



*international linear collider*



# ILCに向けた超伝導加速器技術開発

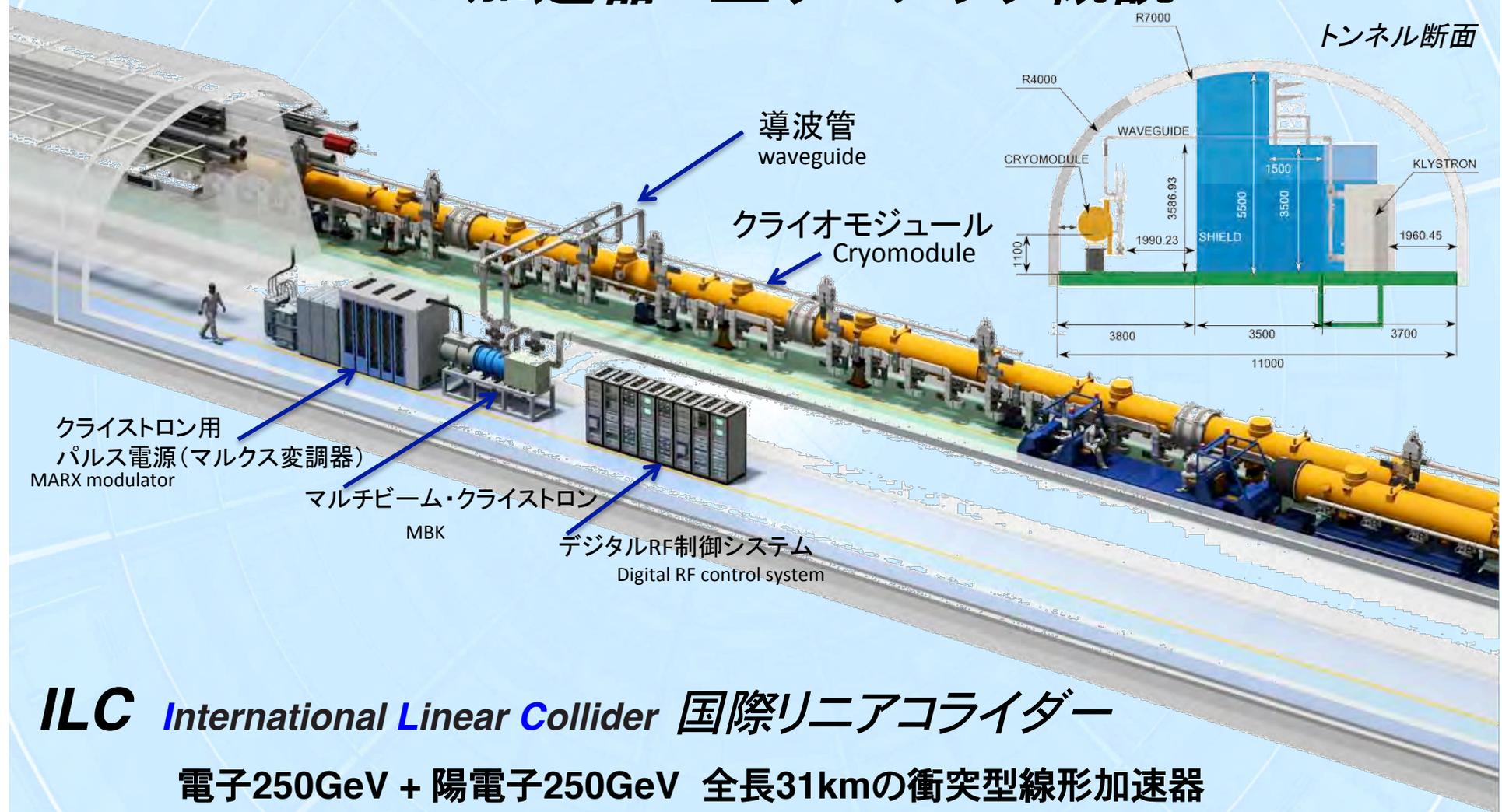
高エネルギー加速器研究機構  
早野仁司、STFグループ



# 内容

1. **ILC 加速器 主リニアック概説**
2. **STFにおける超伝導加速器開発**
3. **超伝導加速空洞開発**
4. **まとめ**

# ILC 加速器 主リニアック概説



**ILC** International Linear Collider 国際リニアコライダー

電子250GeV + 陽電子250GeV 全長31kmの衝突型線形加速器

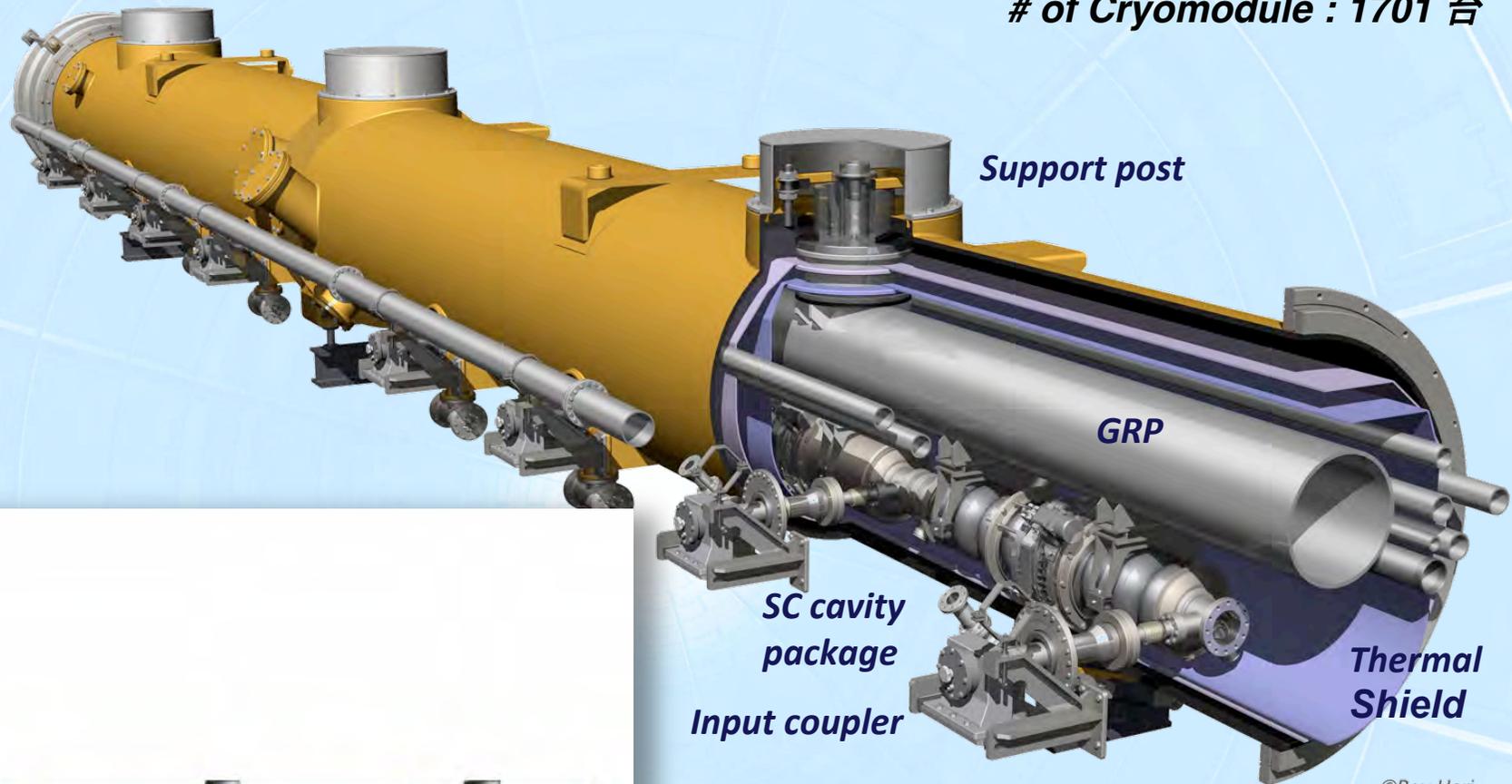
建設費の**67%**が主線形加速器(装置+トンネル)

電子主リニアック(11km) + 陽電子主リニアック(11km)

# ILC クライオモジュール (超伝導加速モジュール)



# of Cryomodule : 1701 台



©Rey.Hori



## Cryomodule parameters

- 8 cavities ( or 9 cavities ) with TTF-III input couplers
- Quad +BPM in every 3 modules
- Linear RF distributions
- 1m diameter and 12m length cryostat
- 3 support posts
- 300mm diameter GRP as a backbone



# 超伝導加速空洞ユニット

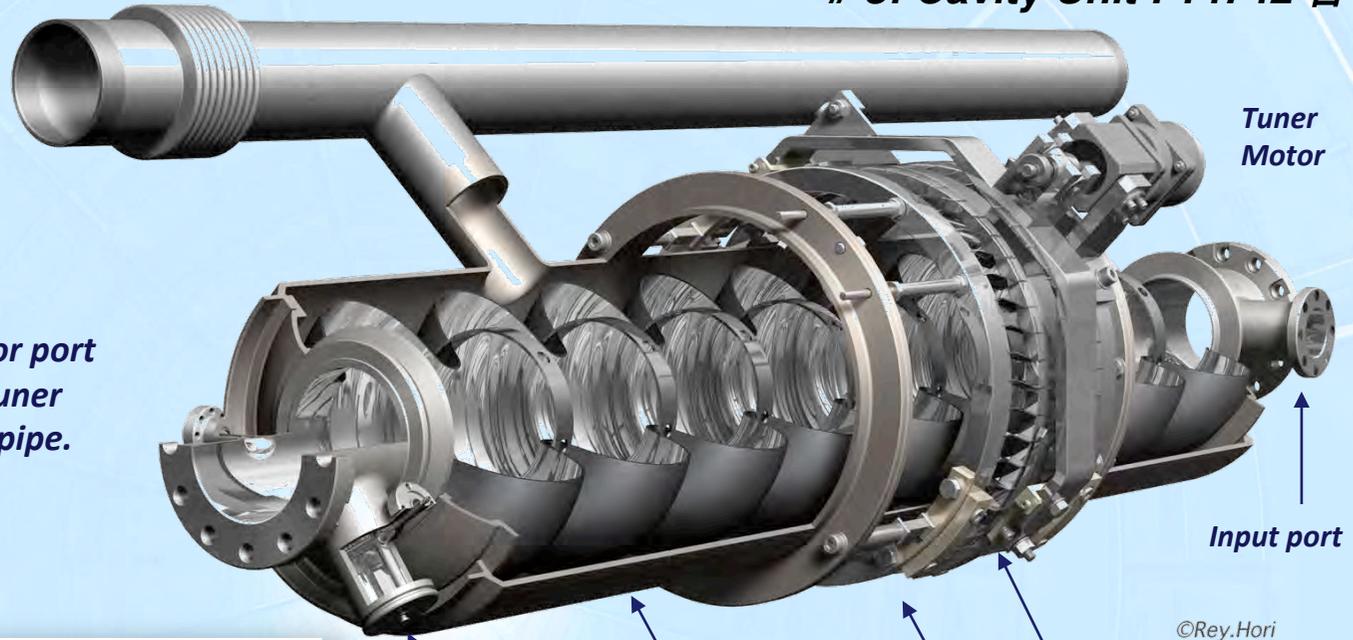
# of Cavity Unit : 14742 台

2 phase  
line

Tuner  
Motor

## Cavity Unit parameters

9 cell TESLA-shape Nb cavity  
with input coupler port,  
two HOM couplers, one monitor port  
Mechanical Tuner with piezo tuner  
Helium tank with 2-phase line pipe.

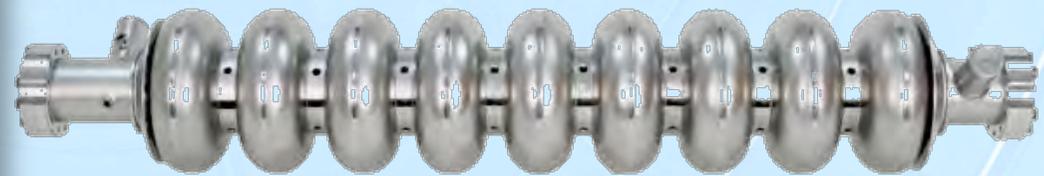
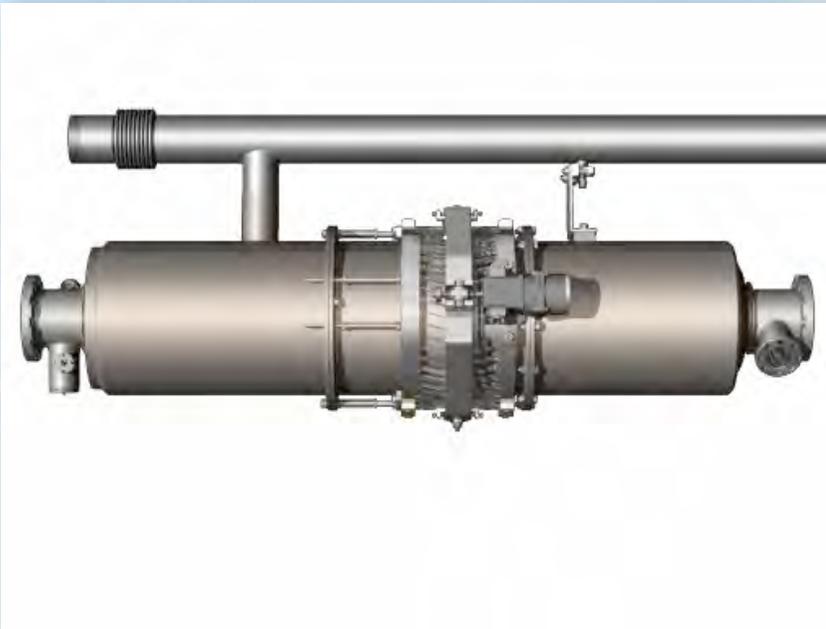


HOM coupler

Mechanical Tuner  
(Blade Tuner)

Helium tank

Piezo Tuner



超伝導加速空洞本体(純ニオブ製)

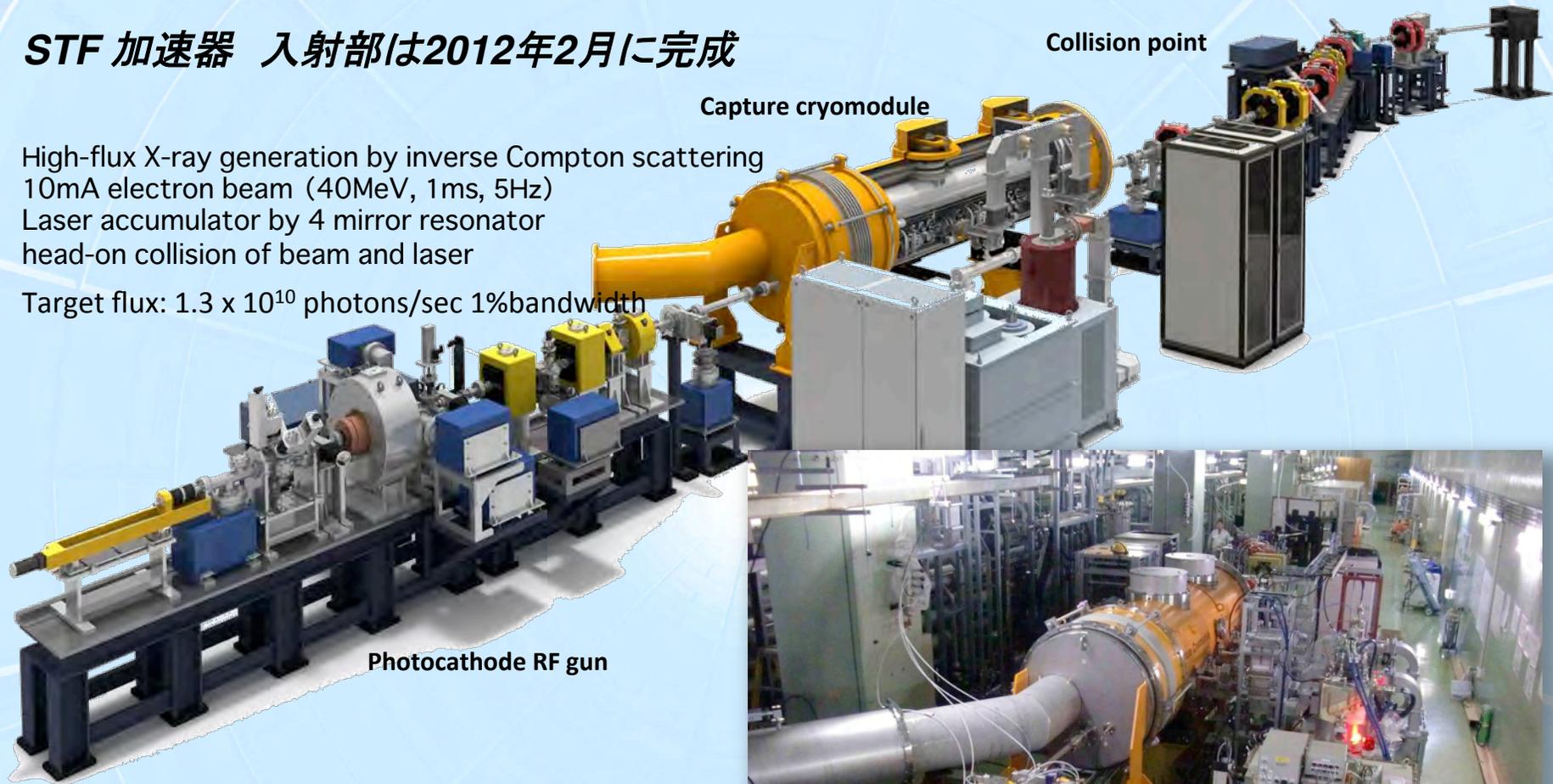
1.3GHz 9セル, 1.247m長, 平均運転勾配31.5MV/m

# **STFにおける超伝導加速器開発**

# 「量子ビーム」を利用して入射部を建設、運転

## STF 加速器 入射部は2012年2月に完成

High-flux X-ray generation by inverse Compton scattering  
 10mA electron beam (40MeV, 1ms, 5Hz)  
 Laser accumulator by 4 mirror resonator  
 head-on collision of beam and laser  
 Target flux:  $1.3 \times 10^{10}$  photons/sec 1%bandwidth



Photocathode RF gun

Capture cryomodule

Collision point

コンプトンX線生成実験が2012年3月から  
 2013年3月まで行われた。

その運転開始状況、X線生成実験結果は、  
 2012年と2013年年会において口頭発表で報告された。



STF 加速器 入射部

# STF 加速器 計画図

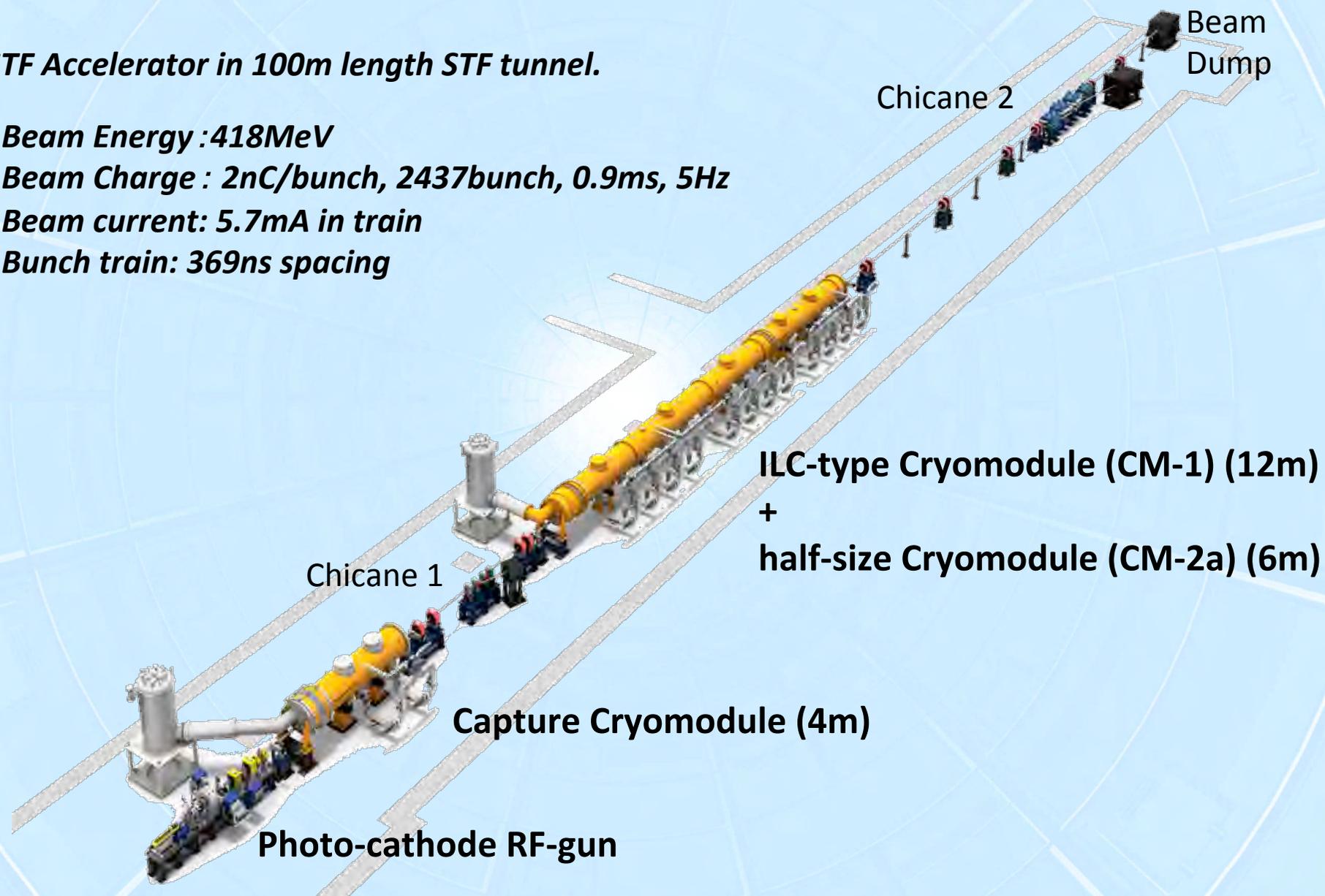
**STF Accelerator in 100m length STF tunnel.**

**Beam Energy : 418MeV**

**Beam Charge : 2nC/bunch, 2437bunch, 0.9ms, 5Hz**

**Beam current: 5.7mA in train**

**Bunch train: 369ns spacing**



**ILC-type Cryomodule (CM-1) (12m)  
+  
half-size Cryomodule (CM-2a) (6m)**

Chicane 1

**Capture Cryomodule (4m)**

**Photo-cathode RF-gun**

Chicane 2

Beam  
Dump

# クライオモジュール CM-1の組立

STFトンネルを利用して12m長のモジュール組立を行った。

インプットカップラーの取付



4空洞の連結完了



4連結空洞+4連結空洞



8連結空洞をGRPへ吊下げ



BPMへ4極電磁石取付



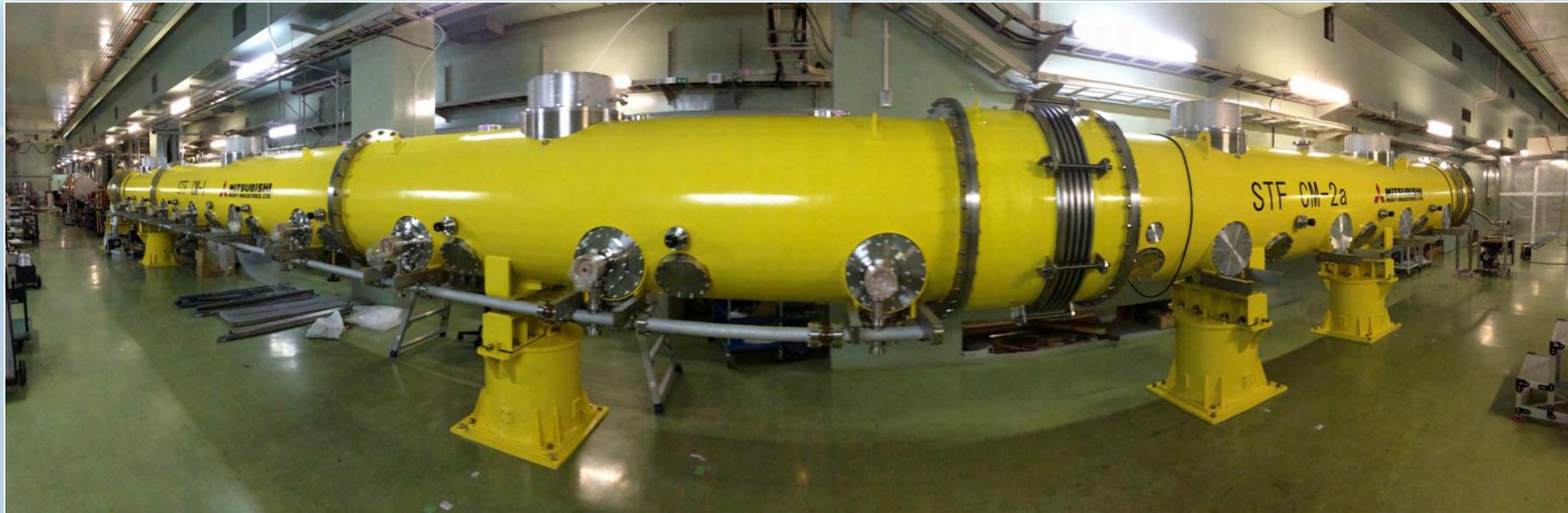
真空容器2/3へ挿入



# クライオモジュール CM-1+CM-2a (18m長) の完成



合計12台の超伝導加速空洞の入ったモジュール組立が2014年7月に完了している。



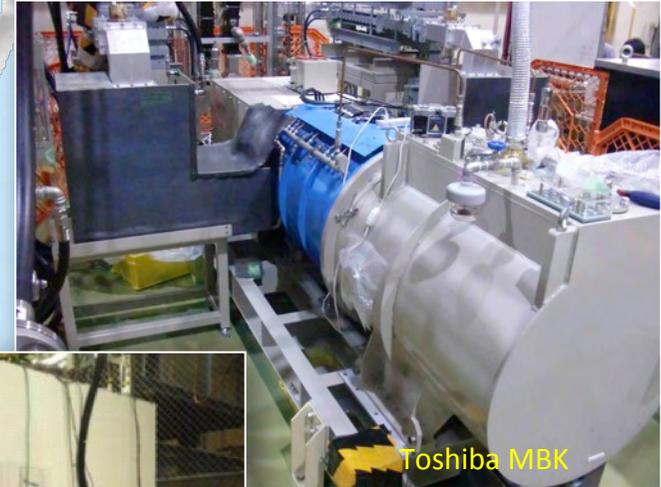
トンネル内で完成したCM-1を所定の位置に移動・設置。  
地上部設備で組み立てた4空洞モジュールCM-2aを地下に降ろし、CM-1に連結。  
ヘリウム冷凍機コールドボックスと連結。  
カップラー室温部を取付け、両端ビームパイプ部を取付けて、完成。

# STF 加速器のRFパワー系

ILC仕様のRFパワー供給を計画中  
(TDR scheme)

ILC仕様立体回路

10MW  
マルチビームクライストロン



Toshiba MBK

現在はマルチビームクライストロンは、  
バウンサー変調器とパルスランスで  
ドライブされている。  
将来はマルクス変調器に変える予定。



P2 Marx Modulator

# 超伝導加速空洞開発

# 超伝導空洞の加速性能を上げる開発

## 空洞製造

ニオブ材料、プレス加工、機械加工、電子ビーム溶接

## 表面処理

電解研磨処理、リンス処理、超純水高圧洗浄、ベーク処理、クリーンルーム技術

## 電界試験時

温度センサーマップ(T-map)、X線センサーマップ(X-map)

## 内面検査・局所研磨修理

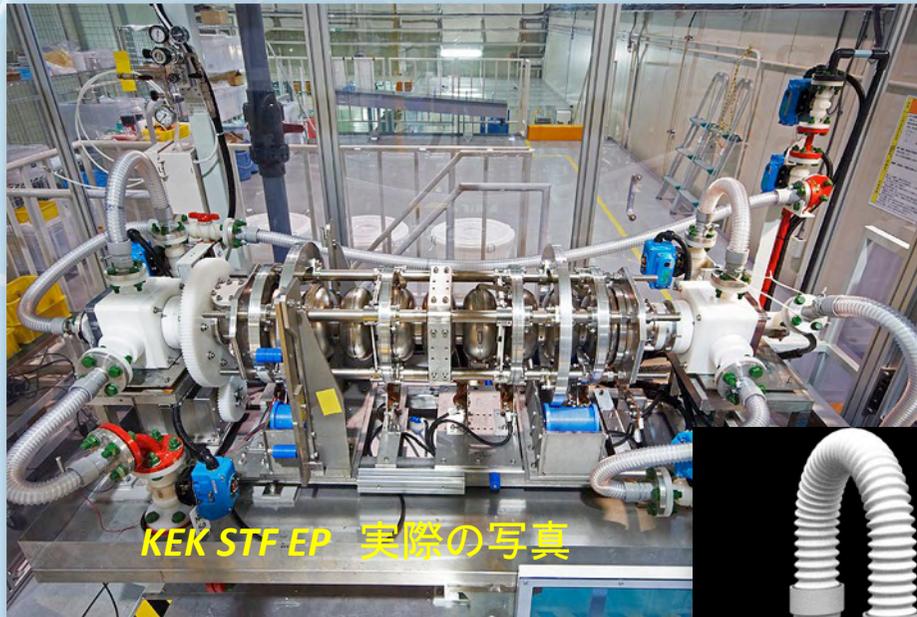
内面検査カメラ、レプリカ採取、局所研磨装置

(\*)これらの開発を支援する表面分析機器の利用・導入

# 空洞内面の電解研磨処理 (高性能表面処理の開発)



STF surface research team



KEK STF EP 実際の写真

## 電解研磨

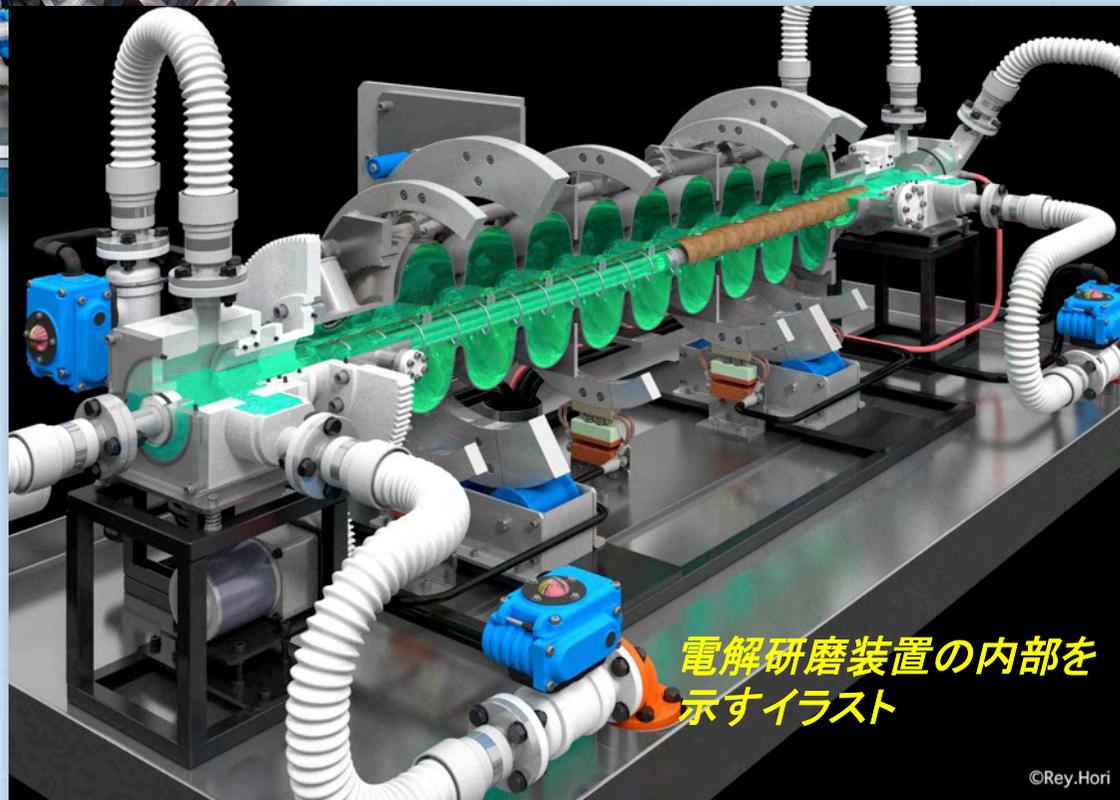
硫酸とフッ化水素酸の混合液を空洞に半分ほど満たし、内部電極と空洞の間に17Vほどの電圧をかける。

300Aほどの脈流電流が流れ、硫酸ニオブの不動態層を形成しながらも、フッ素イオンのニオブアタックにより、ニオブ表面の研磨が進行する。中央の電極には、水素ガスの発生、イオウの生成が起き、その的確な処理が必要。

電解研磨は、非常に危険な強酸を使用する内面研磨法であるが、超伝導空洞の高電界性能を安定して出せる方法。

## 開発点

- なめらかな表面粗さ
- 一様な研磨厚み
- 表面からのイオウ、その他のコンタミの除去
- 表層からの水素除去
- 表層の酸素、窒素その他の原子と超伝導性能との相関

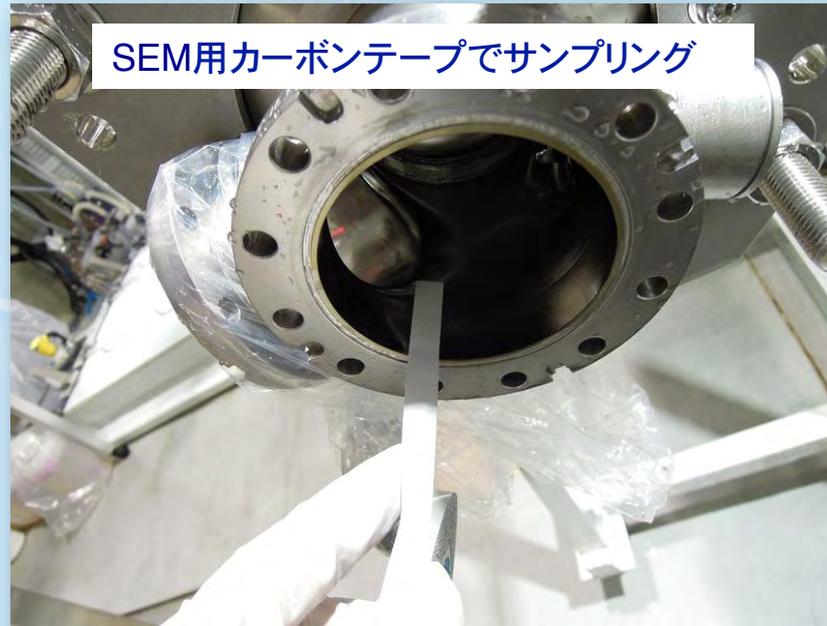


電解研磨装置の内部を示すイラスト

# 電解研磨表面を分析するための表面サンプリング



STF surface research team



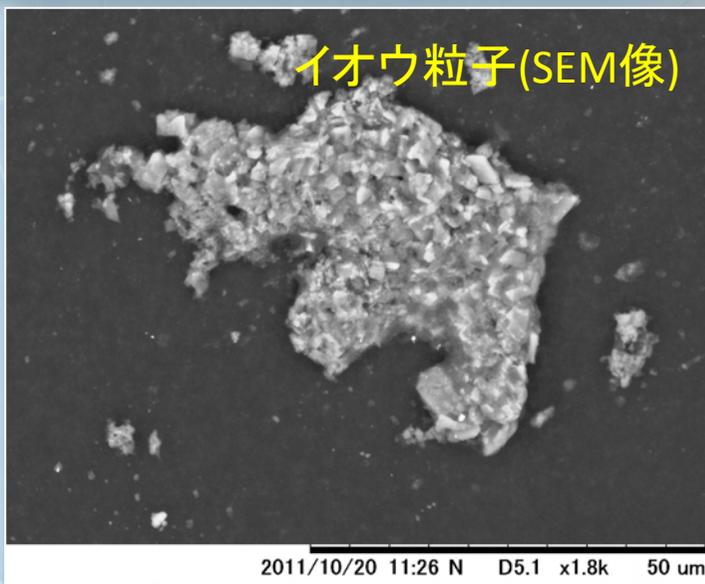
SEM用カーボンテープでサンプリング

表面付着物はフィールドエミッターになる。

## 電解研磨終了時、リンス終了時の表面付着物の分析

SEM観察用カーボンテープで表面をサンプリング

残留イオウ粒子の有無のモニタリング  
外来付着物の有無の観察 など



イオウ粒子(SEM像)

2011/10/20 11:26 N D5.1 x1.8k 50 um



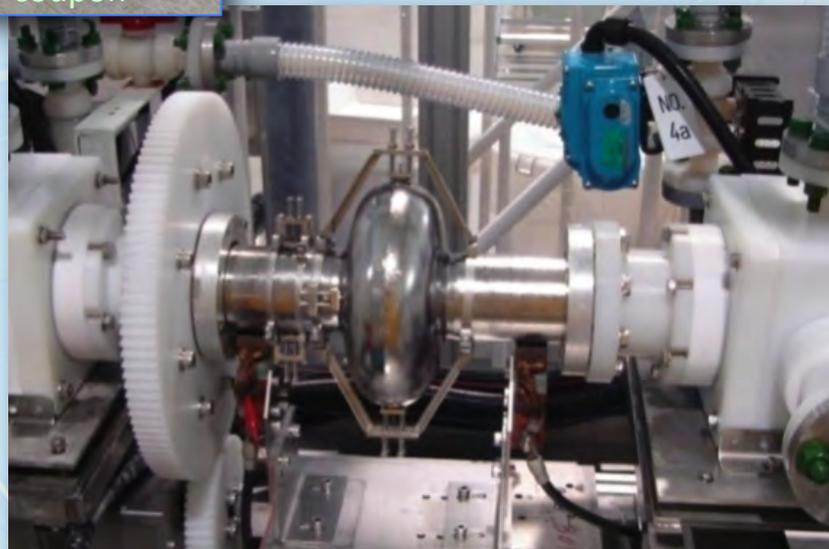
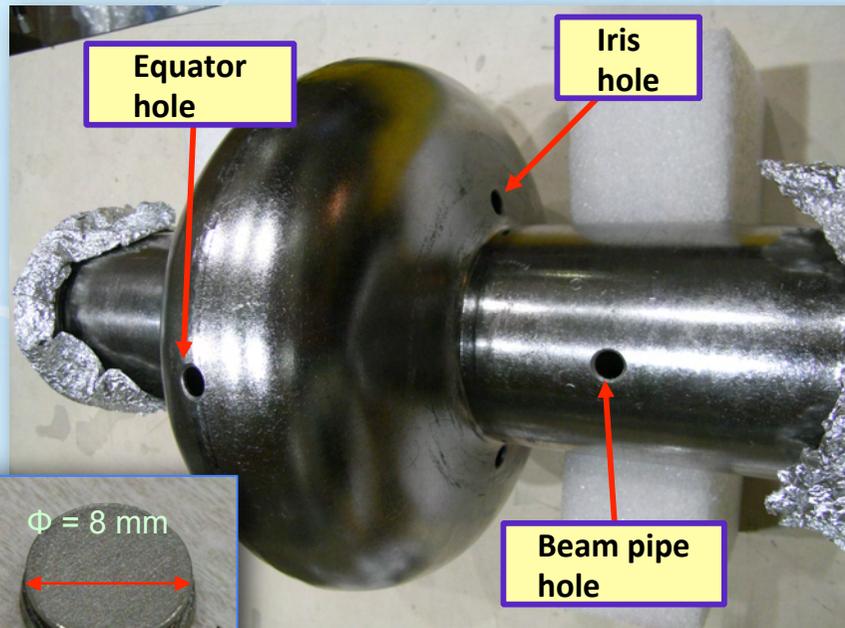
イオウ粒子(SEM像)

2011/10/20 11:54 N D5.3 x1.8k 50 um

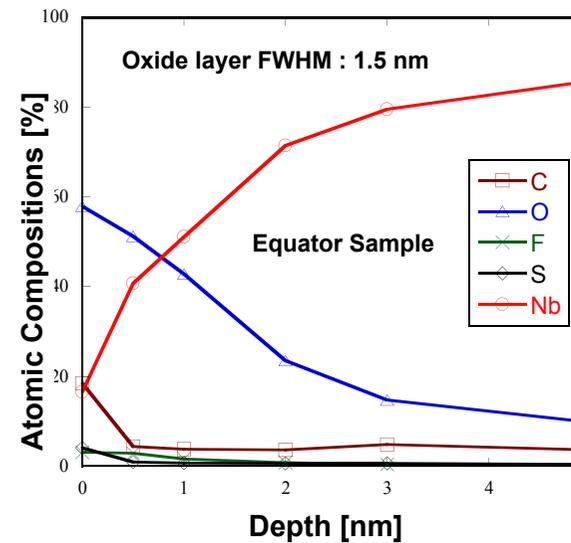
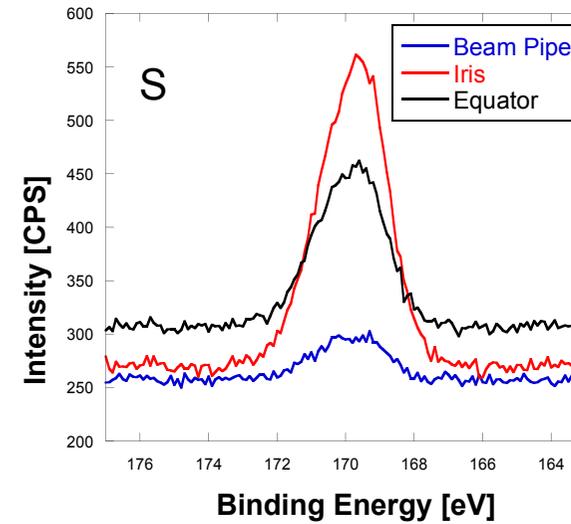
# 電解研磨表面を分析するためのクーポン・サンプル空洞



STF surface research team



## クーポンのXPS分析



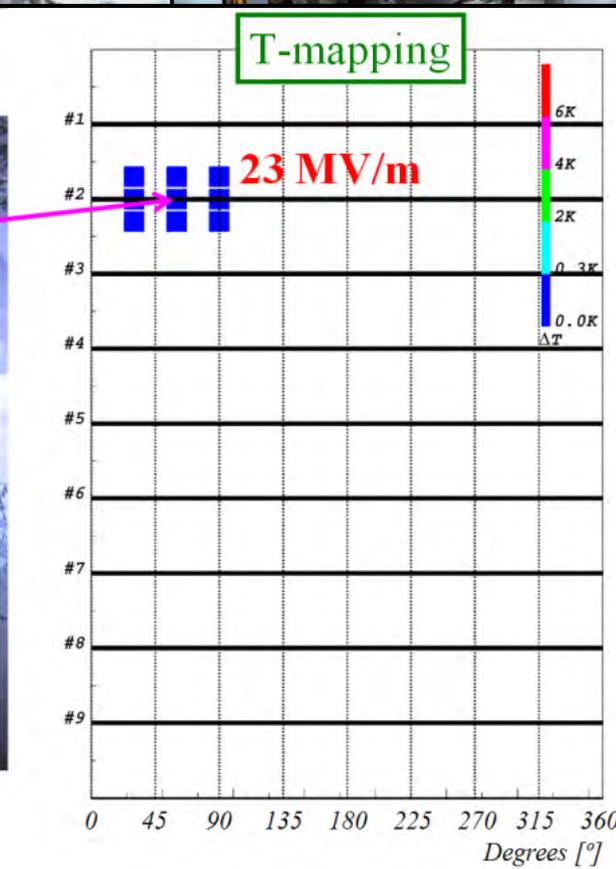
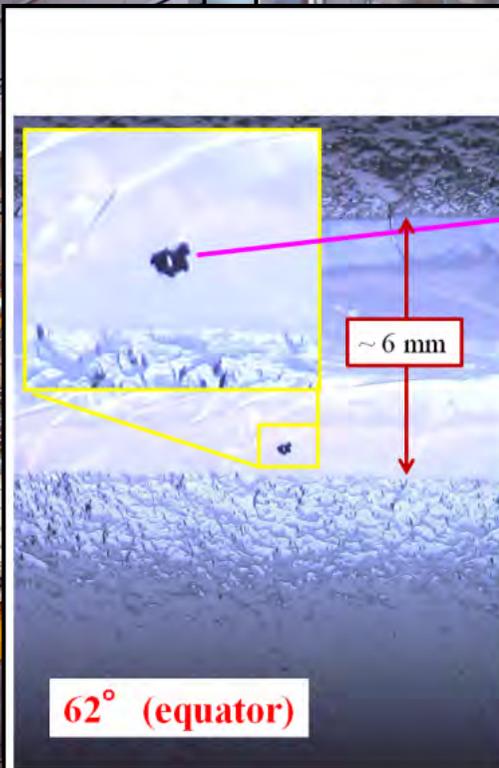
KEK

9.9mm

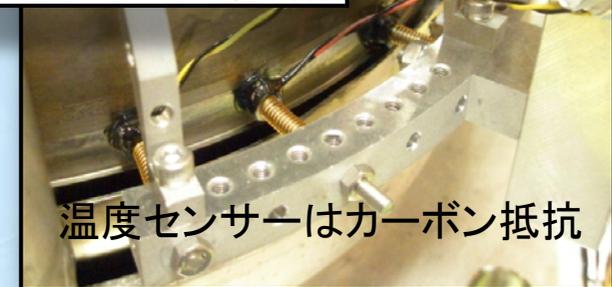
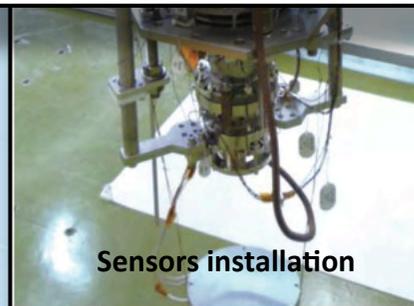
KeV

# 空洞の電界性能試験(縦測定) (高電界阻害原因の追求)

クエンチ箇所、電子エミッターを特定するための温度センサーマップとX線センサーマップ

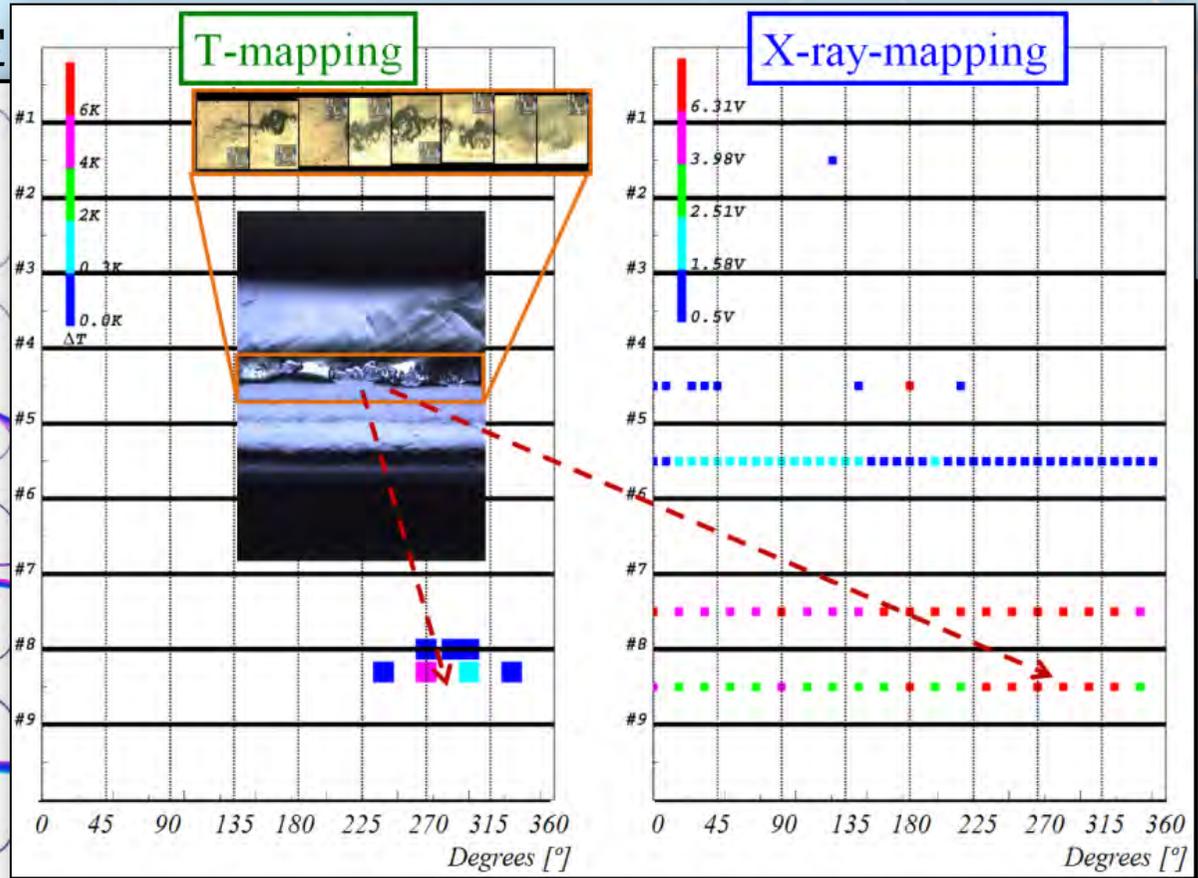
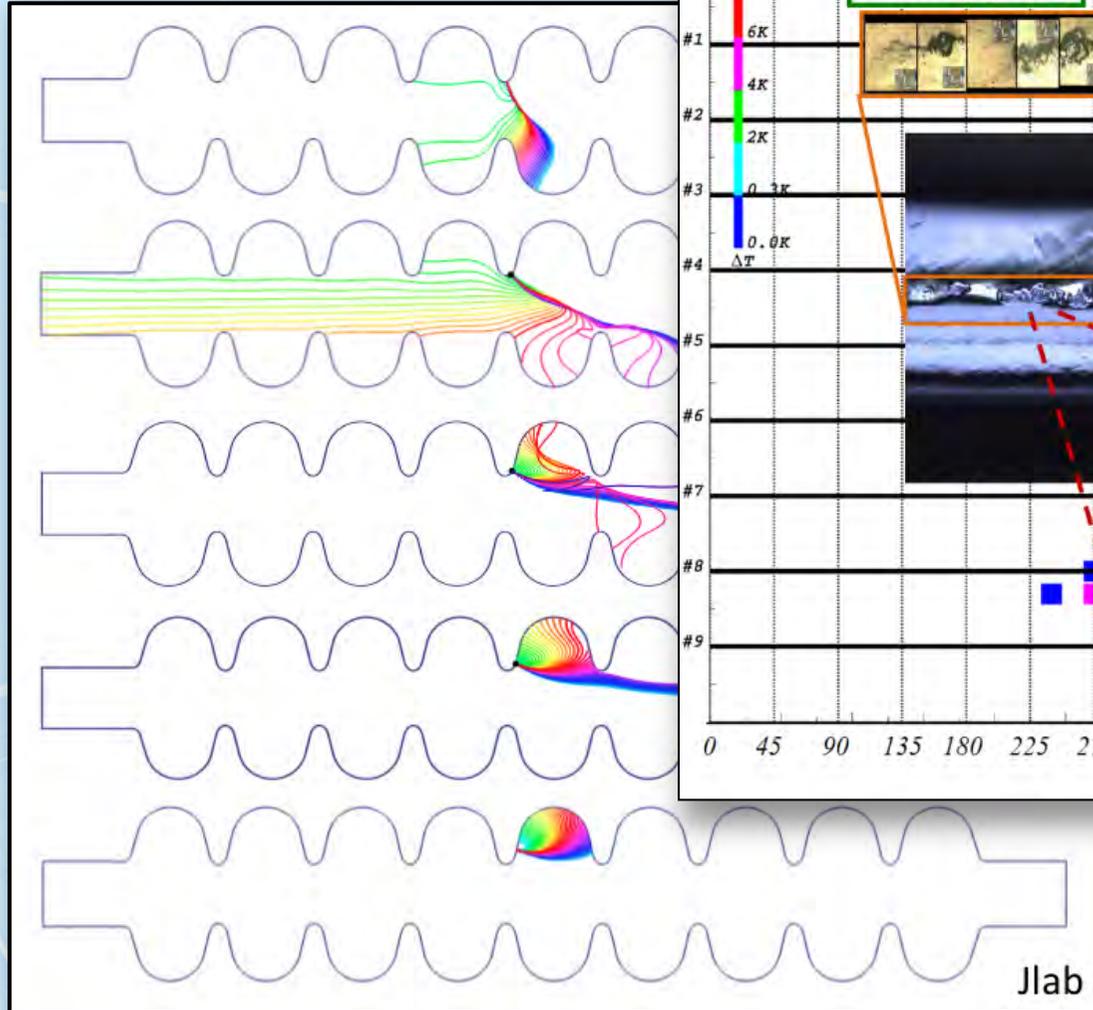


温度センサー、X線センサーを多数配置して、クエンチ時の原因箇所を同定する。その後、内面検査カメラで詳細に調べる。



# X線マップによるエミッター箇所への推定

いろいろなエミッター位置を仮定



# 空洞内表面の高分解能観察と欠陥除去のための局所研磨装置

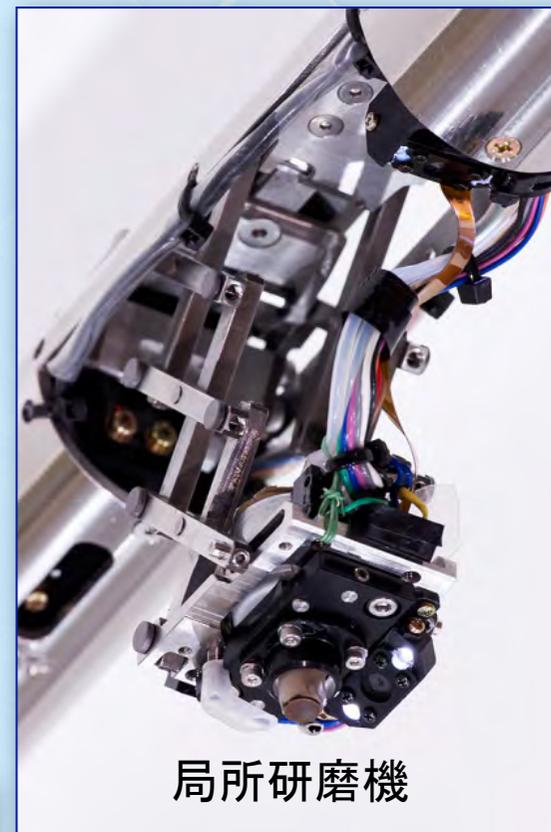


Kyoto-KEK collaboration

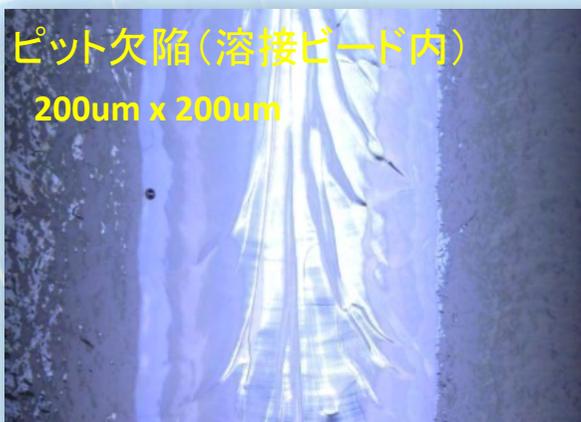


内面検査カメラでクエンチ箇所  
の欠陥を探し出す

局所研磨機により、欠陥のある箇所のみ研磨し、欠陥を取り除く。  
その他の内面には触らない。

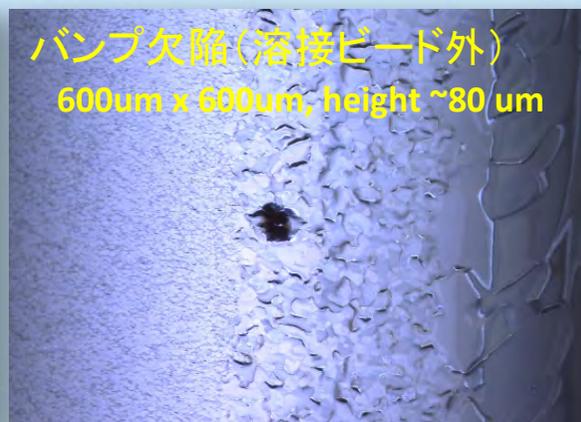


局所研磨機



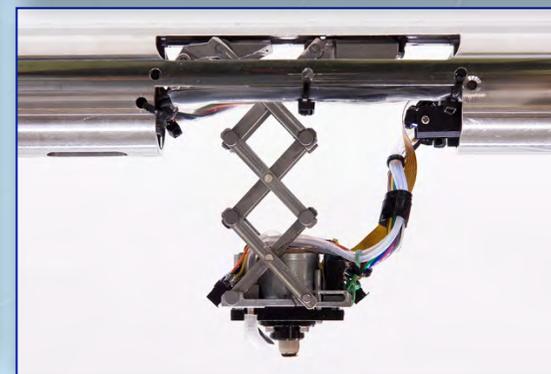
ピット欠陥(溶接ビード内)  
200um x 200um

MHI16 quench at 20.8MV/m



バンプ欠陥(溶接ビード外)  
600um x 600um, height ~80 um

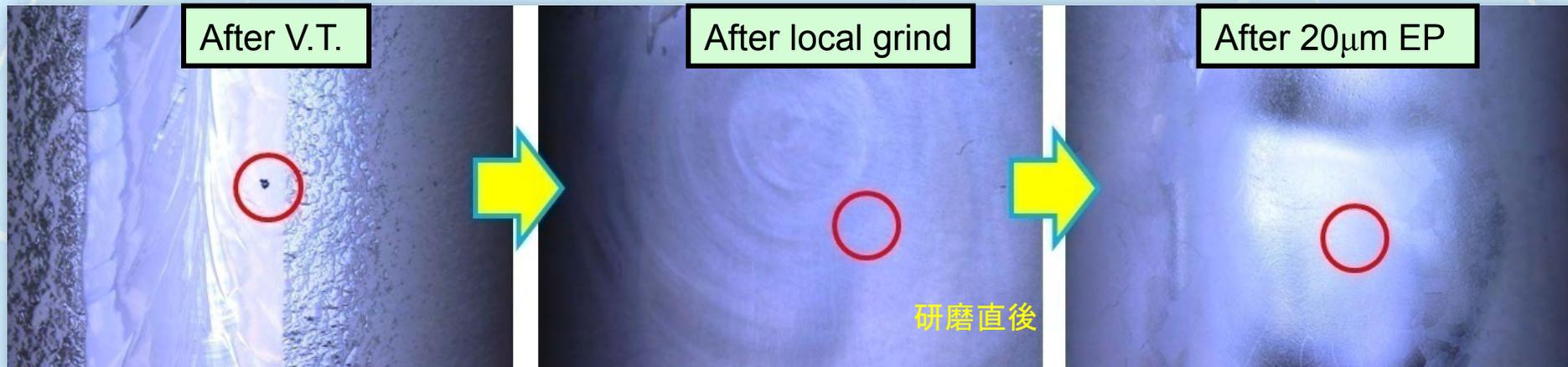
AES003 quench at 20MV/m



# 局所研磨機による欠陥の除去



STF SC-cavity team



MHI-016: 20.8MV/m → 33.8MV/m

欠陥箇所のみを局所研磨機で修復し、電解研磨をかけて、試験を行うと性能が上がる。

## MHI-010空洞の場合



MHI-010:  
2<sup>nd</sup> VT 25.7MV/m

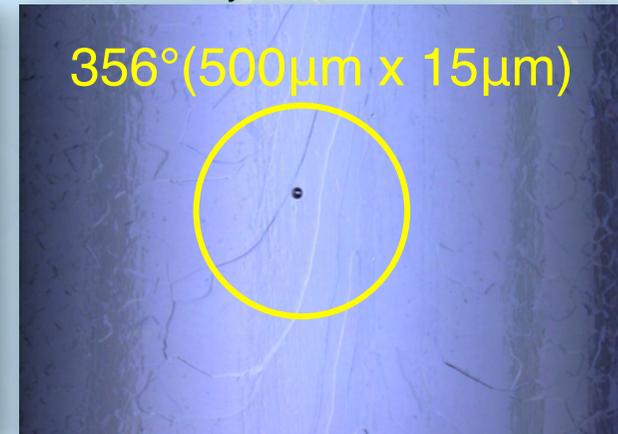
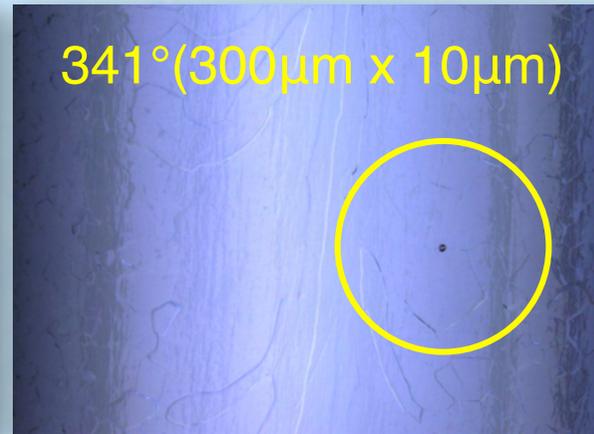
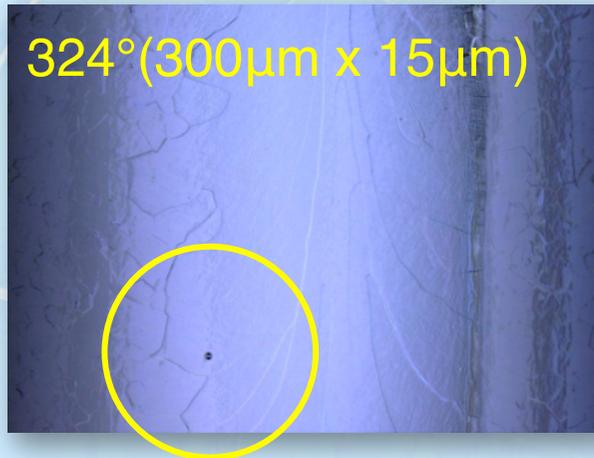
局所研磨と  
100μm EP

しかし  
3<sup>rd</sup> VT 20MV/m

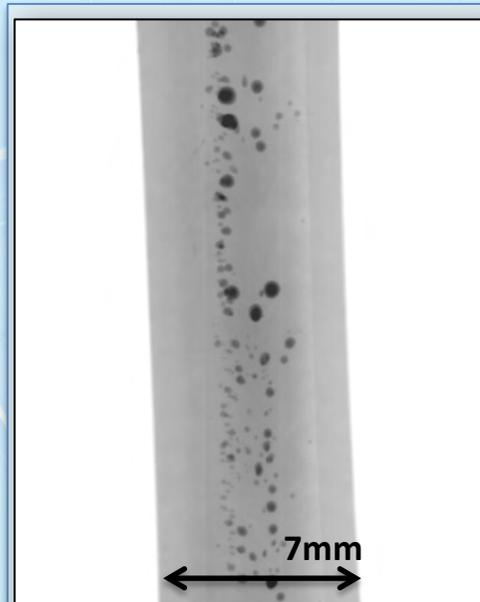
# 修理してもさらに欠陥が現れるケース



Kyoto-KEK-JLab collaboration



溶接ビード内に多数のピット欠陥が埋まっている！



Kyoto-KEK-JLab collaboration

他の溶接ビード例

銅の2mm板のEBW  
で、多数のピットが  
埋まっている例  
(高分解能X線透過像)

溶接ビームパラメーターの問題か？  
溶接面のコンタミが原因か？  
溶接面開先形状の問題か？

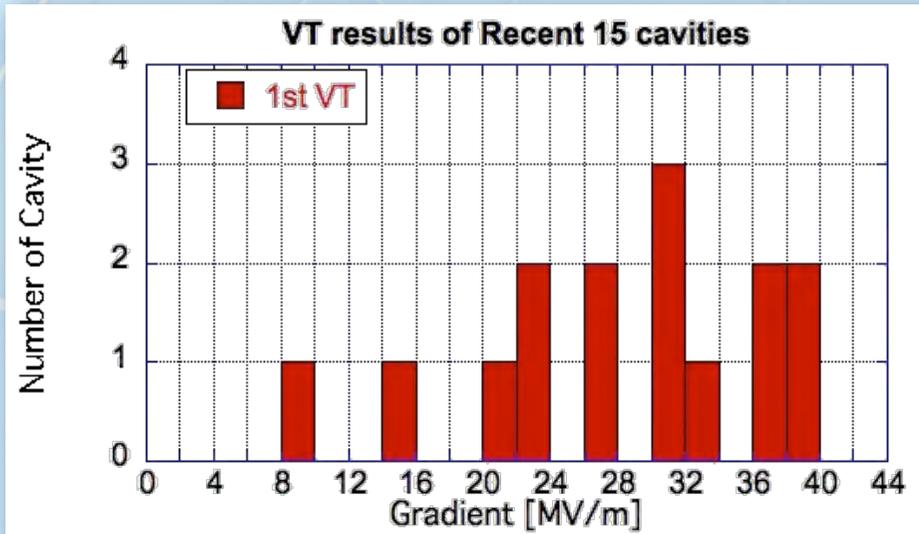


現在、原因を調査・研究中

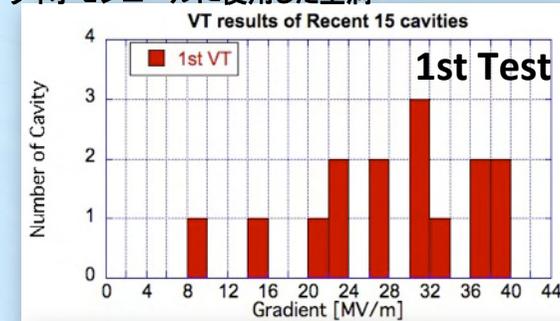
# STF空洞の加速勾配性能 (最近の15台の性能結果)



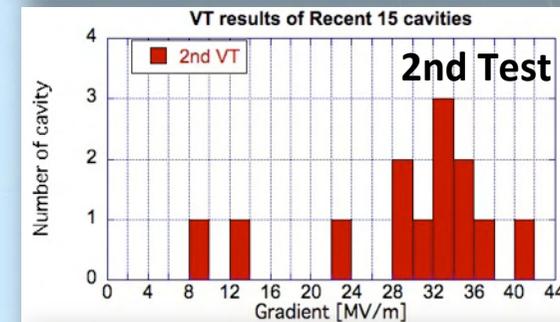
クライオモジュールに使用した空洞



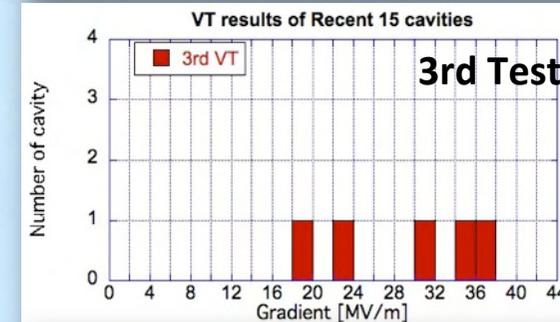
1st Test



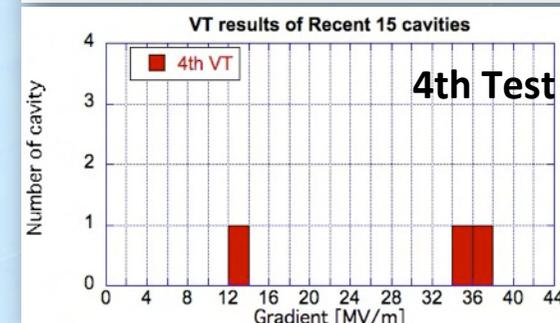
15 cavities



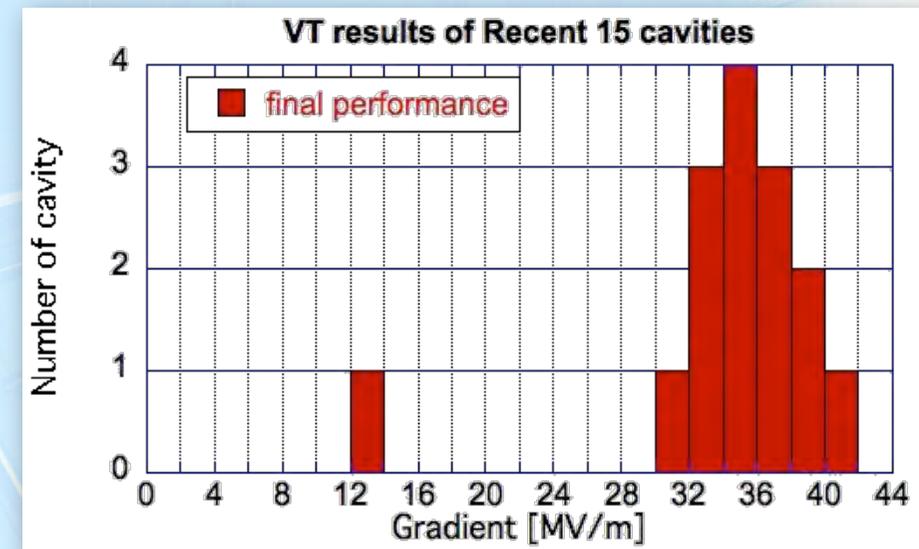
13 cavities



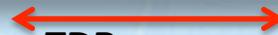
5 cavities



3 cavities



Final Performance



ただし、このプロセスは TDRに従ったものではない。いろいろな研究考察を混じえたものである。

TDR spec.  
35MV/m +/- 20%

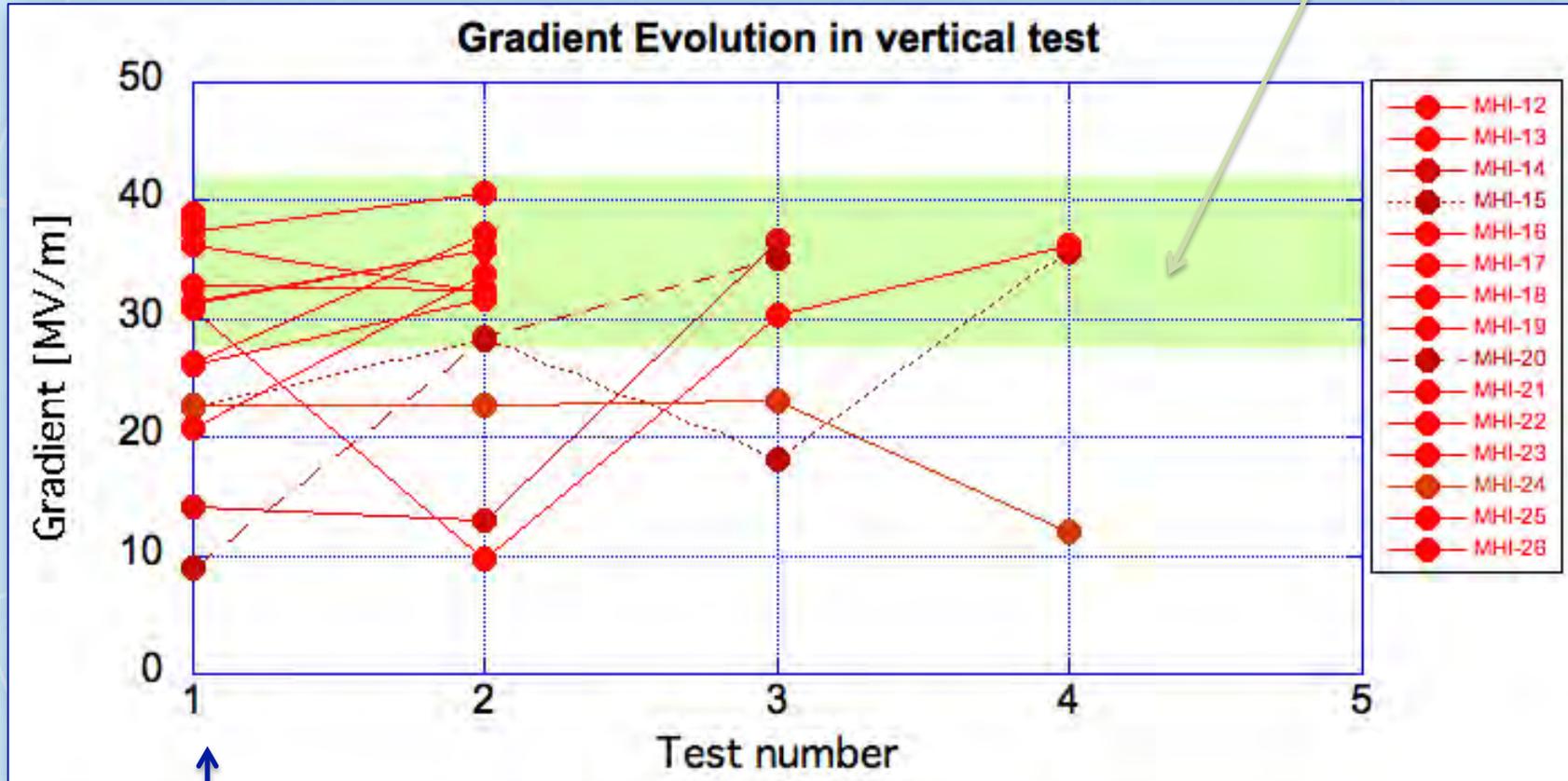
# STF空洞の加速勾配性能 (最近の15台の性能推移)

クライオモジュールに使用した空洞



ただし、このプロセスは  
TDRに従ったものではない。  
いろいろな研究考察を混じえたものである。

TDR spec.  
35MV/m +/- 20%



1pass Ave.  
27.9MV/m



Final Ave.  
34.2MV/m

ちなみに

TDRの2回までの処理・測定という規則を当てはめてみると  
15台中、13台が合格となり、合格率は87%。

性能が最後まで上がらなかった空洞(MHI-24)は、時間的制約のためフィールドエミッター原因が特定できなかった。

## まとめ

STFでは、ILCクライオモジュールを開発・性能達成をする、そして超伝導リニアックの運転経験を積む、という目標のもと超伝導加速器の開発を進めている。

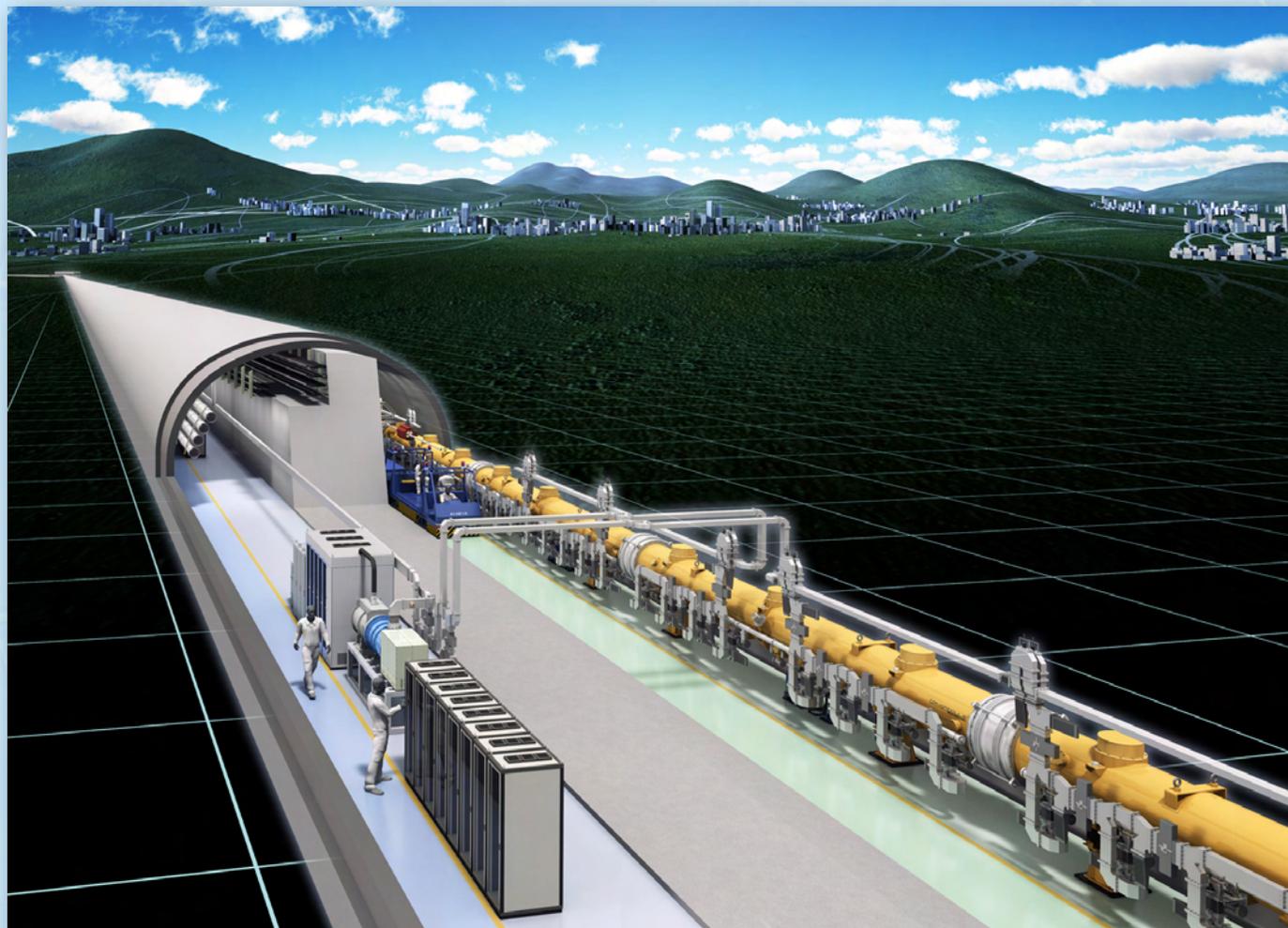
ILC仕様を満足する空洞の開発は、クライオモジュールに組み込む空洞を用いて開発している。

STF空洞の性能:

ニオブ材料メーカー、空洞製造メーカーの努力と並行して、STFでは性能制限原因の追求、原因除去の開発を行っている。診断ツール、局所研磨、表面分析による解析、クリーンルーム技術など、多方面にわたる開発がなされてきた結果、ほぼILC仕様を満足する加速勾配性能が得られている。



# *international linear collider*



終わり