
- 量子ビーム計画においてビーム運転を実施し、平均加速勾配28MV/mで安定な運転が行えることを示した。
- STF Phase-2においてILC spec.を満たすクライオモジュールのビーム運転実施予定。
- 高圧ガス対応のKEK製空洞の完成を目指す。
- 空洞大量生産に向けた製造工程の効率化を実施。
- 高周波大電力源、冷凍機設備、表面処理設備においてもさらなる改善の努力が続けられている。