

# ILC-PIPにおける 加速器の工業化・量産構想

(報告)

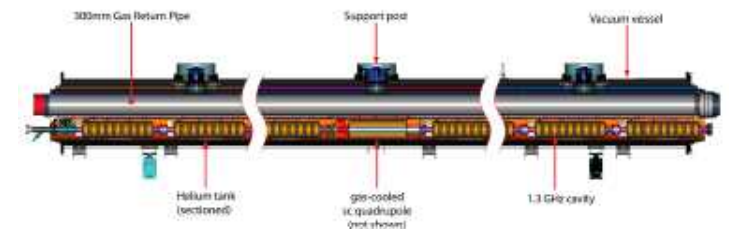
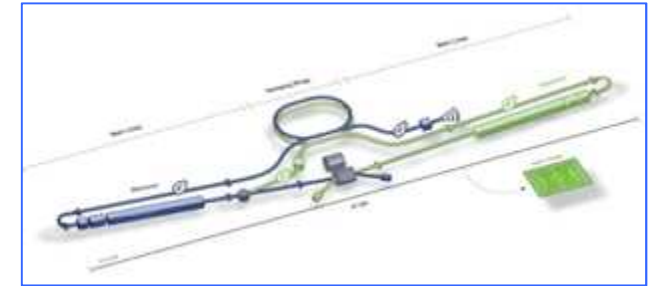
山本 明 (KEK)

第4回・ILC に関する体制及びマネジメントの在り方・検証作業部会

2017-5-23

# ILC加速器・超伝導加速空洞システムの量産規模

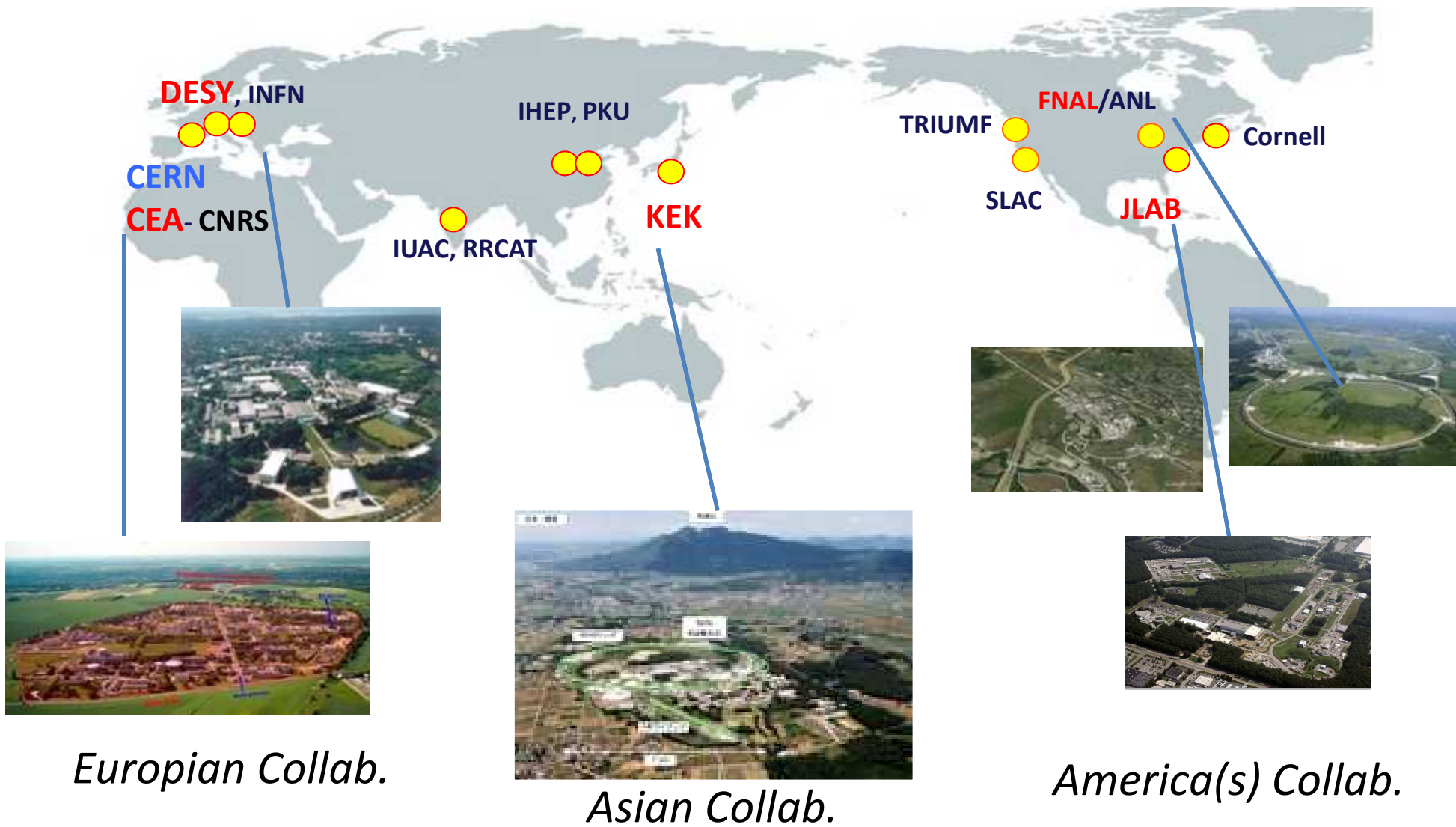
項目	単位	ベースライン (TDR)	ステー징 (検討中)
衝突エネルギー (e+/e-エネルギー)	GeV	500 (250+250)	250 (125+125)
ビーム輝度	$\times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	1.8	1.8
繰り返し	Hz	5	5 Hz
パルス長	ms	0.73	<b>0.73</b>
パルス電流(平均)	mA	5.8	5.8
電場勾配(平均)	MV/m	31.5	<b>31.5</b>
Q値	e10	1	<b>1</b>
多連空洞数:		~ 18,000	~ 9000
Main Linac (e+ & e-)		14,742 x 1.1	~ 6901x1.1
Booster, DR, BC, etc.		1,282 x 1.1	1,282 x 1.1
クライオモジュール数		1,855	950
Main Linac (e+ & e-)		1,701	796
Booster, DR, BC, etc.		154	154
クライストロン数		~ 412	~ 211
Main Linac (e+ & e-)		378	177
Booster, DR, BC, etc.		~ 34	~ 34
立ち上げ+製造期間	年	6~7	5~6



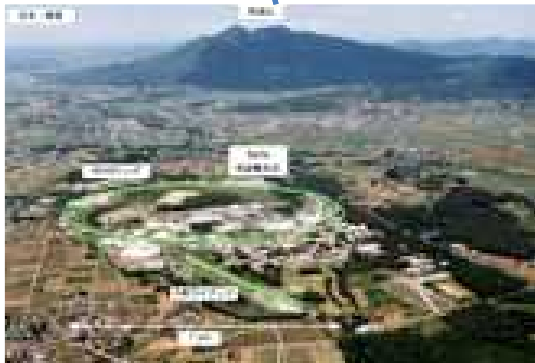
# 超伝導加速空洞・量産における基本構想

- 国際・各地域において製造から試験までを分担
  - 各地域においてハブ研究所(または共同体)が中心となり、国際入札に基づく企業による製造、業務委託契約に基づく
- ハブ研究所(又は共同体)の責務:
  - 加速器要素・製造及び試験実施に責任
  - 主要な性能(電場勾配、共振特性( $Q_0$ ) 等)達成に責任
- 企業の責務:
  - 国際競争入札に応募し受注し、地域に縛られない。
  - 基本構造仕様及び図面に基づく製造 (build-to-print) に責任
  - 一般的な工業生産における完成検査(寸法、外観、機械的、電氣的試験等) までを引き渡し条件とする。
  - 企業に装置の最終性能責任を求めない。
- 研究所-企業の協力(パートナーシップ)
  - 研究所内努力(力量)で、工業技術開発を先行し、試作技術検証を行った上で、企業に技術移転することが大切→企業のリスク低減への協力が大切なパートナーシップ。
  - 各ハブ研究所が、一環した試作・検証能力を持ち、迅速に企業への技術情報提供を行えることが大切。

# ILC SRF 線形加速器の開発・国際協力構想



*European Collab.*

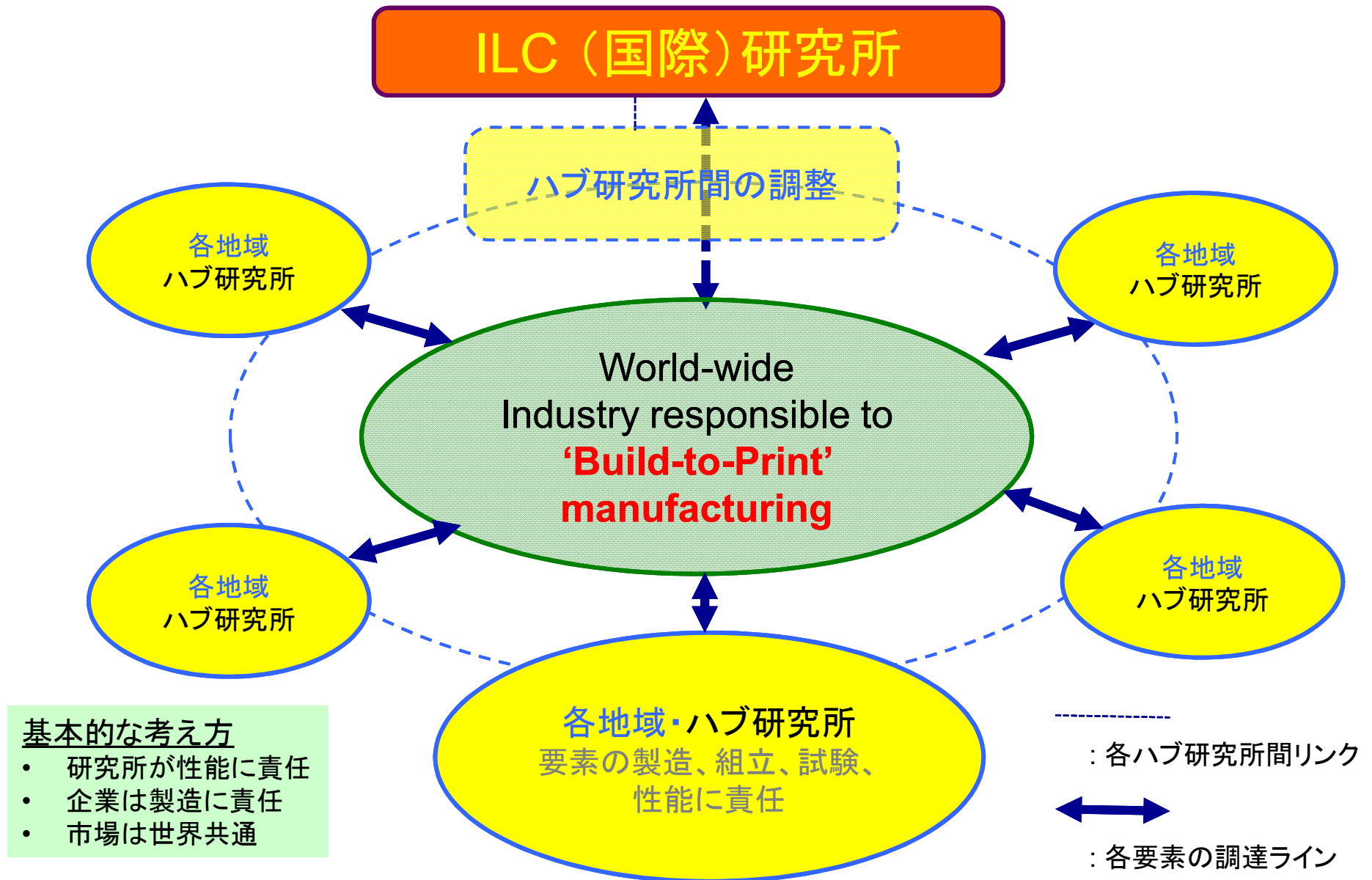


*Asian Collab.*



*America(s) Collab.*

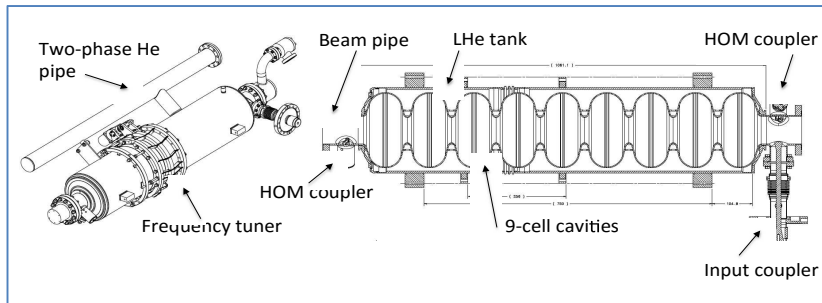
# ILC SCRF 要素の国際調達に関する基本的な考え方



## 基本的な考え方

- 研究所が性能に責任
- 企業は製造に責任
- 市場は世界共通

# 超伝導加速空洞、クライオモジュール(CM)の製造フロー



Purchasing Material: 材料調達

Manufacturing Cavity: 機械加工

Processing Surface: 表面処理

Assembling LHe-Tank : 組み立て

Qualifying Cavity, 100 %: 性能評価

Cavity String Assembly: 多連空洞組立

Cryomodule Assembly:: CM 組立

Qualifying CMs, 33 + 5 %: CM性能評価

# 空洞とクライオモジュール製造と性能評価の分担

製造、試験プロセスの分担	工業界	工業界／研究所	ハブ研究所	国際ILC 研究所
サブ要素・ - 購入	Nb 材料等		購入契約	
9-cell 空洞 - 製造契約	9-cell- 空洞 表面処理 He-ジャケット		発注契約	
9-cell空洞・性能評価 - 作業契約(国際協力の可能性)			空洞性能試験	
クライオモジュール(CM) 要素 - 製造契約	断熱真空容器 低温配管など		発注契約	
空洞連結、CM の組立 - 組立・検査作業契約(可能性)		空洞・CM の組立		
SCRF CM・性能試験 - 作業契約(国際協力の可能性)			CM性能試験	
加速器トンネルへの設置 - 搬入、据付、試験作業				加速器への組込



# 超伝導加速空洞システム製造スケジュール

Year	Step	Sc material	SCRF cavity	CM part	CM ass. & test	RF parts	RF ass & aging
1	Prep.	↓	↓	↓	↓	↓	↓
2							
3	Production		↓	↓	↓	↓	↓
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

工業化準備  
→ 2-3 年

量産、試験  
→ 3~6 years

加速器への組込  
→ 2~3 年

Installation of machine components - MR (Mountain region)



# European XFEL に於ける 超伝導加速空洞・CM製造、性能試験責任体制

- European XFEL:
  - 国際会社組織
    - フランス、ドイツ、イタリア、ロシア、、、、
- ハブ研究所の役割(共同体):
  - **DESY/INFN:** 基礎開発、実証→要素発注→性能試験→組込
    - Poland 研究所の協力により、人的貢献を受ける (40~50名)
  - **CEA:** 空洞ストリング、CM の組み立てに責任
    - 組み立てサイトを研究所内に設備し、契約による業務委託で組み立て (20~30名)
  - **CNRS-LAL:** カプラー・コンディショニング
    - 自動化を進め、研究所(少人数)で対応
- 企業の役割:
  - Nb 材料 (購入): ドイツ (H-P), 日本 (TD)、中国 (NX)
  - SRF空洞 (製造): ドイツ(**RI**), イタリア (**EZ**) → 工場での製造
  - CM 要素 (製造): イタリア(**EZ**), 中国(**CX**) → 工場での製造
  - CM 組立(業務契約): フランス(AS)
  - SRF性能試験(協力): ポーランド

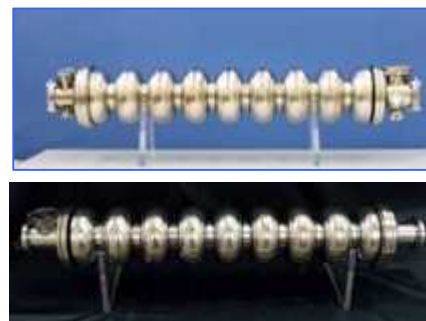
# 欧州XFELにおけるSRF 空洞システム 製造、試験、組み込み分担・協力

製造、試験プロセスの分担	工業界	工業界／研究所	ハブ研究所	国際ILC 研究所
サブ要素・ - 購入	Nb 材料等 (H-P, TD< NX)		購入契約 (DESY)	
9-cell 空洞 - 製造契約	空洞製造 (RI, EZ)		発注契約 (DESY)	
9-cell空洞・性能評価 - 作業契約(国際協力の可能性)			空洞性能試験 (DESY)	
クライオモジュール(CM) 要素 - 製造契約	断熱容器・配管 (EZ, CX)		発注契約 (DESY)	
空洞連結、CM の組立 - 組立・検査作業契約(可能性)		空洞・CM の組立 (CEA) - (AS)		
SCRF CM・性能試験 - 作業契約(国際協力の可能性)			CM性能試験 (DESY)	
加速器トンネルへの設置 - 搬入、据付、試験作業				加速器組込 (DESY- XFEL)

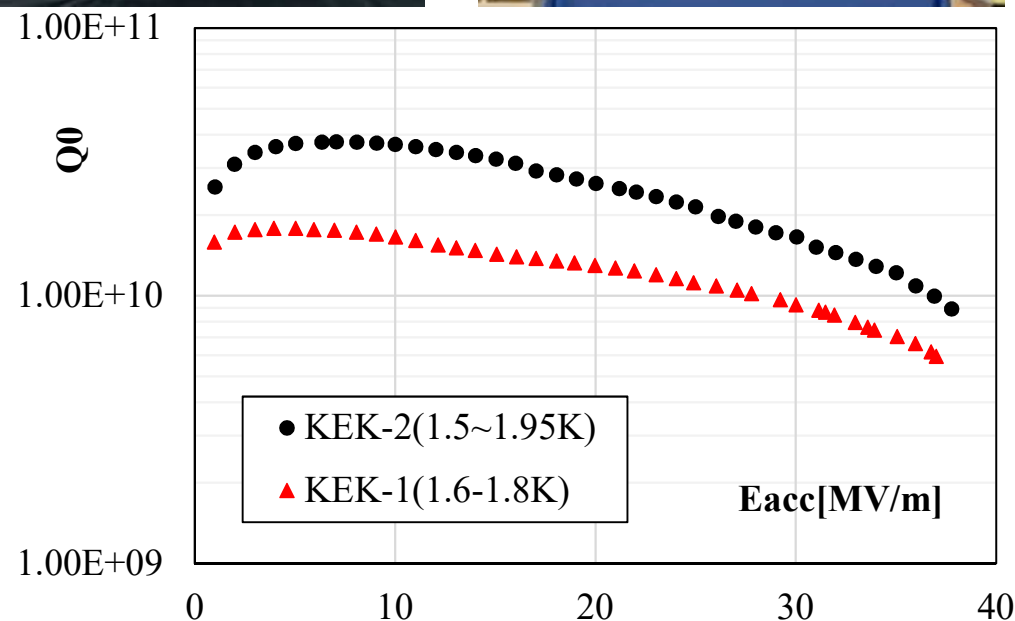
# KEK 機構内・超伝導加速空洞製造施設・開発実績



EBW



SST EBOCAM KS-110 –  
G150KM  
Chamber (St. St. chamber)



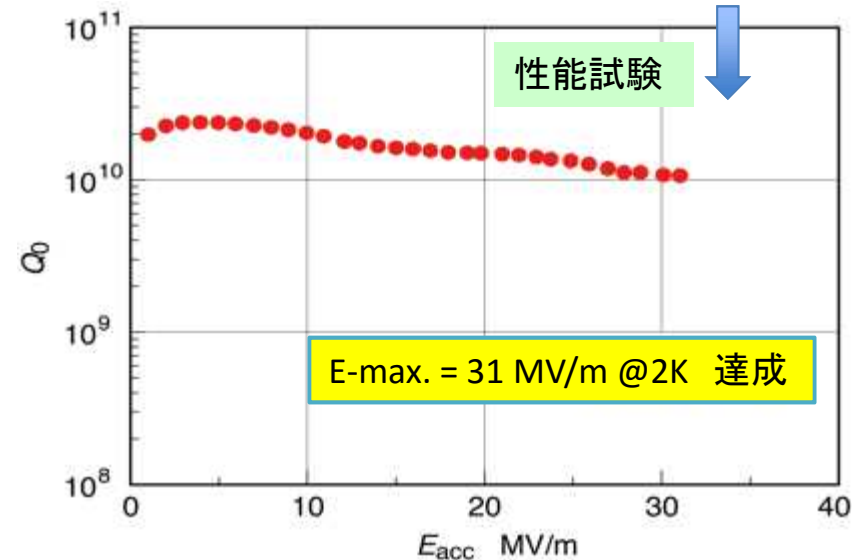
KEK-01 (Rolled, FG, 2014): Reached 36 MV/m  
 KEK-02 (Ingot-sliced, LG, 2016): Reached 38 MV/m  
 → いずれも、ILC-SRF 電場性能を達成

# KEK に於ける企業とのパートナーシップ(例)



材料準備 → プレス → 溶接 → 表面研磨 → 組み立て → 試験

- **KEK:** 図面, ニオブ等材料の提供, 技術支援・指導, 設備提供, 性能評価
- **企業:** 金型の設計・製作, プレス・切削条件の探索, EB溶接条件の探索・習得, 表面研磨技術の習得
- **パートナーシップ:** 技術交流, 技術開発協力, 技術移転



# まとめ

- **SCRF ライナック要素の工業化・量産モデル**

- 国際的に製造、性能試験を分担
  - 各地域・ハブ研究所が統括し最終性能(勾配、Q値など)に責任
  - 企業においては、製作仕様に基づく製造責任(Build-to-print)
- 各地域で性能試験を経て移送、ILC ラボにて組み込み

- **工業化・量産に向けた、今後の検討課題**

- 量産の国際的分散における品質、コスト管理
  - 分散による(原理的)単価変動と、広い競争を奨励することによるコスト低減のバランス、そしてリスク回避への見通し、
  - 各地域状況に応じた柔軟な対応
- ステージングを行った場合の量産効果への影響
- 国際間のCM 長距離移送技術、性能検証、、、

# 添付・補足資料

# Revised ILC Project Implementation Plan

## July 2015, Revision C

1. Executive Summary
2. Introduction and General Principles
3. Governance
4. Funding Models
5. Project Management
6. Host Responsibilities
7. Siting Issues
8. In-Kind Contribution Models
9. Industrialisation and Mass Production of the SCRF Linac Components
10. Project Schedule
11. Intellectual Property
12. Interface between ILC Laboratory & the Detectors
13. Transitional arrangements

本報告・紹介内容





# 9. Industrialization and Mass Production of the SCRF Linac Components

## Introduction

9.1 A project the size of the ILC will rely heavily on industry to provide cost-effective production of large-volume components. The primary challenge and the current focus of the GDE activities is the construction of the SCRF linacs – a significant cost driver. The ILC will require the manufacture of approximately 16,000 1.3-GHz nine-cell niobium resonators (cavities) assembled into some 1,700 cryomodules. The SCRF cavity is a high-tech state-of-the-art component, requiring careful preparation and assembly of the subcomponents (deep-drawn half cells) using electron-beam welding, application of carefully controlled chemical polishing techniques, high-pressure rinsing and baking, all in clean or semi-clean room environments. The assembly of the complete cavities into the cryomodules likewise requires clean-room environments and adherence to well defined procedures. Much of the last decade of R&D into SCRF technology has been in refining these procedures and transferring the technology to industry, with a goal to reproducibly produce high-performance cavities ( $\sim 35$  MV/m with a  $Q_0$  of  $>8 \times 10^9$ ) in a cost-effective manner.

# Mass Production Model

## based on Experiences from LHC and European XFEL

9.2 When considering mass production of such high-technology components, much can be learnt from the experience of the LHC dipole manufacture and the current production of ~80 SCRF cryomodules (~640 cavities) for the European XFEL. The XFEL currently represents the largest deployment of the technology and is being constructed by a European consortium of laboratories and industrial partners. In particular two vendors are responsible for the complete assembly and surface preparation of the cavities and three vendors are responsible for supplying the semi-finished niobium and niobium-titanium material. The expected peak production rate for the XFEL requires the cavity vendors to supply four cavities per week. By comparison, the ILC will require a total rate of ~8 cavities per day for a production period of 6 years. Fortunately this industrial capacity now exists globally given the development of qualified cavity vendors during the GDE Technical Design Phase. A model of five vendors each providing an average of 20% of the total required over six years represents a modest and achievable extrapolation to the XFEL production rate.

# European XFEL: 超伝導ライナックの建設

## Progress:

2013: Construction started

...

2016: E- XFEL Linac completion

2017: E-XFEL beam start

**Note** : ~ 1/10 scale to ILC-ML

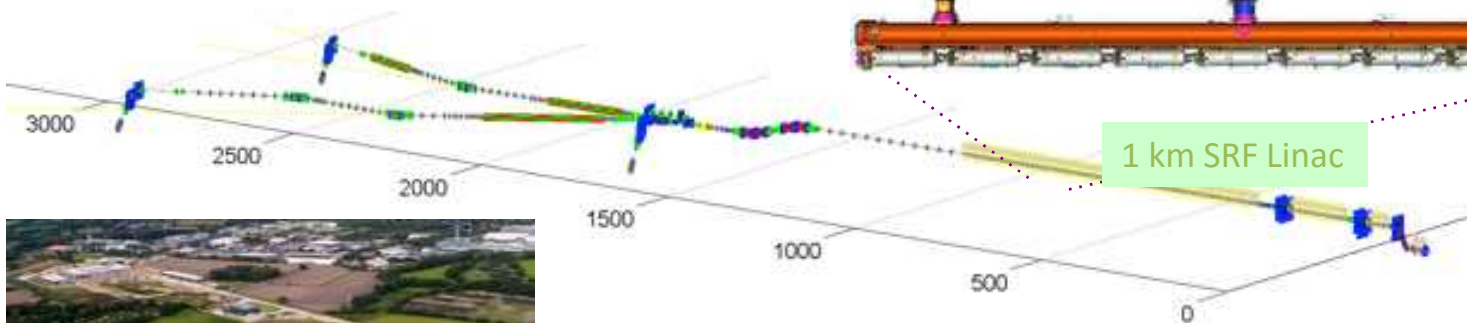
1.3 GHz / 23.6 MV/m

800+4 SRF 加速空洞

100+3 クライオモジュール (CM)



1 km SRF Linac



XFEL site



DESY

## E-XFEL におけるCMの組み立て推移

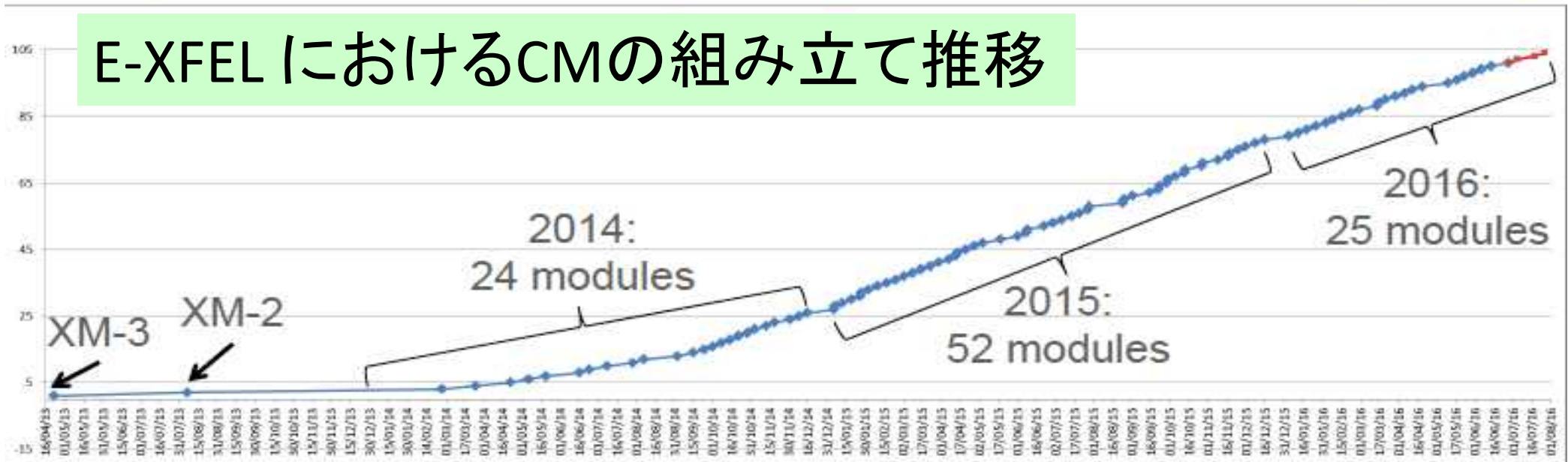
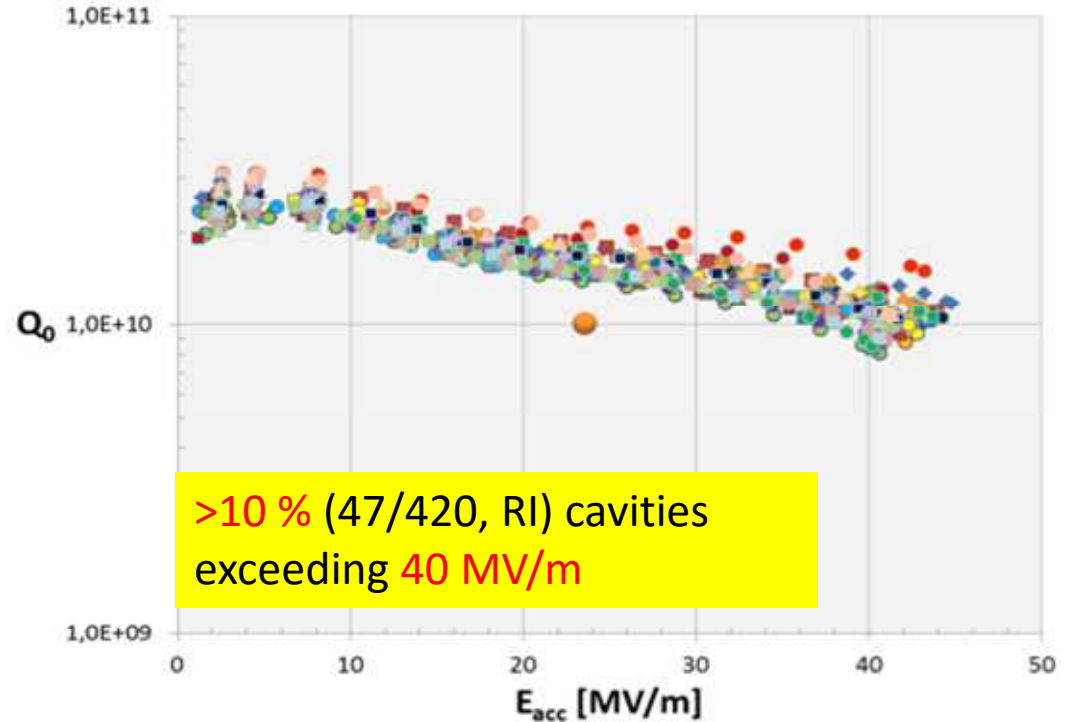
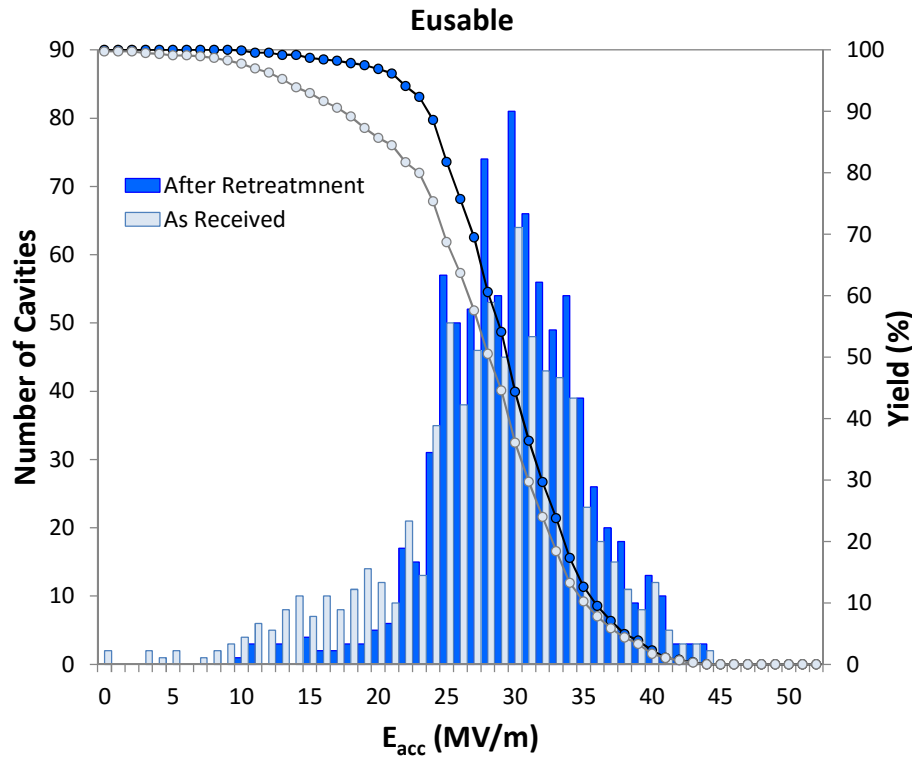


Figure: *delivery of cryomodules, from XM1 to XM100*

- **100 modules delivered to DESY so far** (incl<sup>ing</sup> XM-3, XM-2, XM-1).
- In 2015, one cryomodule was delivered every 4 days, 52 in total.
- The Cold Linac includes also two pre-series cryomodules: XM-2 and XM-1
- The shipment of XM100 is scheduled in 27 July 2016



# European XFEL: SRF 空洞性能

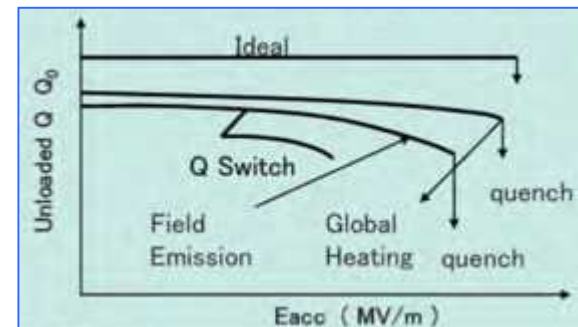


After Retreatment:

**E-usable:  $29.8 \pm 5.1$  [MV/m]**

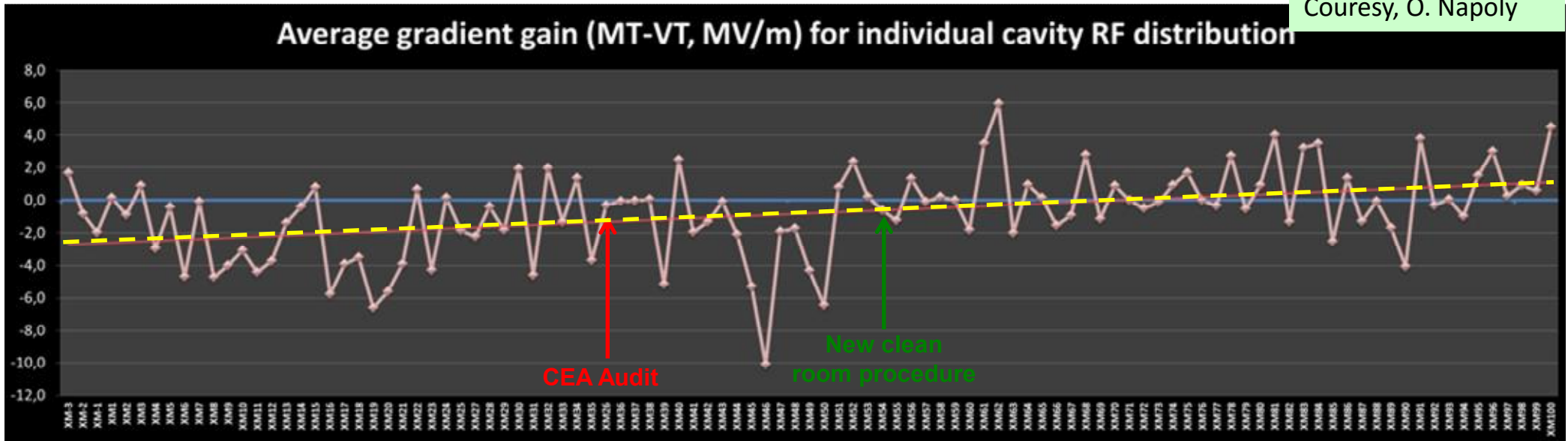
(RI): E usable  $31.2 \pm 5.2$  [MV/m]), w/ 2nd EP

(EZ): E usable  $28.6 \pm 4.8$  [MV/m]), w/ BCP ( instead of 2nd EP)



# Gradient Performance: Cryomodule v.s. Cavity

Courtesy, O. Napoly



1<sup>st</sup> sample of 34 series CM  
 $\Delta E_{op} = -2.1$  MV/m

2<sup>nd</sup> sample of 19 series CM  
 $\Delta E_{op} = -1.7$  (-0.9) MV/m

last 47 series CM  
 $\Delta E_{op} = +0.5$  MV/m



*Degradation mitigated through critical efforts during the 100 European XFEL cryomodule assembly. No-degradation achieved.*

A.

# XFELにおける、DESY, LAL-Orsay , CEA-Saclay ファシリティー

## Examples of realization in Europe

Cavity Test  
(DESY-AMTF)



Input Coupler test  
(LAL-Orsay)



Cryomodule Assembly  
(Saclay)



Cryomodule test  
(DESY-AMTF)



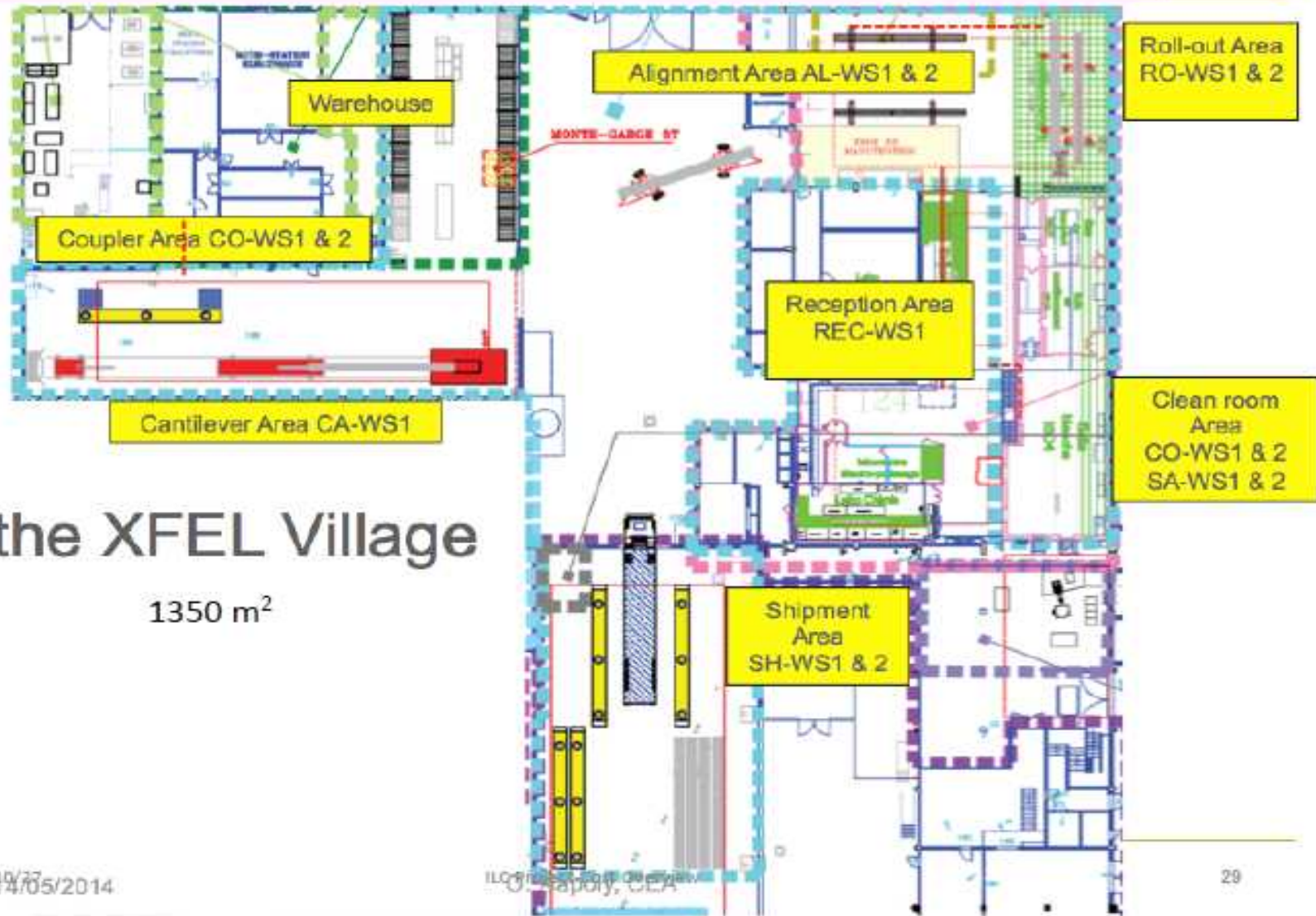
2014/10/27



# CEA-Saclay における空洞-CM 組み立てファシリティー



## Cryomodule assembly at CEA-Saclay



the XFEL Village

1350 m<sup>2</sup>

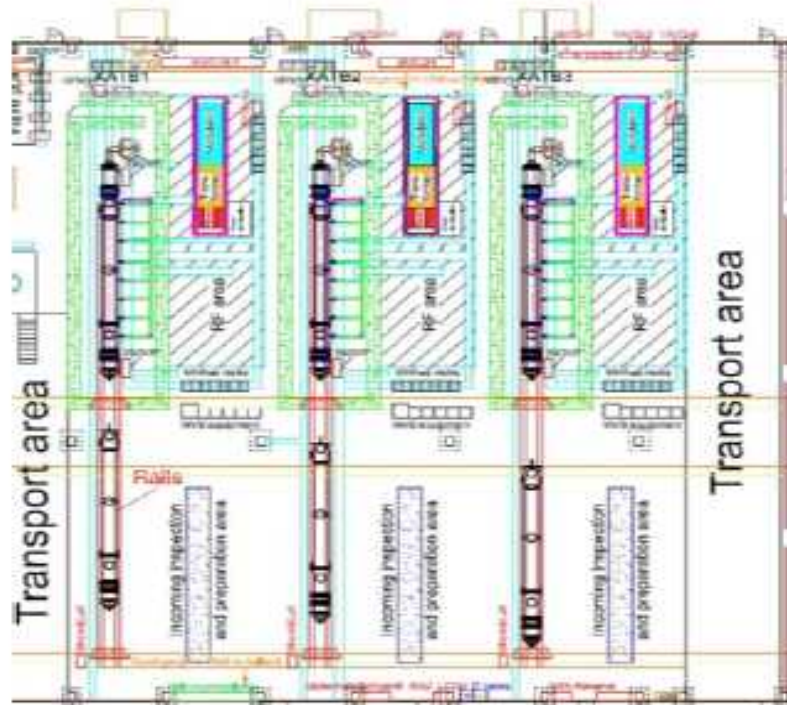
AWLC-14, 14/05/2014

ILCF Cryomodule Assembly Facility, CEA

29



# XFEL: AMTF Hall - XATB



## Cryomodule Testing



2014/05/27 XATB: 50m x 40m

ILC-Acc-Value & Labor Estimate

31