

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)

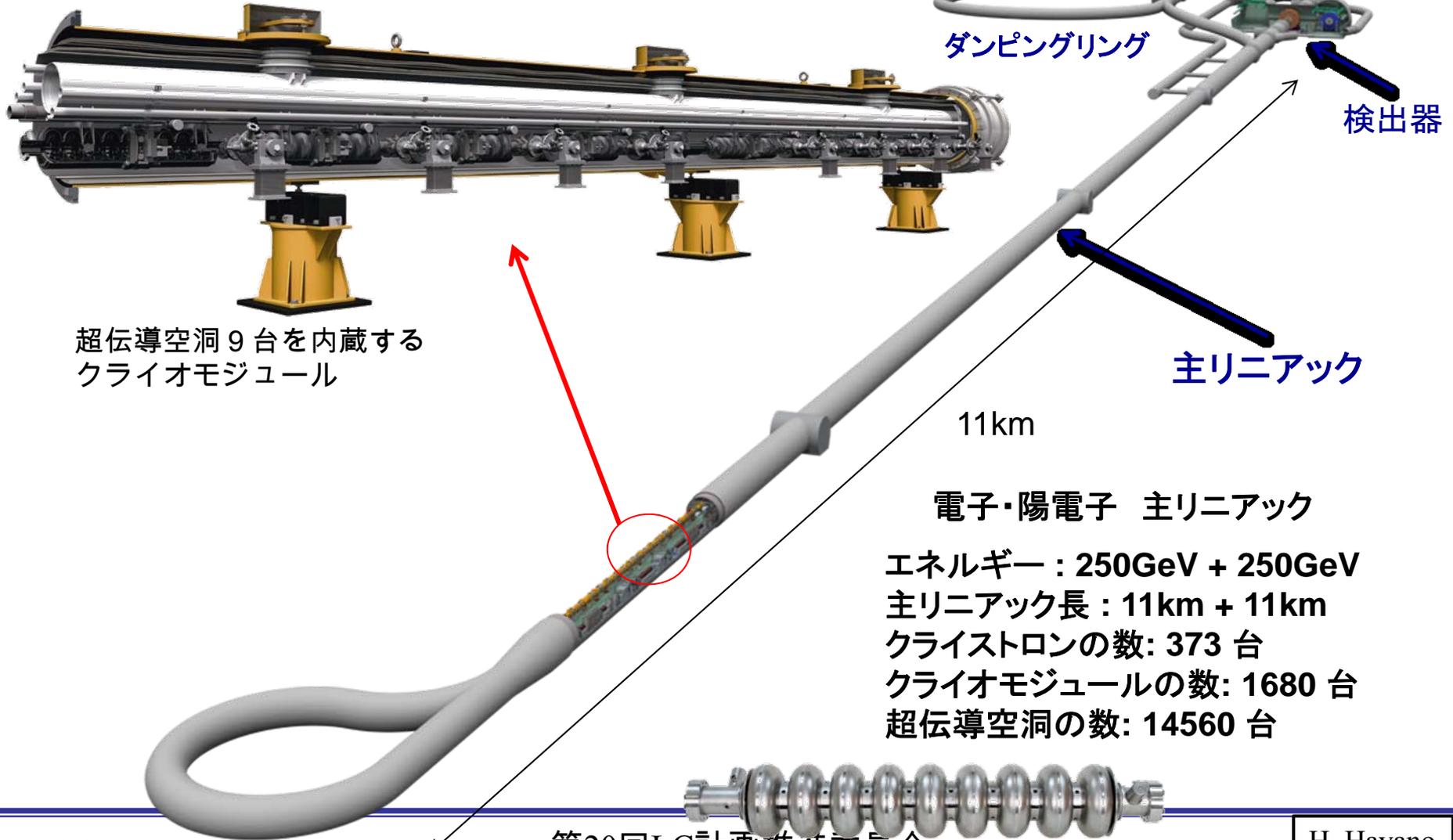


- ILC加速器の概要
- STFの目指すもの
- STFの歴史
- STFのインフラについて
- 空洞性能と制限理由およびその対処について
- クライオモジュールテストとビーム運転
- 大量生産への取り組み
- 今後の展望とまとめ



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



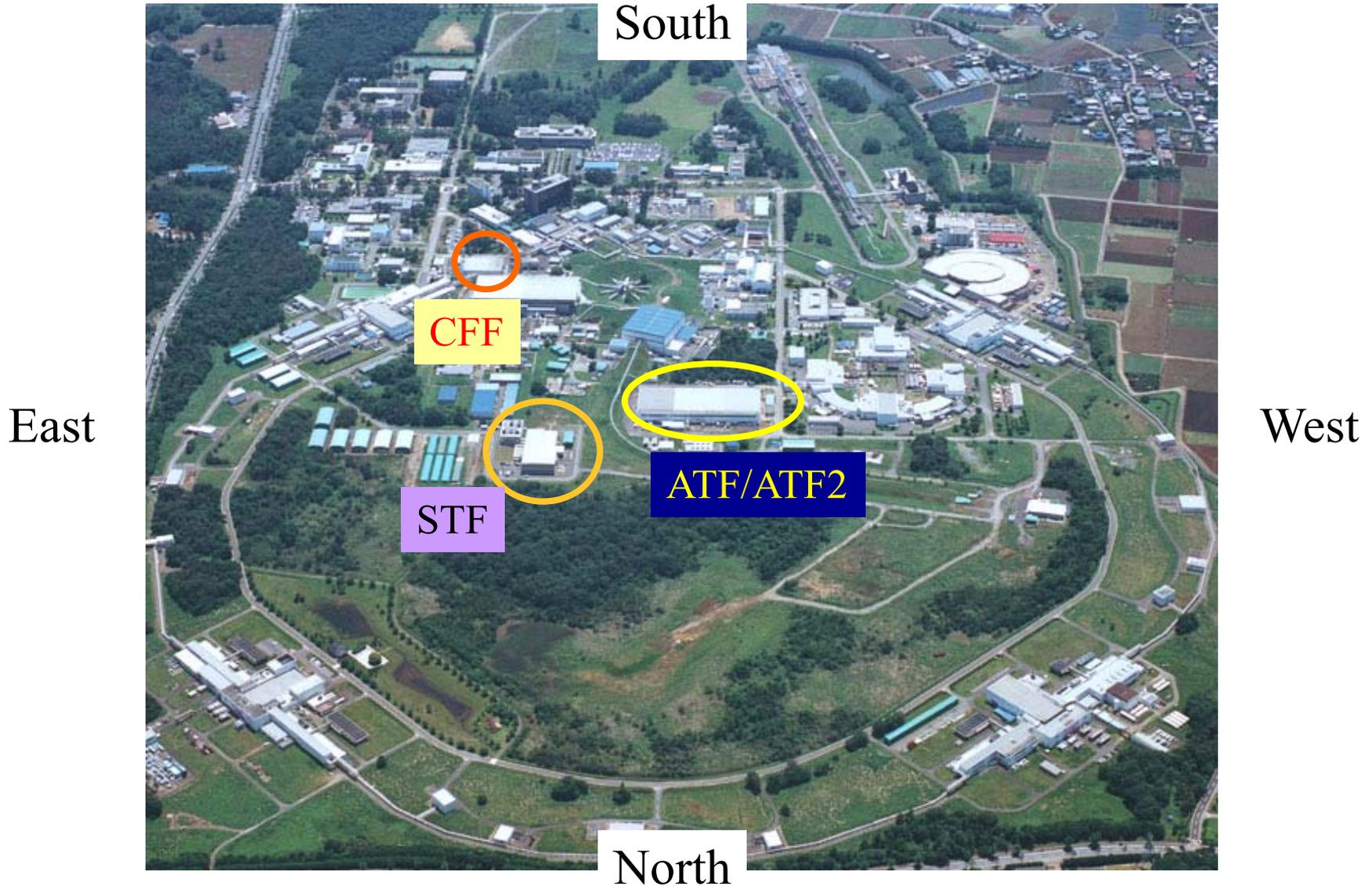
- 空洞性能の向上および制限理由の解明
- クライオモジュールでの高電界安定運転の実証
- ビームを含む安定な加速器運転の実証



- 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



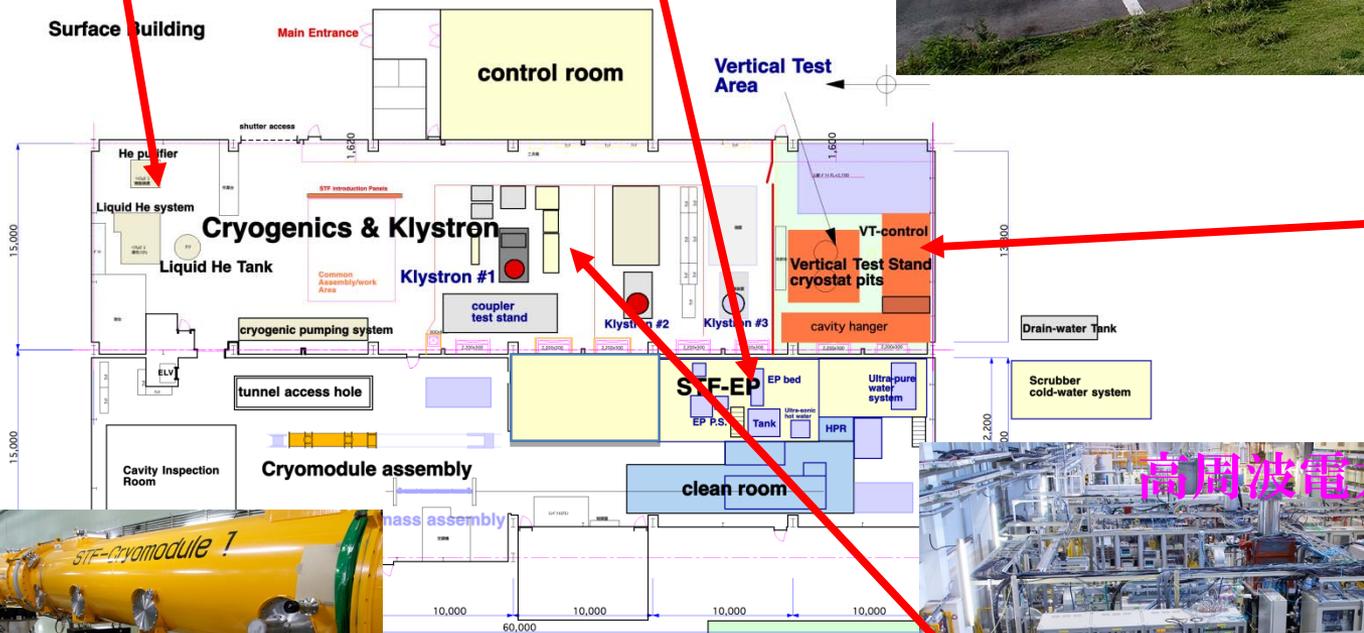
冷凍機設備



電解研磨設備



STF (Supercooled)



空洞性能試験設備



高周波電力源



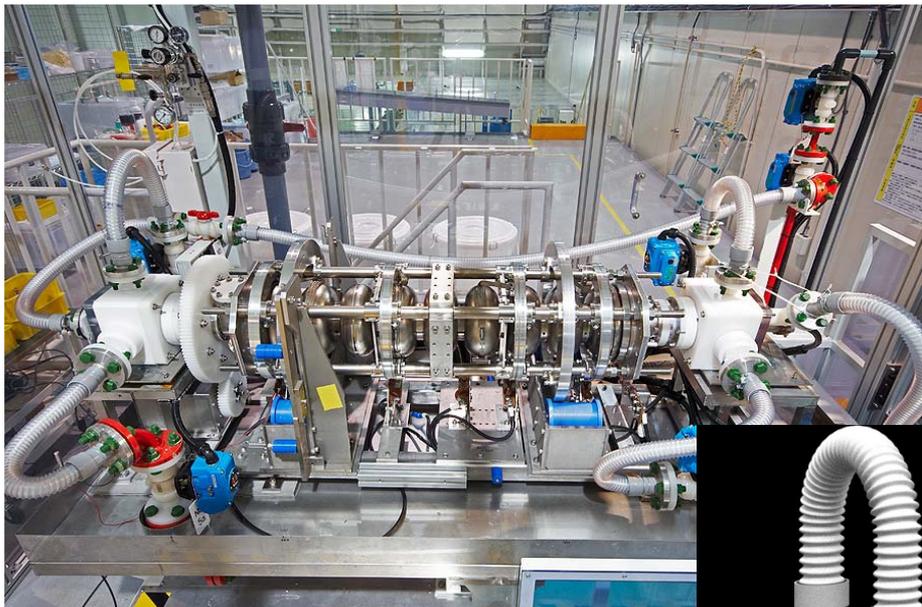
加速器トンネル





超伝導空洞に必須の内面電解研磨処理

superconducting rf test facility



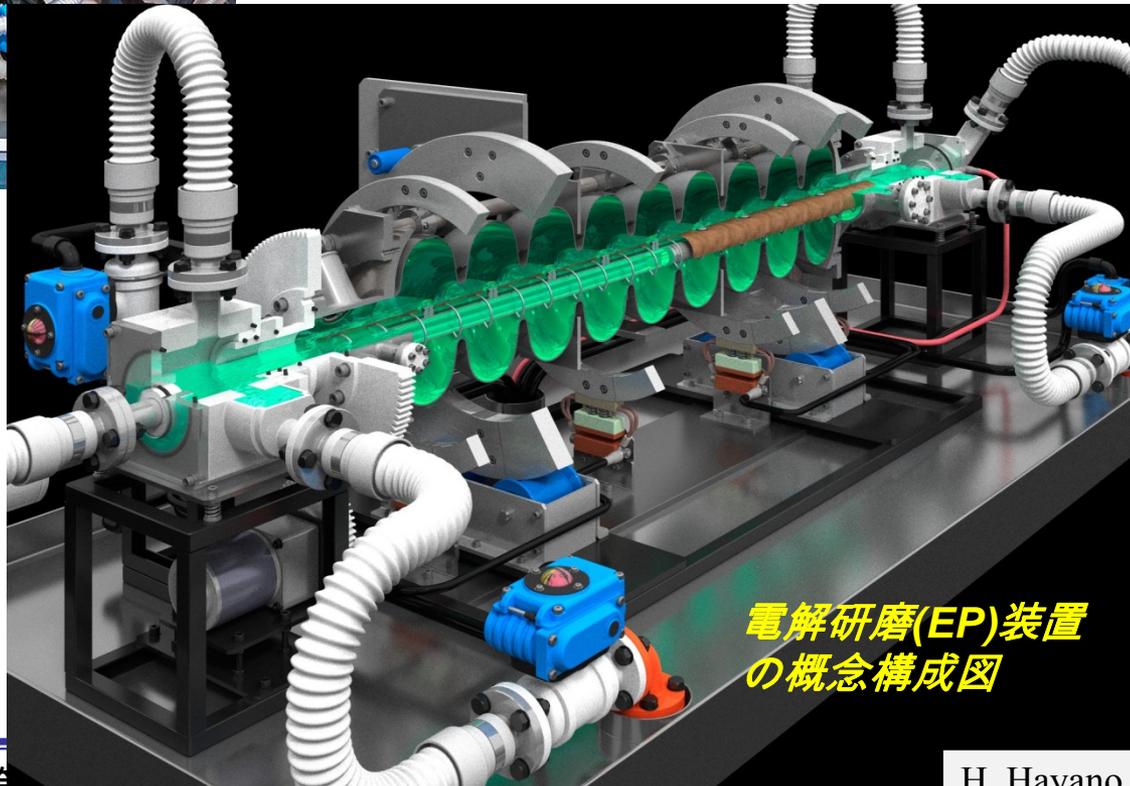
電解研磨 (Electro-Polish)

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。

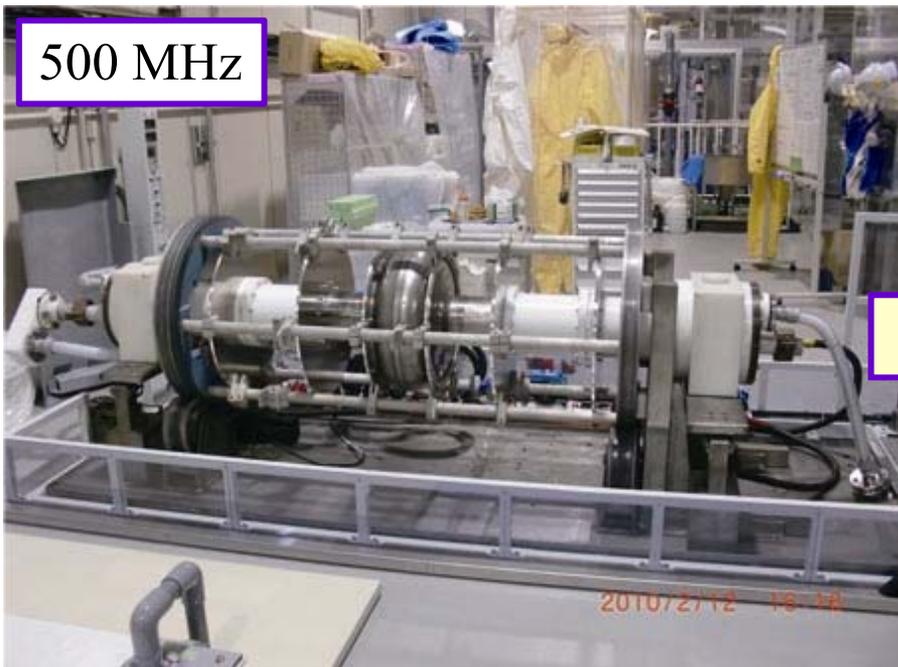


電解研磨(EP)装置
の概念構成図

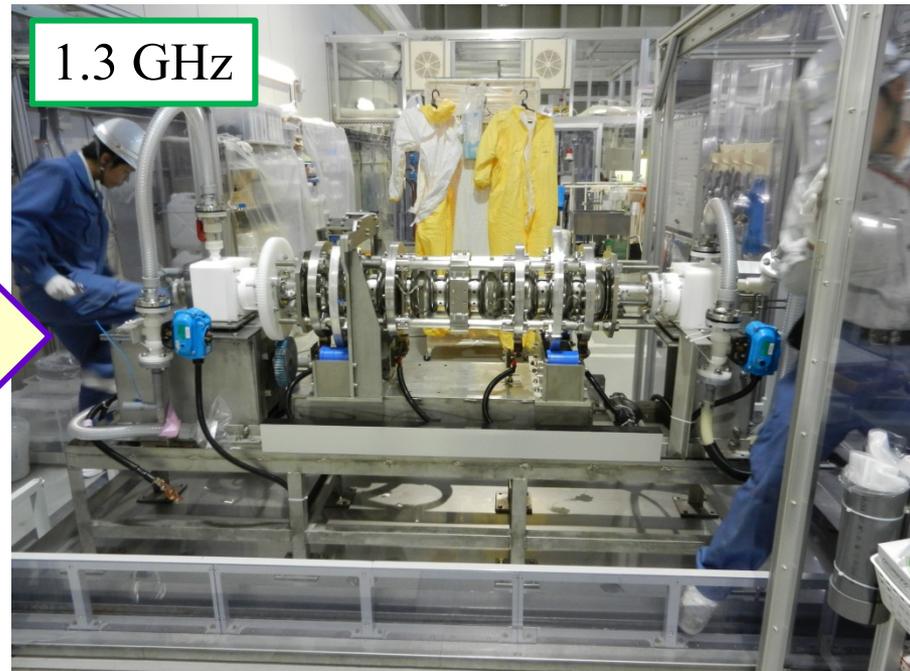


500MHz専用のシステムを1.3GHzにも対応できるように改良した。

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



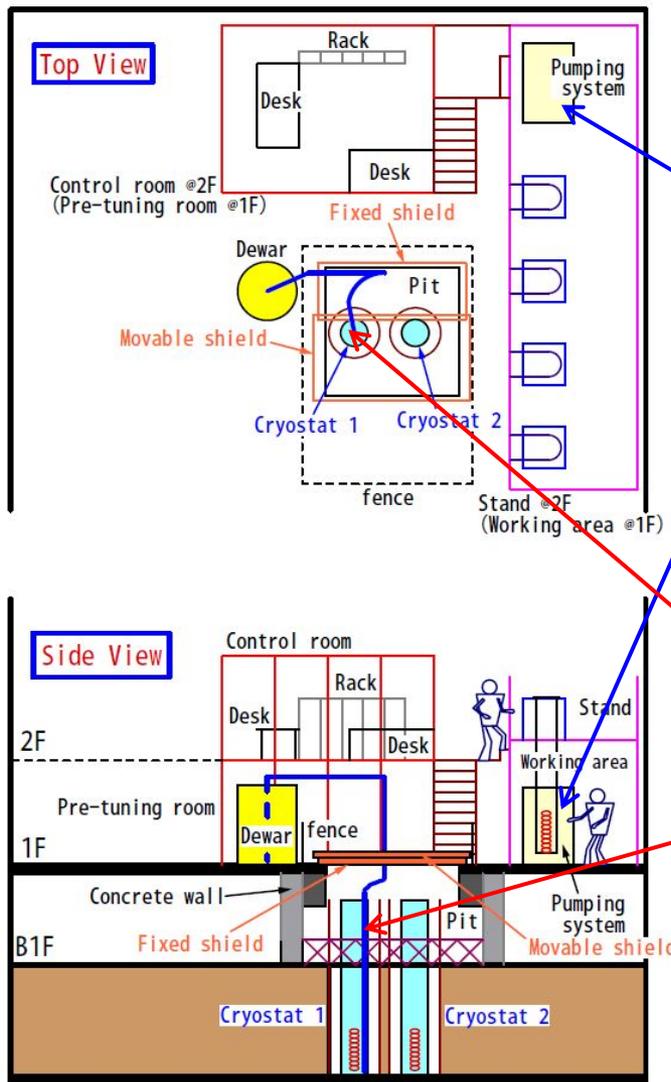
空洞性能試験(縦測定)設備



空洞性能試験設備

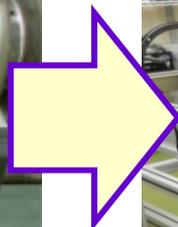
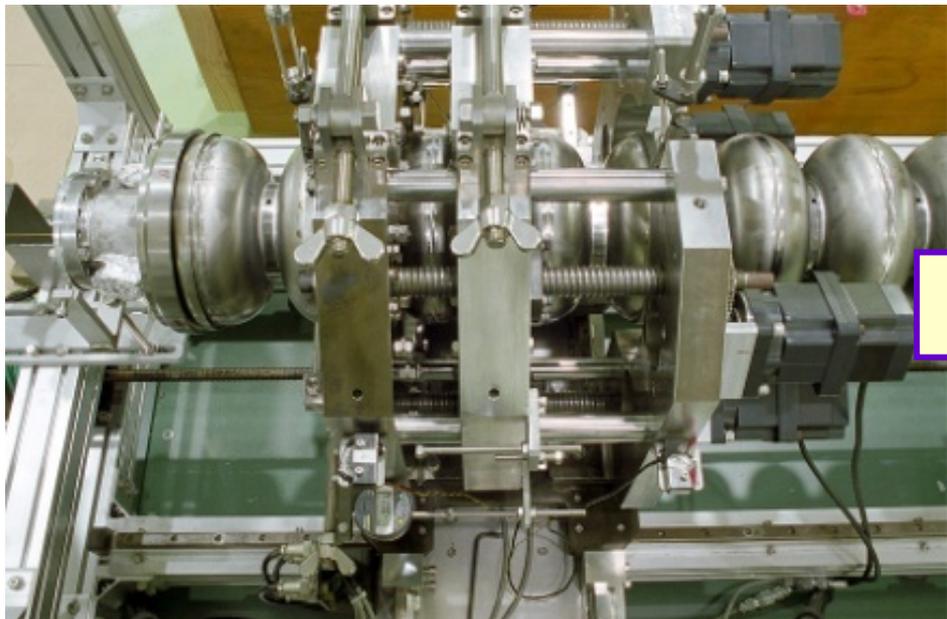


- ✓ 2 cryostats
- ✓ 4 stands
- ✓ radiation shield
- ✓ pumping system
- ✓ control room





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



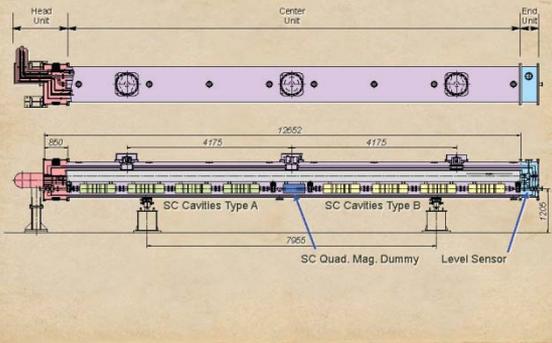
クライオモジュール組み立てエリアとトンネル内整備

superconducting rf test facility



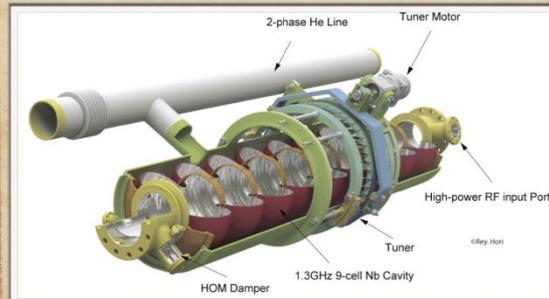


STF2-CM1 クライオモジュール



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

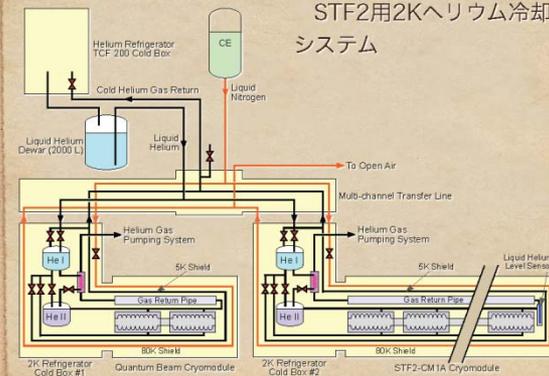
7

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

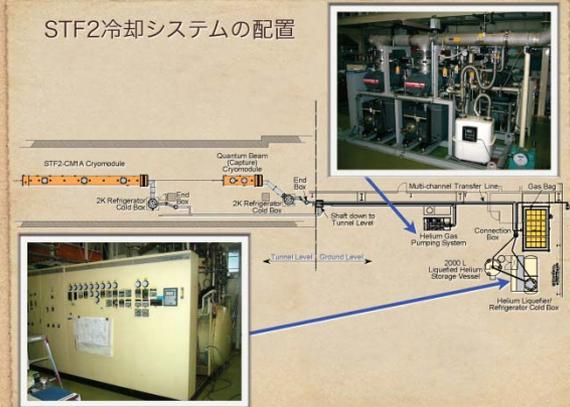
10

STF2用2Kヘリウム冷却システム



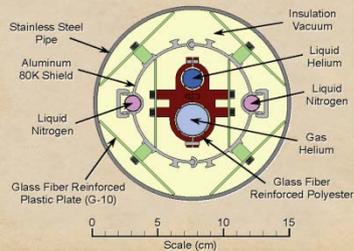
19

STF2冷却システムの配置



20

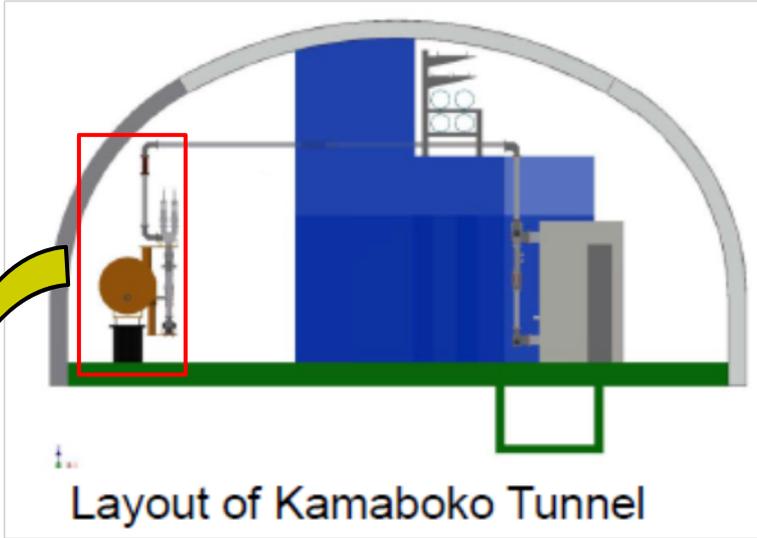
高性能トランスファーライン



22



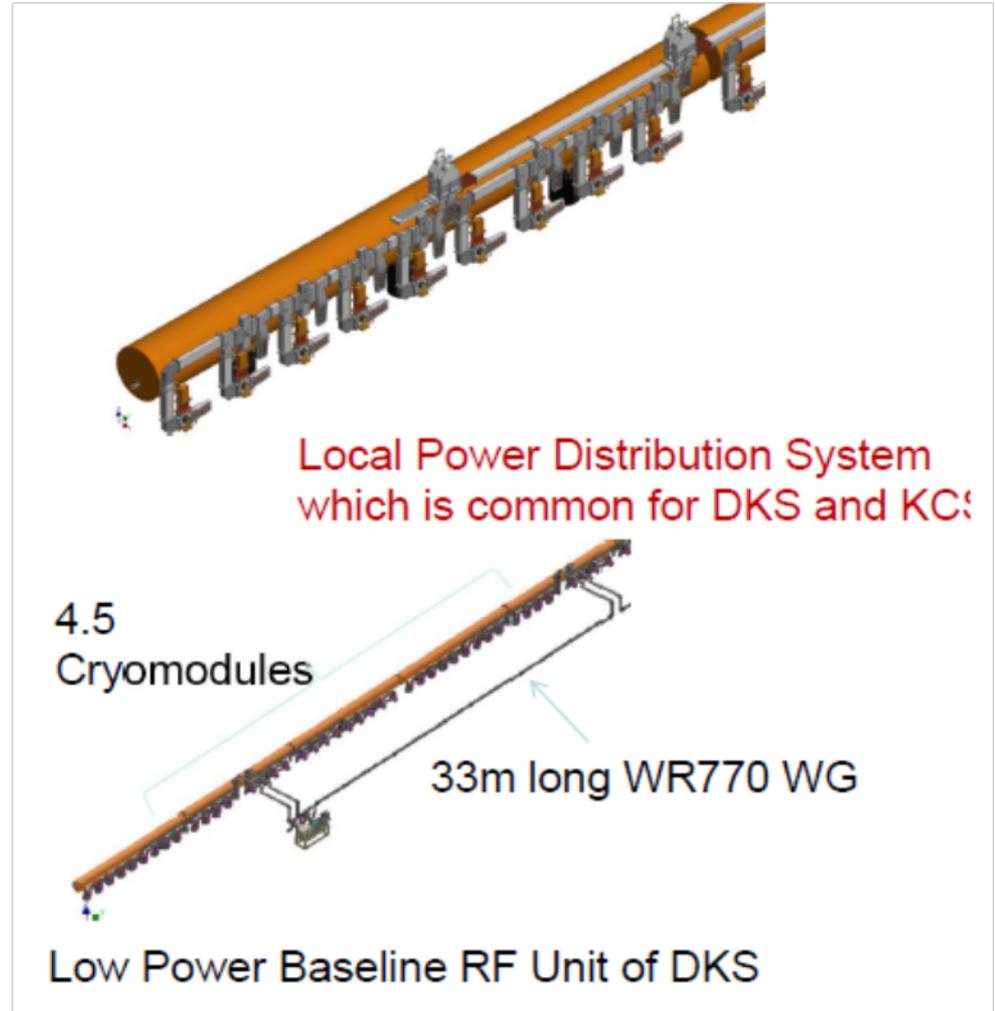
ILC加速器でのRF系



Layout of Kamaboko Tunnel



LPDS Cross Section View



Local Power Distribution System which is common for DKS and KC

4.5 Cryomodules

33m long WR770 WG

Low Power Baseline RF Unit of DKS



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



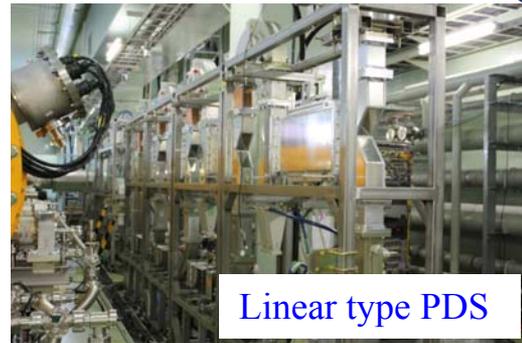
S1-Global

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



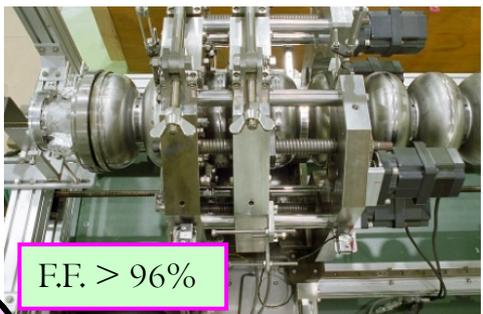
Sequence of cavity process

as received from a vendor



Optical inspection

f_0 & Field flatness measurement



F.F. > 96%

surface treatment (bulk EP~100 μ m)



annealing



Optical inspection

surface treatment (light EP ~20 or 5 μ m, Degreasing, HPR)

pre-tuning

Two weeks per one cycle

failure

V.T.

success



Cryomodule test





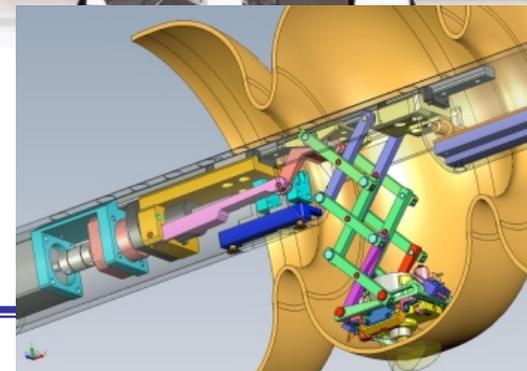
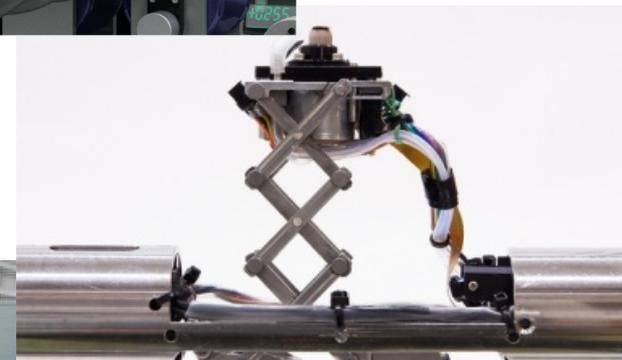
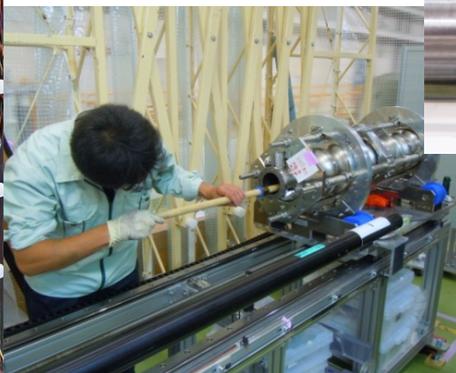
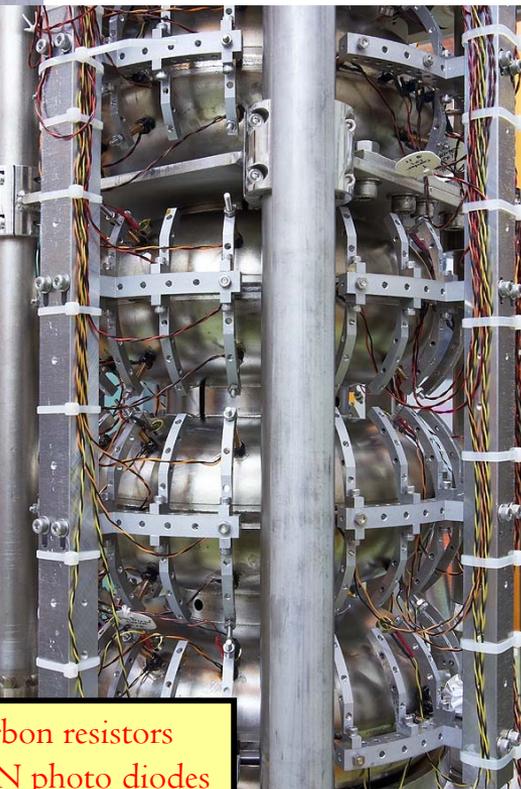
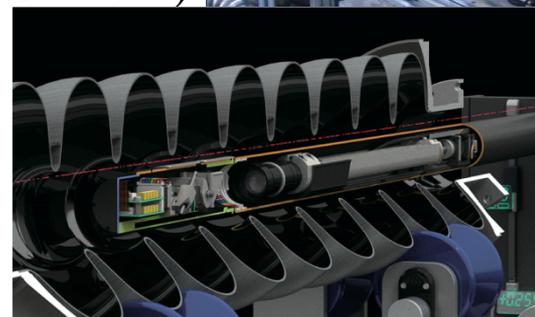
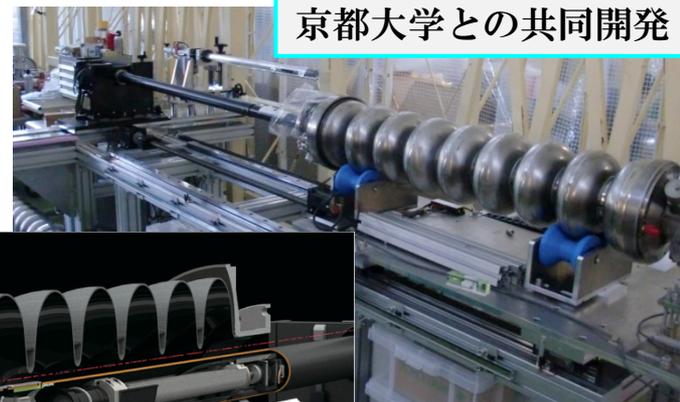
空洞性能向上に向けた取り組み

superconducting rf test facility



京都大学との共同開発

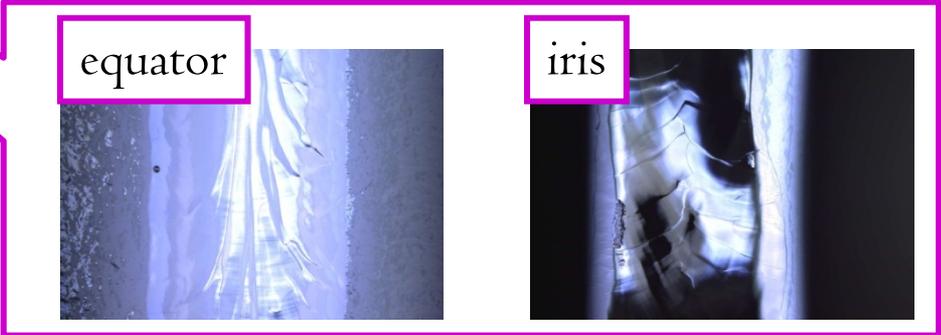
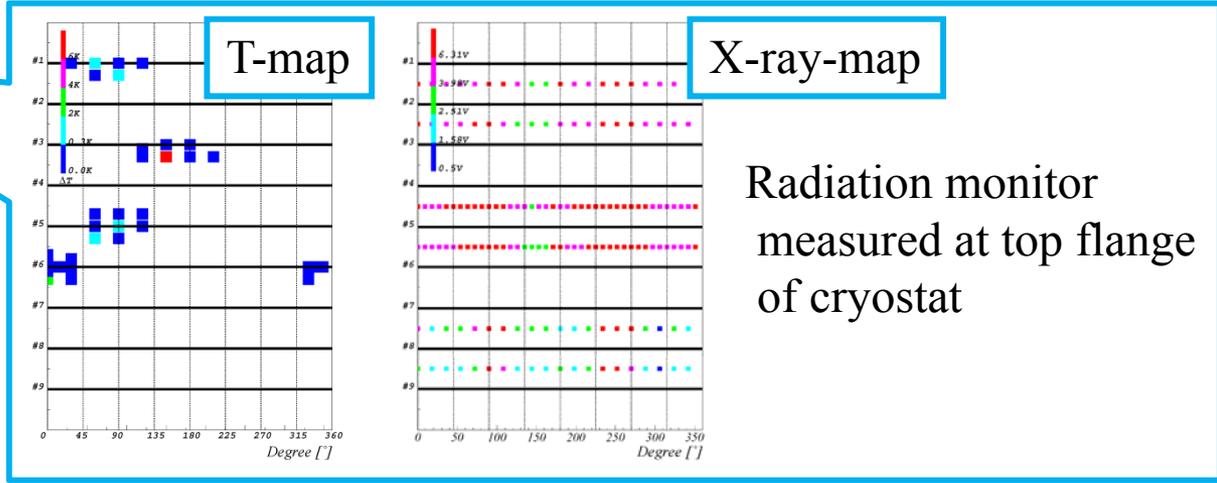
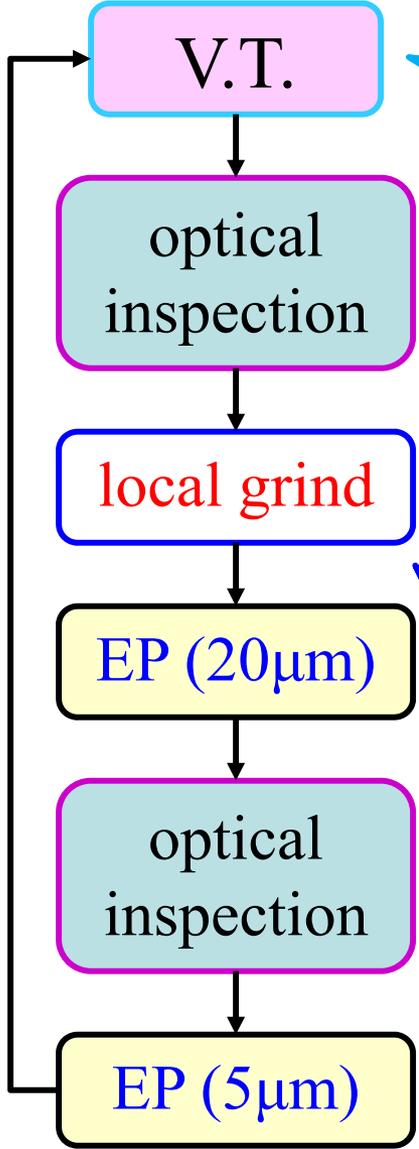
- 1) T-mapping/X-ray-mapping
- 2) Optical inspection (Kyoto Camera)
- 3) Local Grinding Machine



396 carbon resistors
182 PIN photo diodes
Radiation monitor



Cure for Failed Cavity

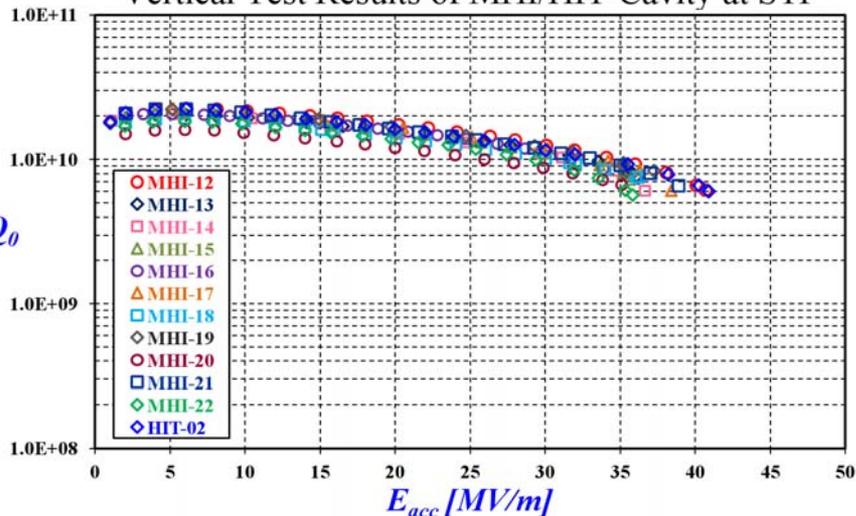




空洞性能の最近の結果

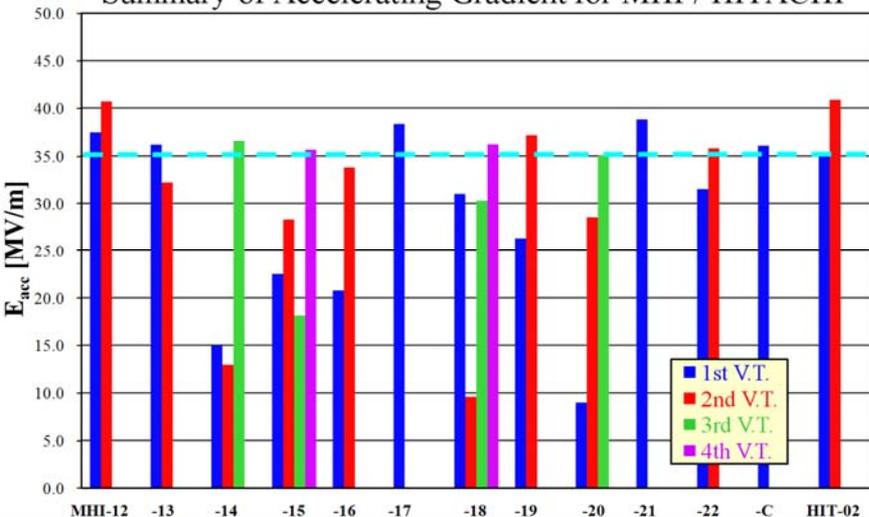


Vertical Test Results of MHI/HIT Cavity at STF



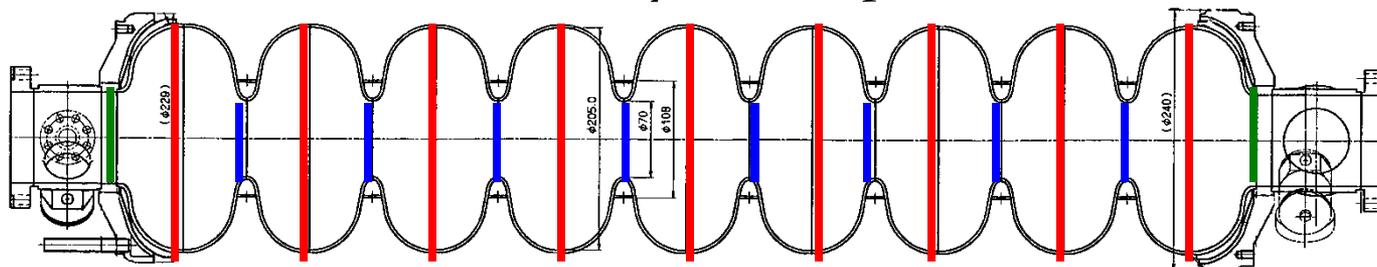
- ◆ STF Phase-2用の 8 空洞はいずれも35MV/m以上に到達した
- ◆ 平均加速勾配は 36.8 ± 1.8 MV/mである
- ◆ HIT-02号機が国内最高の41MV/mに到達した
- ◆ 大量生産を意識した試作機も36MV/mに到達している

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





赤道部

MHI-10

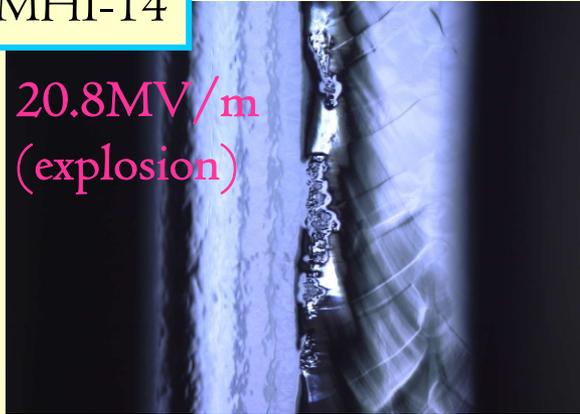


MHI-16



アイリス部

MHI-14

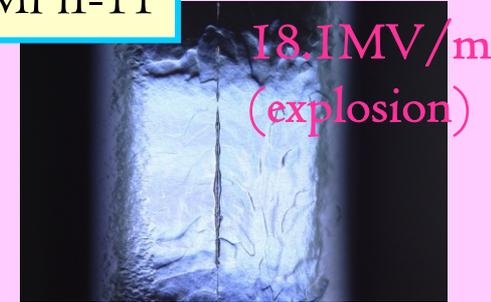


MHI-09



ビームパイプ 湾曲部

MHI-11



MHI-18



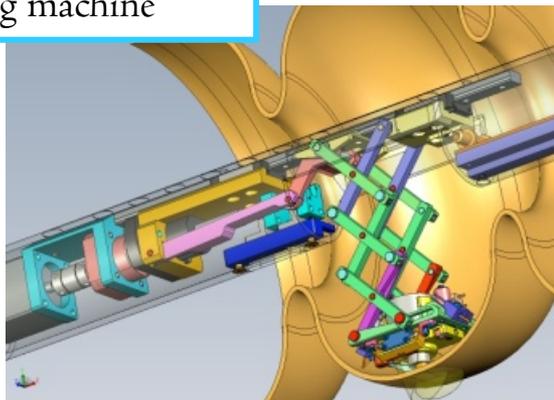
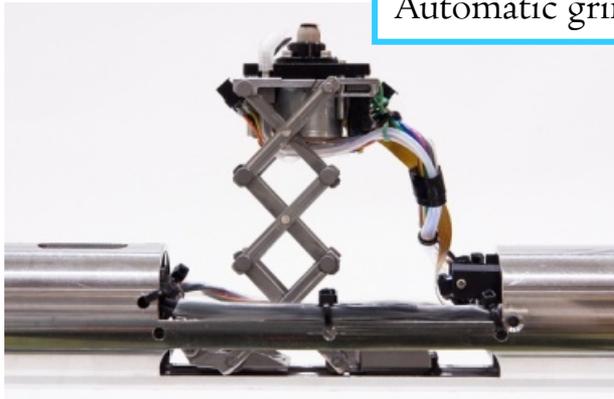
TOS-02





空洞性能を向上させる手段

Automatic grinding machine



Handy grinding



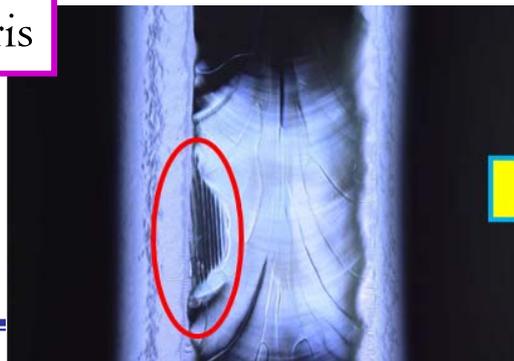
equator



HITACHI method



iris

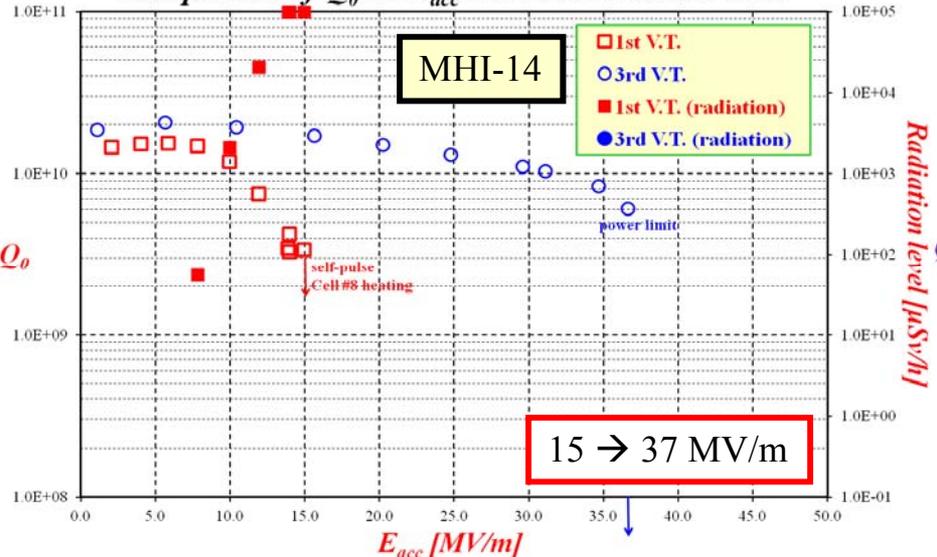




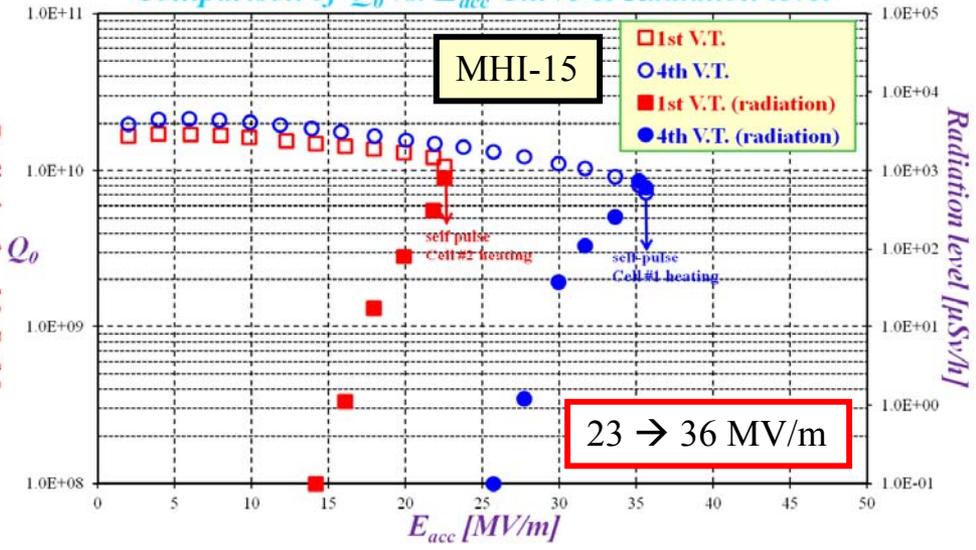
Improvement of cavity performance by local grind



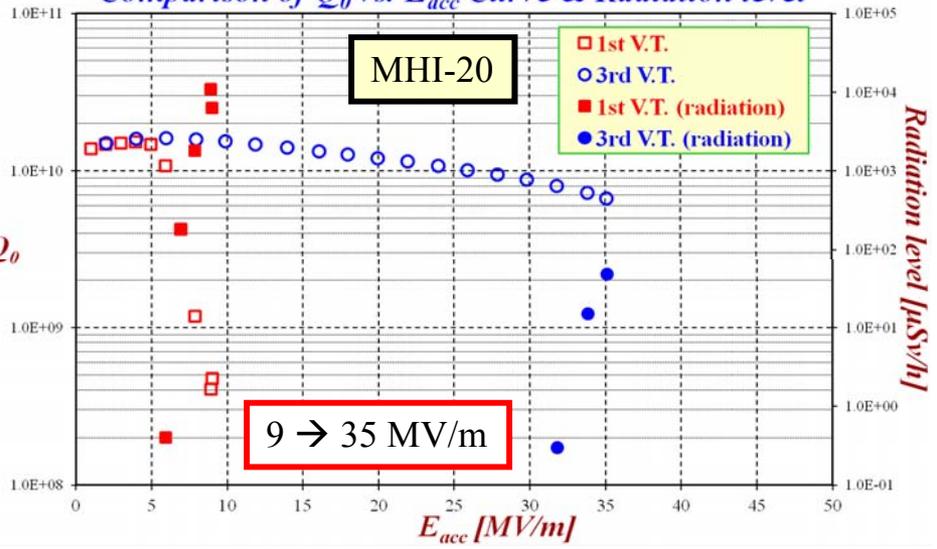
superconducting rf test facility
Comparison of Q_0 vs. E_{acc} Curve & Radiation level



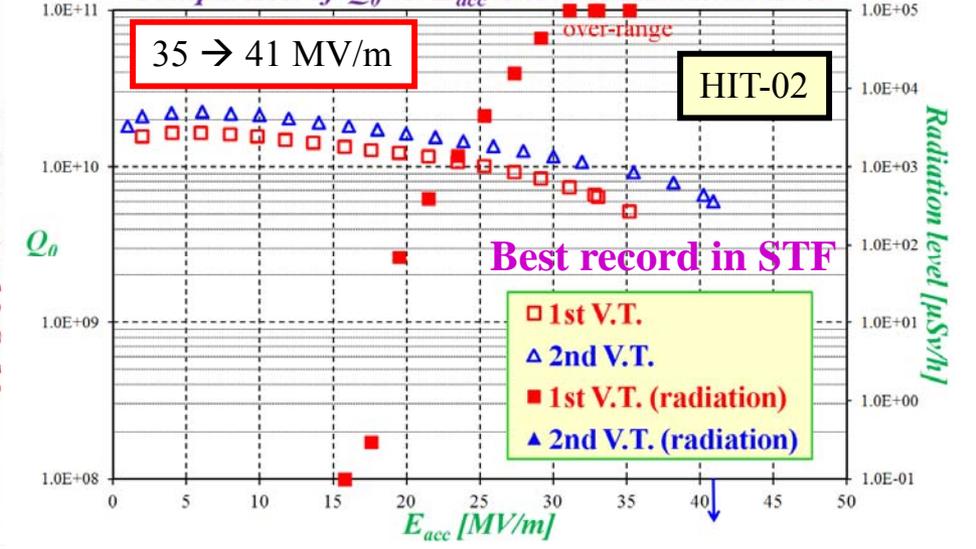
Comparison of Q_0 vs. E_{acc} Curve & Radiation level



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。

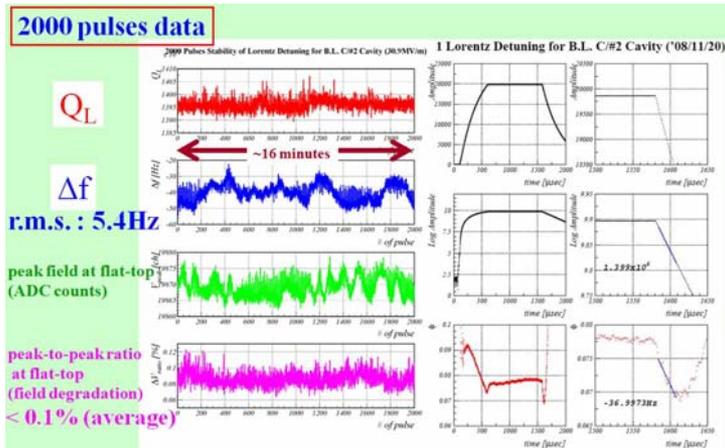
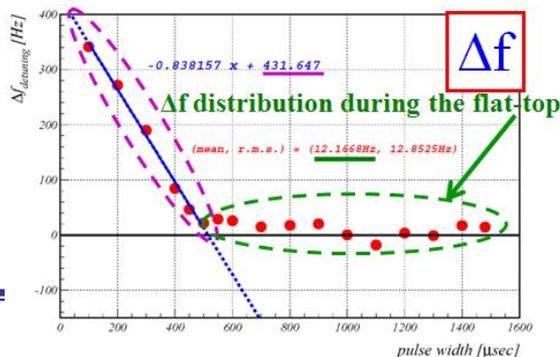
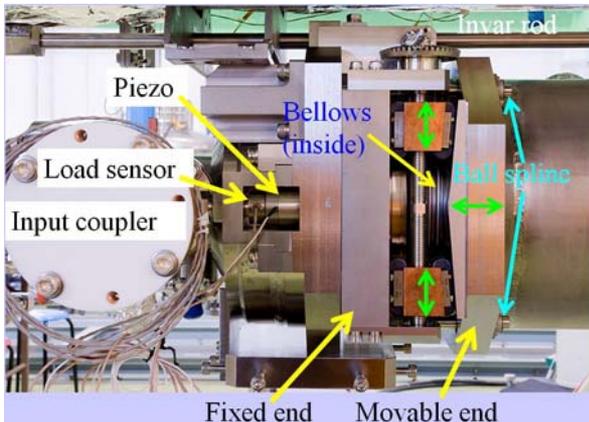
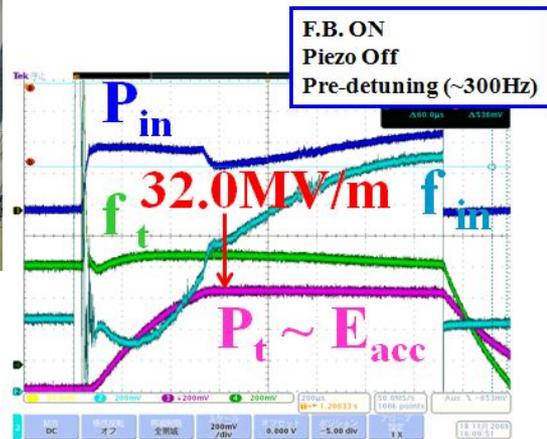
設計、製作、アセンブリー技術の習得、
2K冷凍機技術、
低熱負荷クライオスタット技術、
高性能空洞製造と大電力パルス運転技術、
デジタル制御による空洞電圧安定化技術、
大電力分配系、空洞外部Q制御、など。



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。

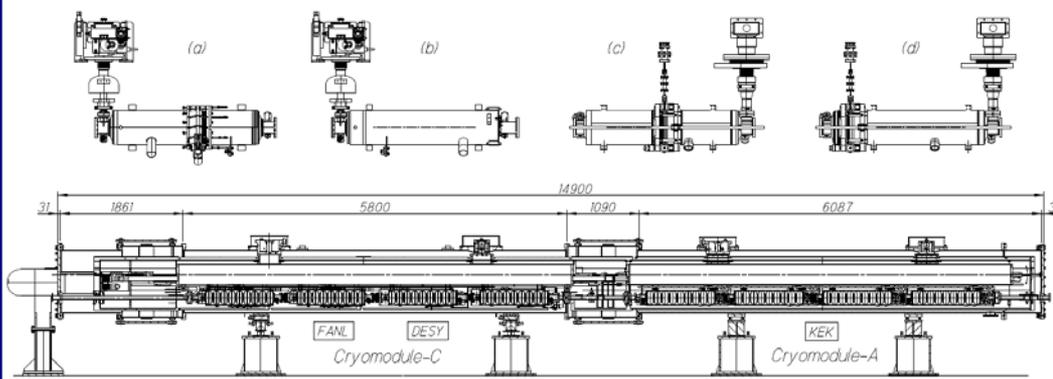
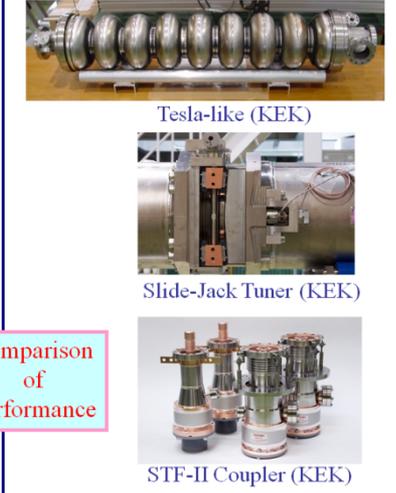
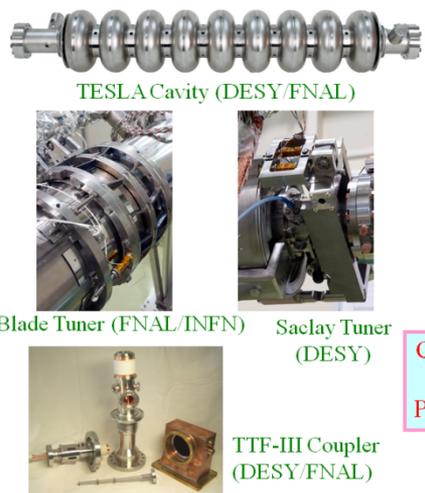




superconducting rf test facility

S1-Global計画

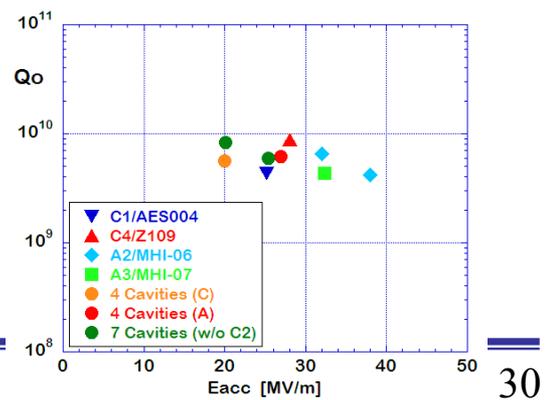
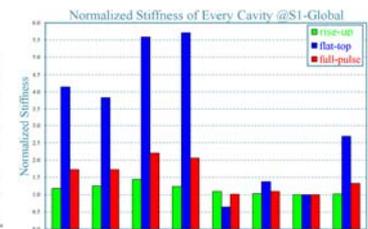
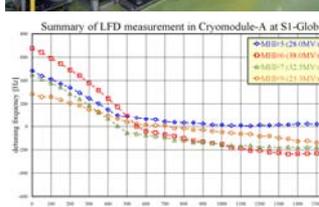
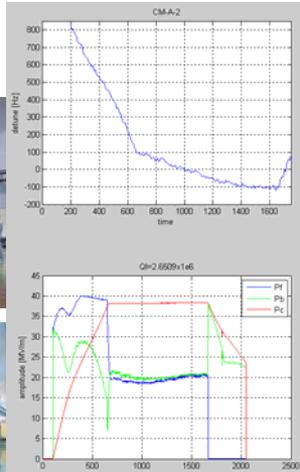
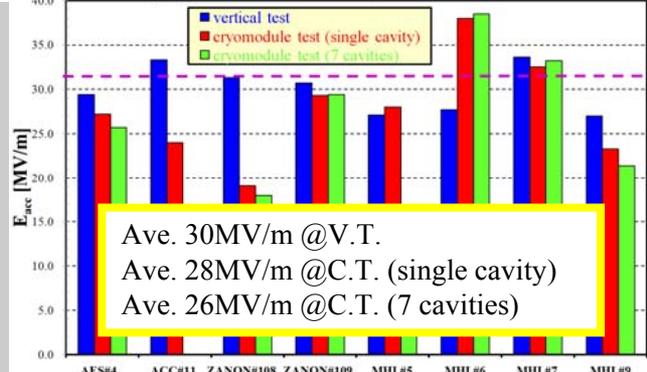
61 persons from 5 Labs!



Comparison of Performance

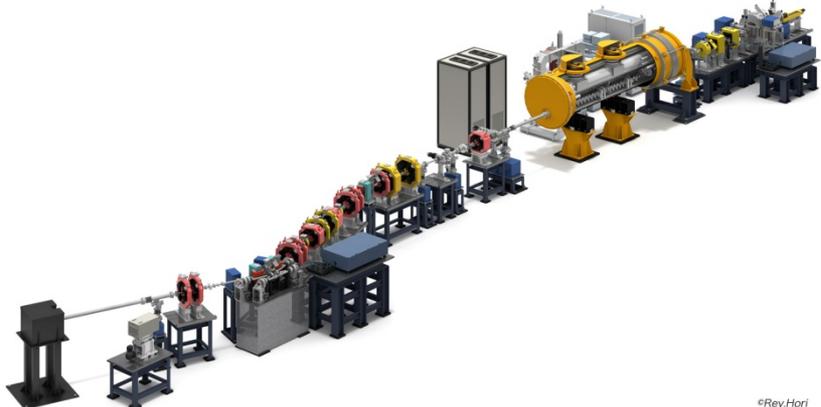


Summary of Achievable Gradient for all Cavities at S1-Global

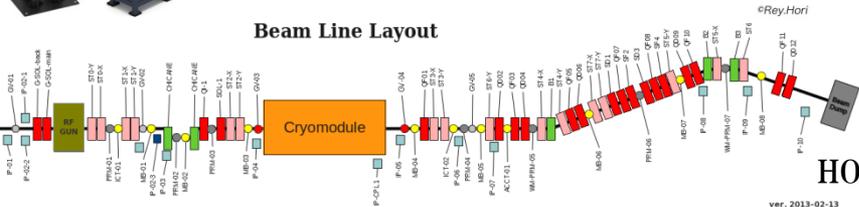




量子ビーム計画

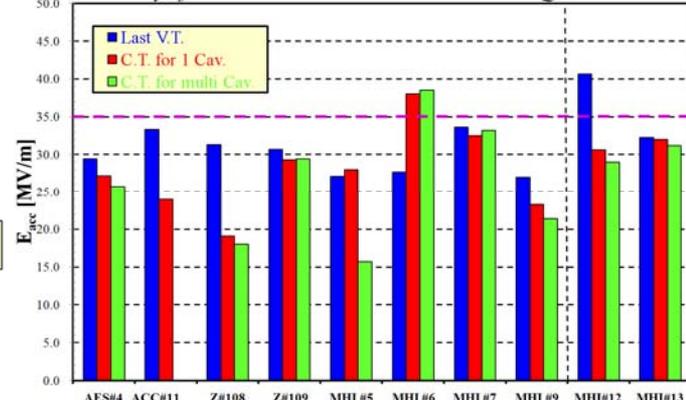


Beam Line Layout

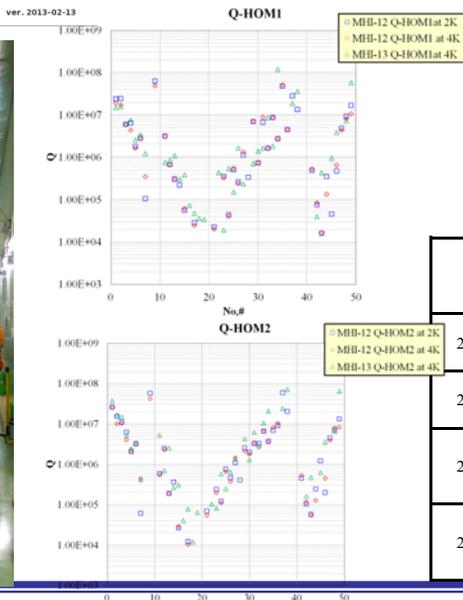


レーザーコンプトン実験のための電子ビーム加速のために2台の超伝導空洞を用いたクライオモジュールが導入された。平均運転勾配20MV/mで安定な運転が行えている。Studyとして平均運転勾配28MV/mのビーム加速を実施し、問題が起こらないことを確認した。大電力試験中に一台の性能が劣化したが、ビーム運転後の性能劣化は起こっていない。

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



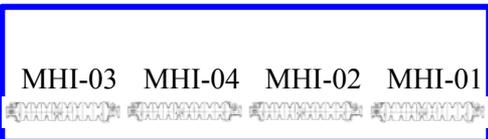
superconducting rf test facility

Phase-0.5



一空洞大電力試験

Phase-1



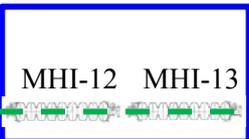
四空洞大電力試験

S1-Global



七空洞大電力試験(国際協力)

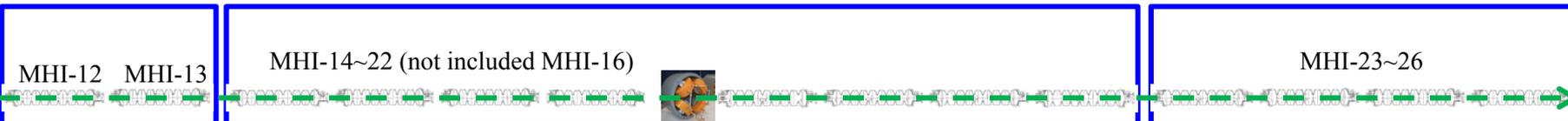
Quantum Beam



二空洞ビーム運転(capture cryomodule)

Phase-2

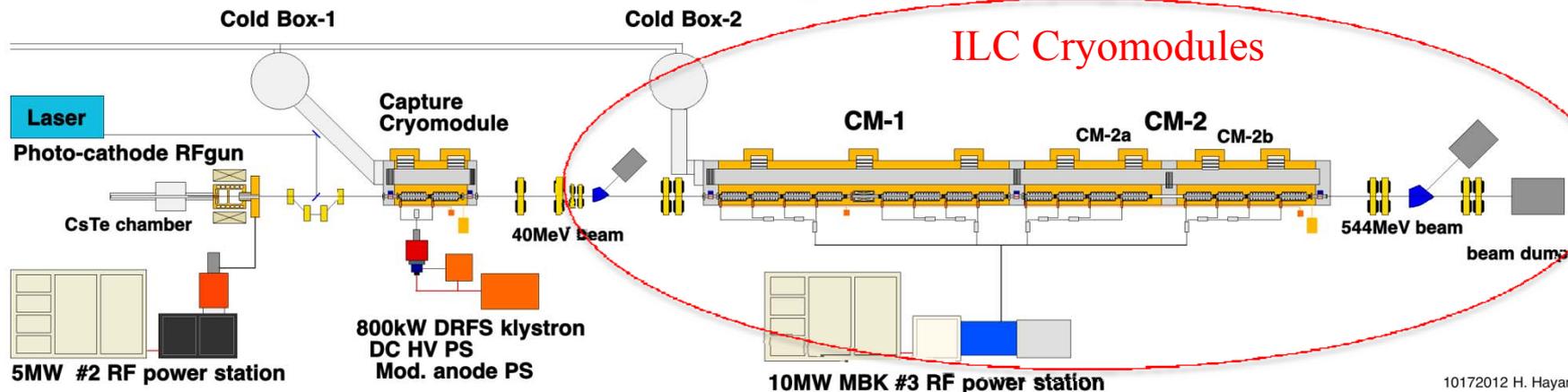
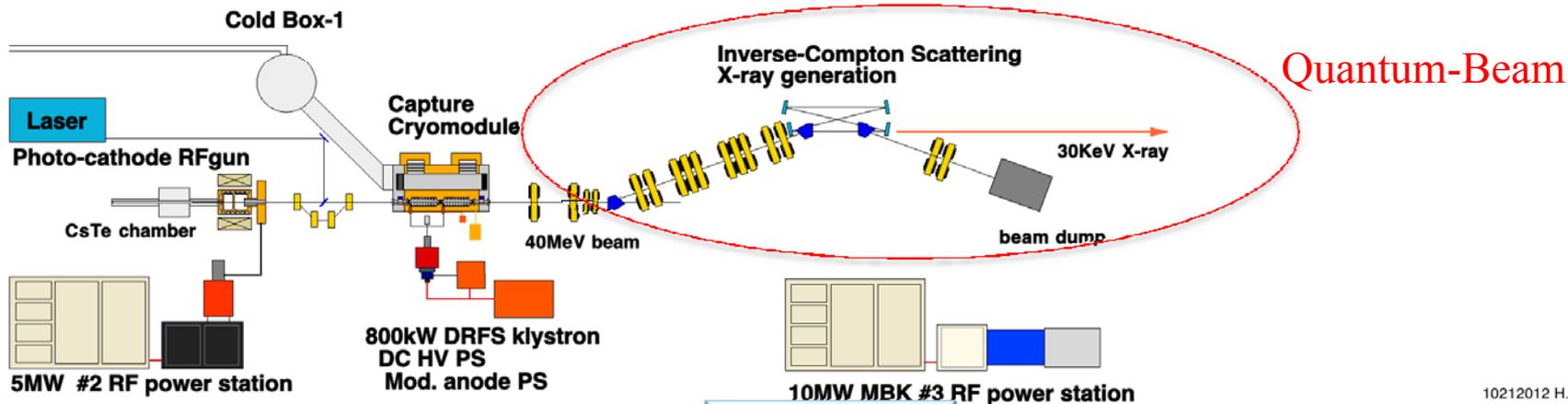
capture cryomodule + ILC spec.での十二空洞ビーム運転





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



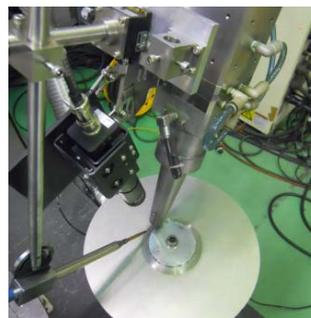
大量生産に向けた空洞製作の効率化

superconducting rf test facility

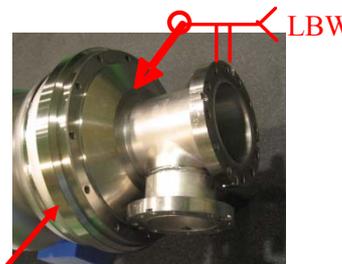
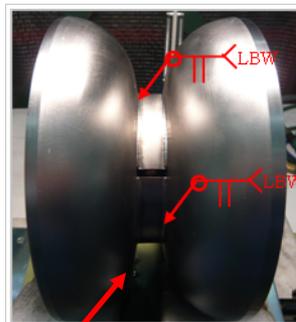
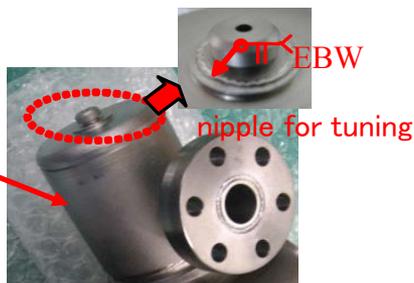
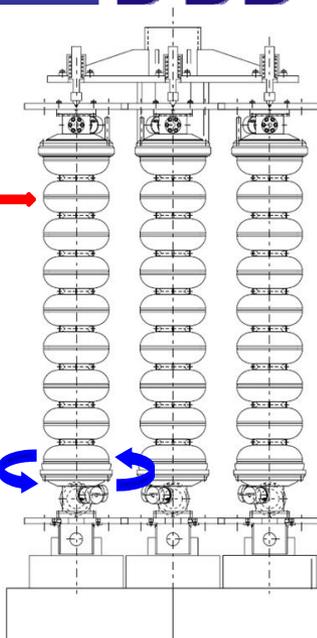


- レーザービーム溶接の使用
- 多ダンベル連続溶接

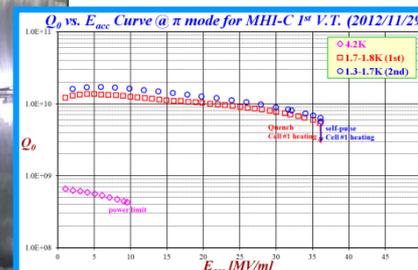
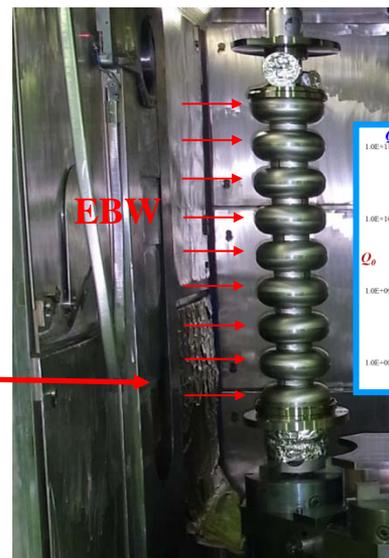
→ コスト削減



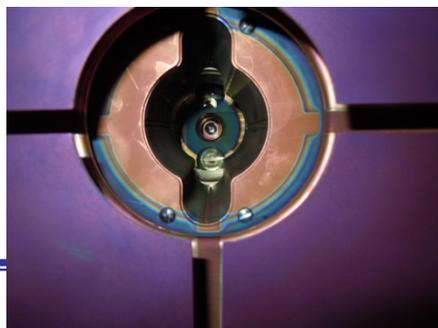
EBW →



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。