

ILC加速器開発 — 超伝導加速空洞に焦点を当てて —

高エネルギー物理学将来計画検討小委員会タウンミーティング
『コライダー加速器による高エネルギー物理学の将来展望』

2011年9月10日

佐伯 学行

発表の概要

- この発表は、ILCの実現における鍵である超伝導Main Linacに焦点を当てたもの
- ILCの研究開発の歴史、ILC加速器概要、超伝導Main Linac概要
- ILCを実現するために必要な空洞製造受け入れ性能の現状
- ILCで必要な超伝導空洞の数
- 超伝導空洞の製造会社の現状(3極)
- 超伝導Main Linacの最終組み立てをする研究所の現状(3極)
- KEKにおける国際協力による超伝導Main Linac試験(S1-Global)の結果
- KEKにおける超伝導空洞量産の研究開発の現状
- ILCのコストについて
- ILC GDE Projecto Managers の展望・見解
- まとめ



international linear collider

ILC *International Linear Collider*

国際リニアコライダー

電子250GeV + 陽電子250GeV の衝突型線形加速器

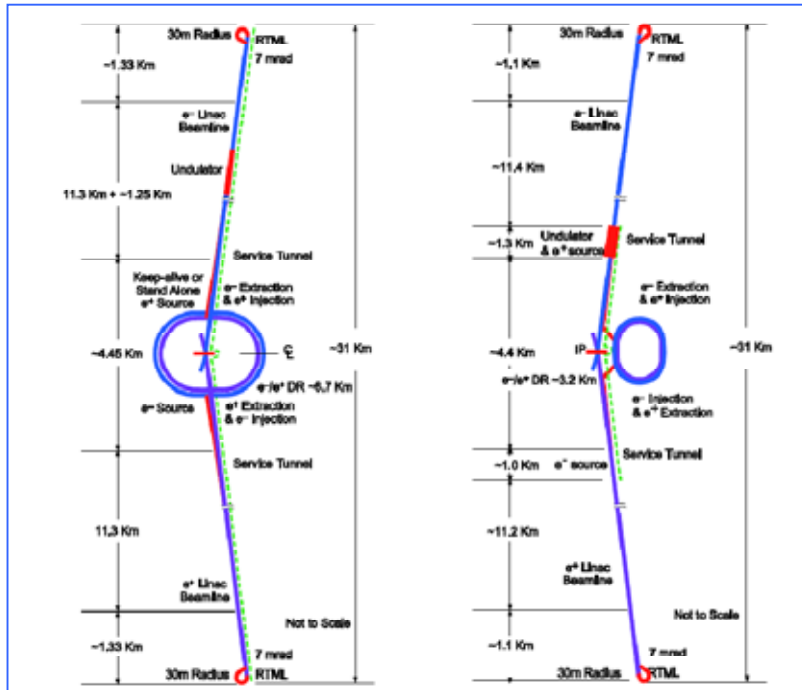
基準設計書 (RDR) の建設費の**59%**が主線形加速器(装置 + CFS)

- 2004年に主線形加速器に**超伝導加速技術**を使用すると決定。
- 国際組織(**GDE**)により、国際協力で統一設計、R&D、開発・建設協力を行っている。
- 2007年に基準設計書(**RDR**)を完成。
- 2010年にコスト低減設計(**SB2009**)を完成、技術開発中間報告書(**Interim Report**)を完成。
- 2012年に技術設計書(**TDR**)の完成を目指すスケジュールで進行中。
- アジア領域ではKEKが中心となって工業化生産を目指す技術開発を行っている。そのための試験設備(**STF**)を建設し技術開発を行っている。

ILC: 工学・技術設計の進展

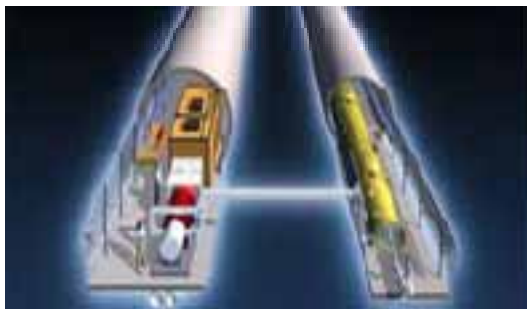
RDR2007 → SB2009

A. Yamamoto

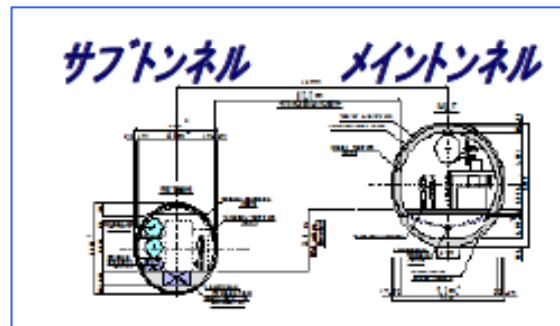


『性能／コスト』の最適化

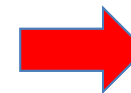
- シングルトンネル化
- Low Power, Dumping Ring小型化
- 陽電子生成標的@中央部
- 空洞運転電界: 31.5MV/m+/-20%
- クライストロン分散配置
- → 効率的設計 (RDR 比: ~ 13% 節減、SCRF は継続努力)



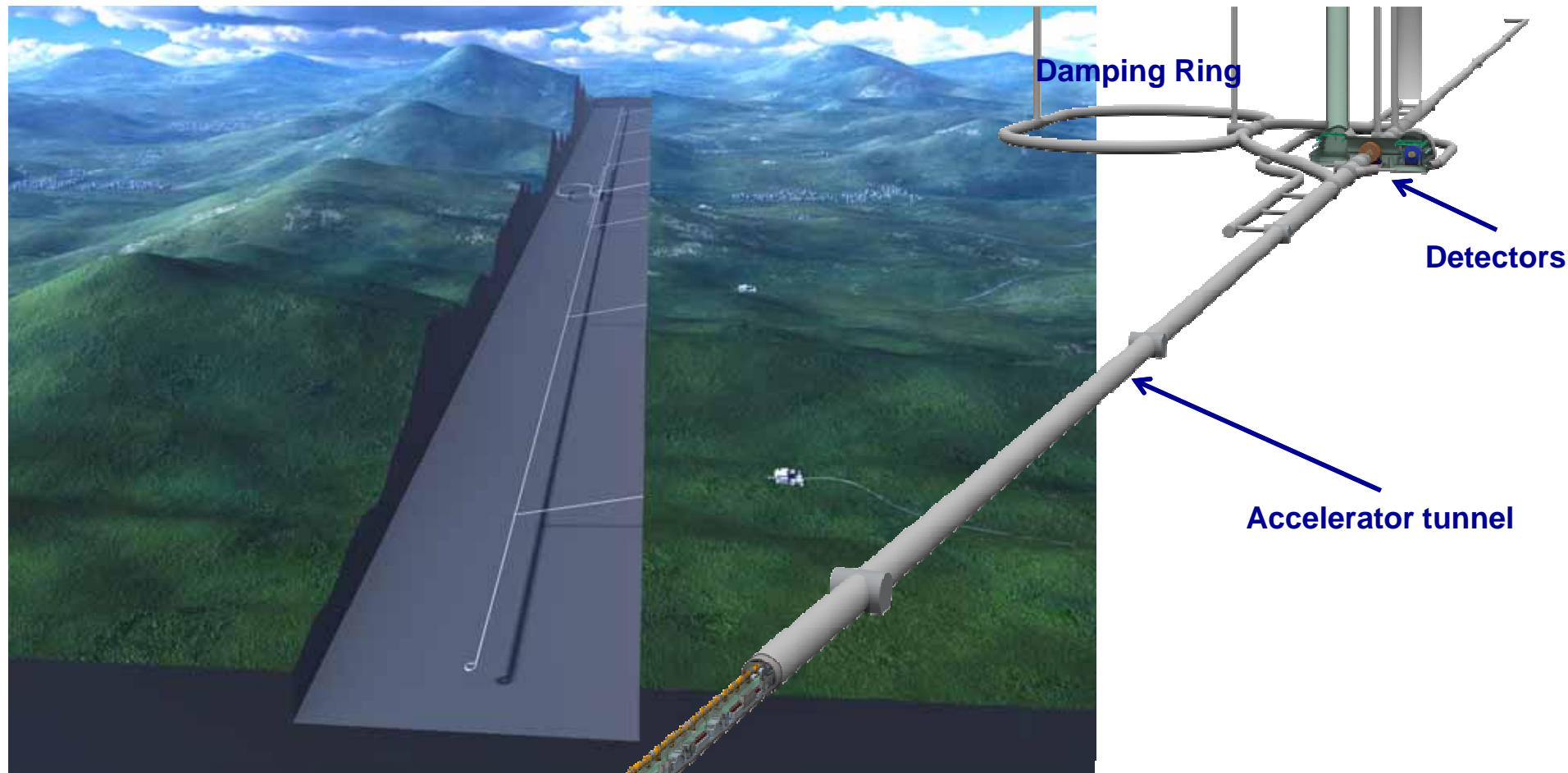
A. Yamamoto, SRF-110725



Advances in ILC-SRF



ILC リニアコライダー加速器(TDR)の鳥瞰図



日本の山岳地帯用トンネルデザイン

e+, e- 主リニアック

Energy : 250GeV + 250GeV

Length : 11km + 11km

of DRFS Klystron: 7280 total

of Cryomodules : 1680 total

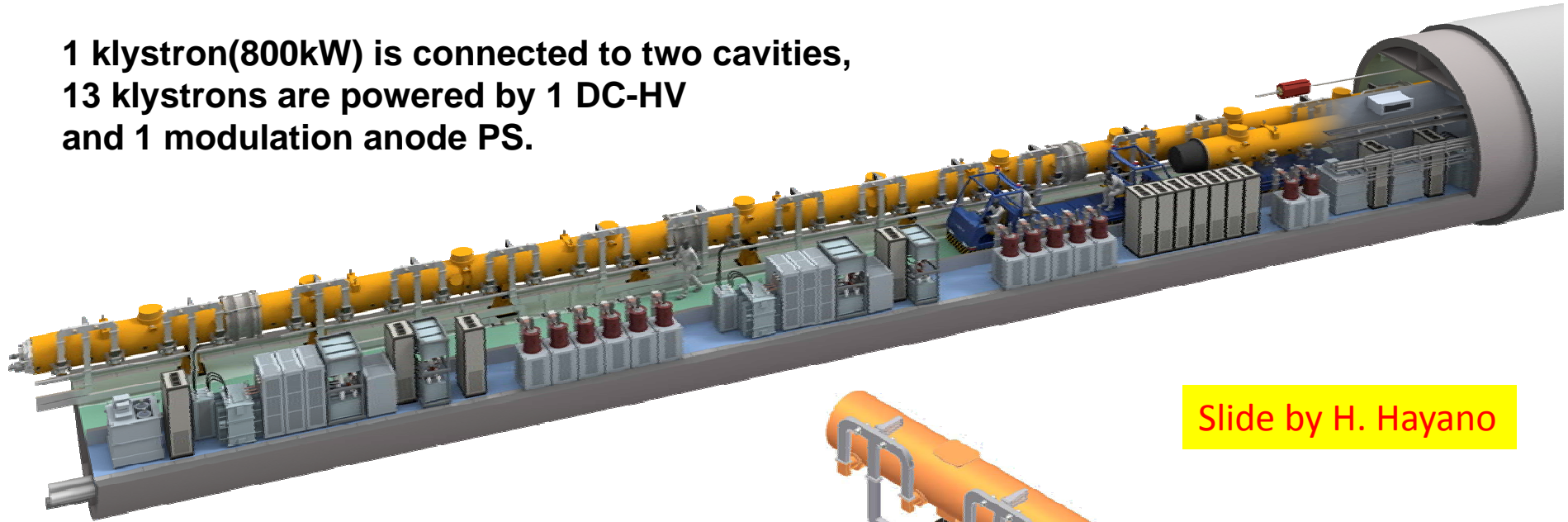
of Cavities : 14560 total

Slide by H. Hayano

日本の山岳トンネル用主リニアックデザイン

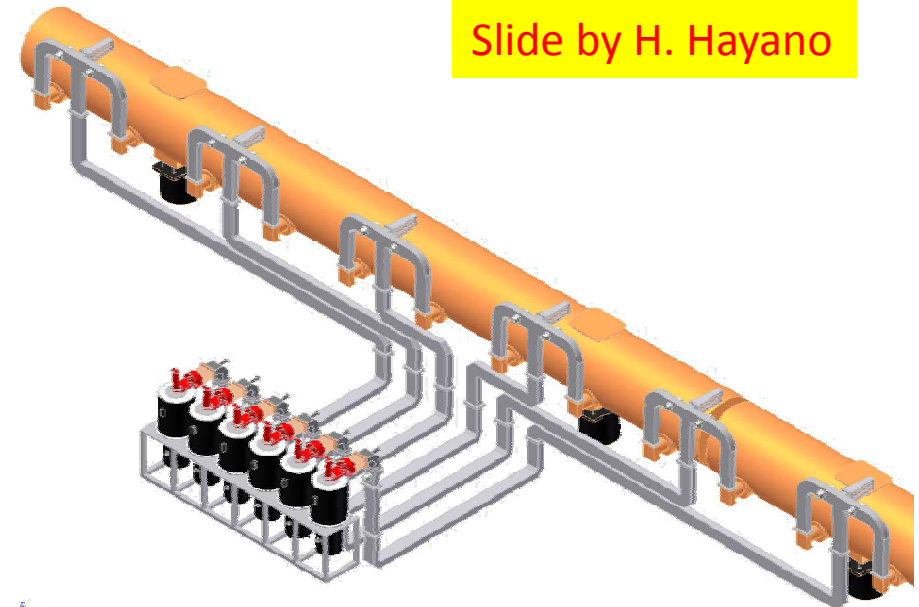
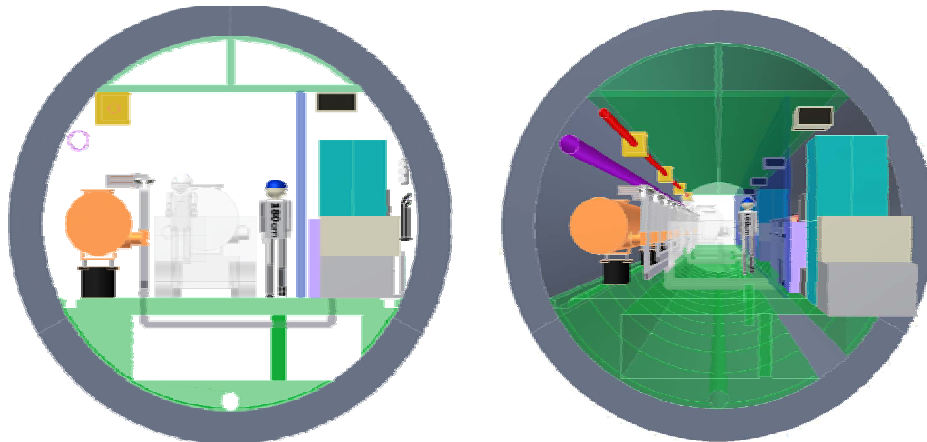
DRFS: Distributed RF Scheme for single tunnel configuration

1 klystron(800kW) is connected to two cavities,
13 klystrons are powered by 1 DC-HV
and 1 modulation anode PS.



Slide by H. Hayano

center space for cryomodule transportation
and human passage

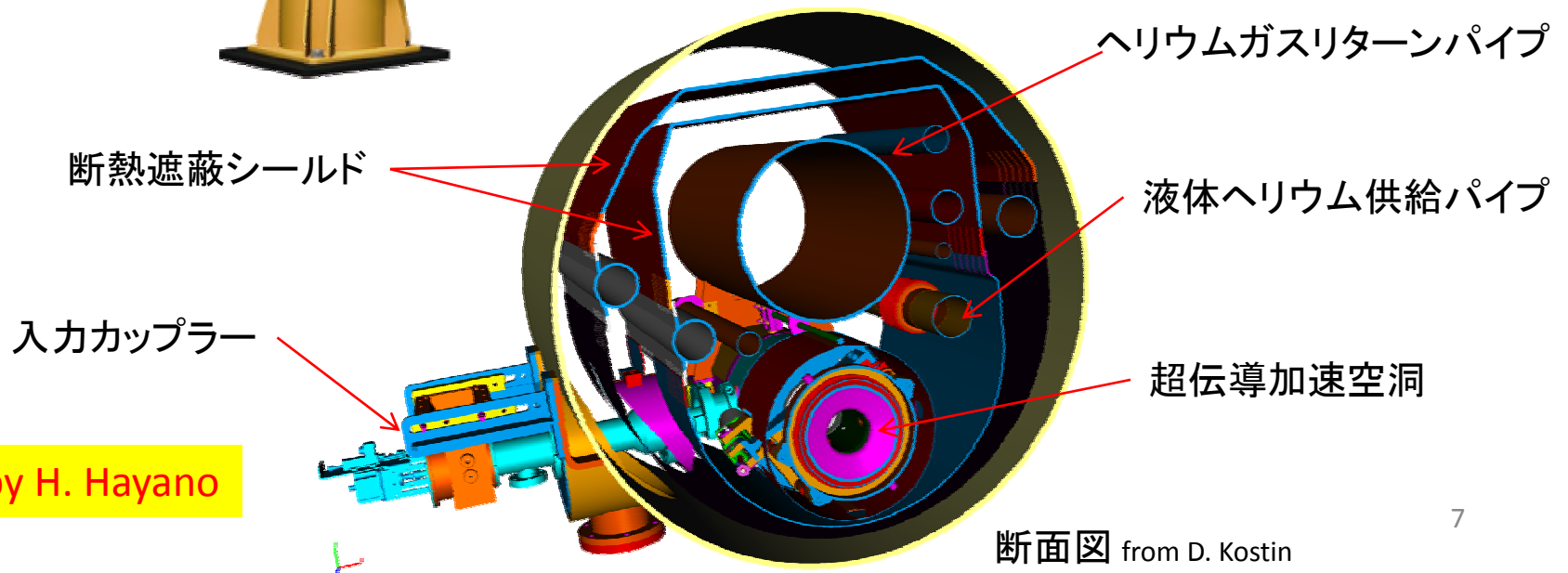


6 DRFS Klystrons for 12 cavities

ILC 主リニアックの鍵となる技術

9台の超伝導加速空洞を納める直径
1m、12m長のクライオモジュール

運転性能（加速勾配）とは、空洞をクライオモジュールに組み込み、ビームを加速をする時（運転時）における性能。ILCの目標は、**31.5 MV/m**である。

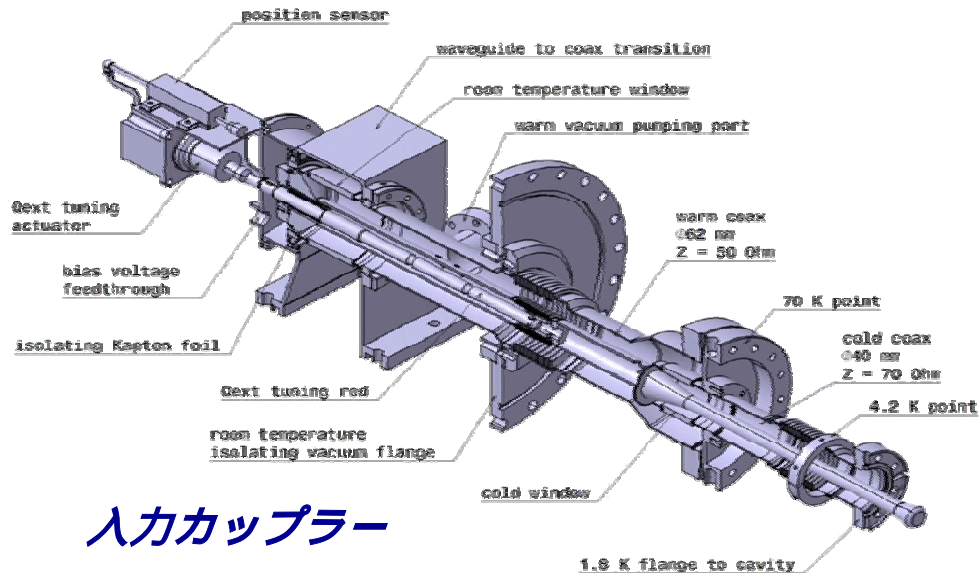
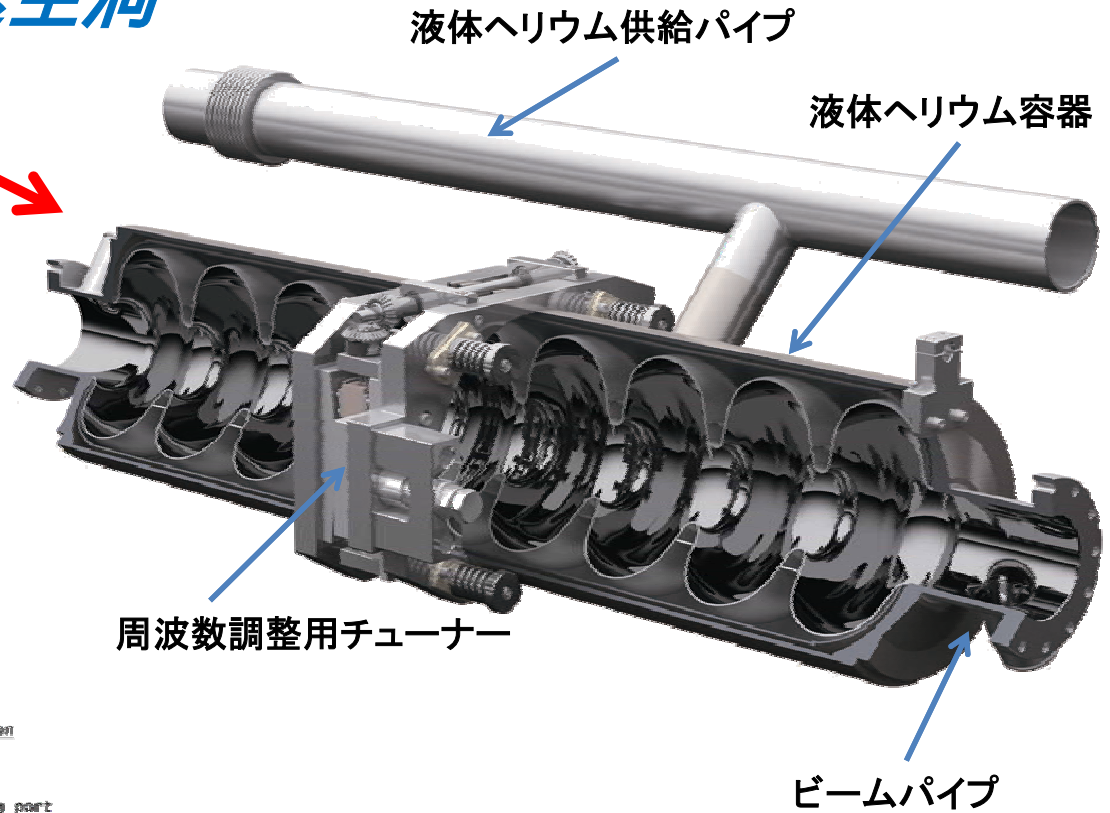


Slide by H. Hayano

超伝導高周波加速空洞

空洞製造と内面処理の2つの工程に分けられる。製造受け入れ性能とは、製造後に内面処理をした後の性能。ILCの目標は35MV/mである。

ニオブ製9セル空洞
チタン製ヘリウム容器
周波数調整チューナー
RF電力入力用カップラー



入力カップラー

超伝導加速空洞

Slide by H. Hayano

超伝導加速空洞の電磁場の様子

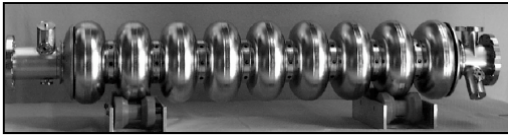
青い部分が温度2Kの液体ヘリウム

ぐるっと回っているのが磁場

糸巻き状に中心軸上にできるのが電場
この電場で粒子を加速する。

大電カクライストロンからのマイクロ波パワー
を導入する入力カップラー。

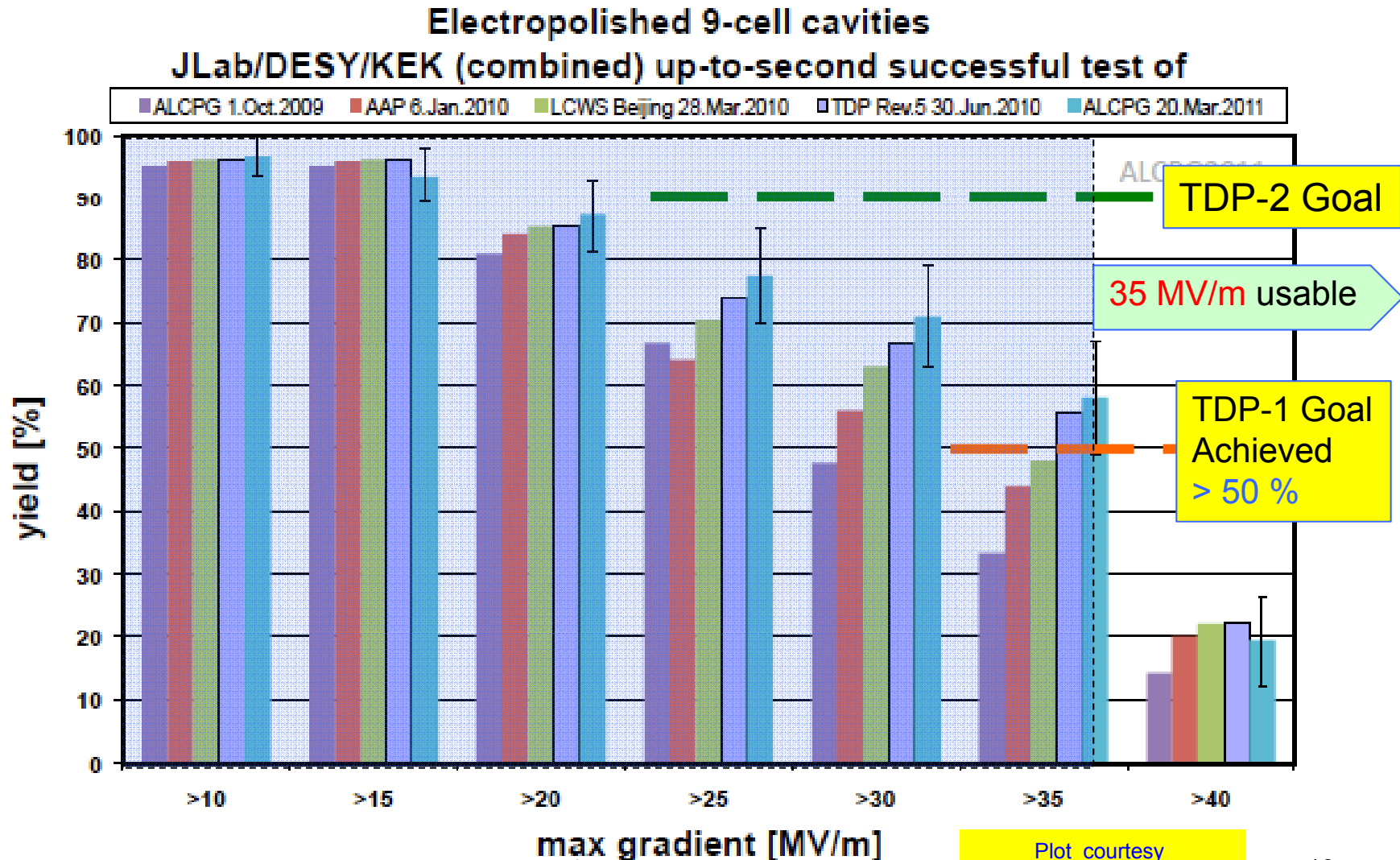
©Rey.Hori



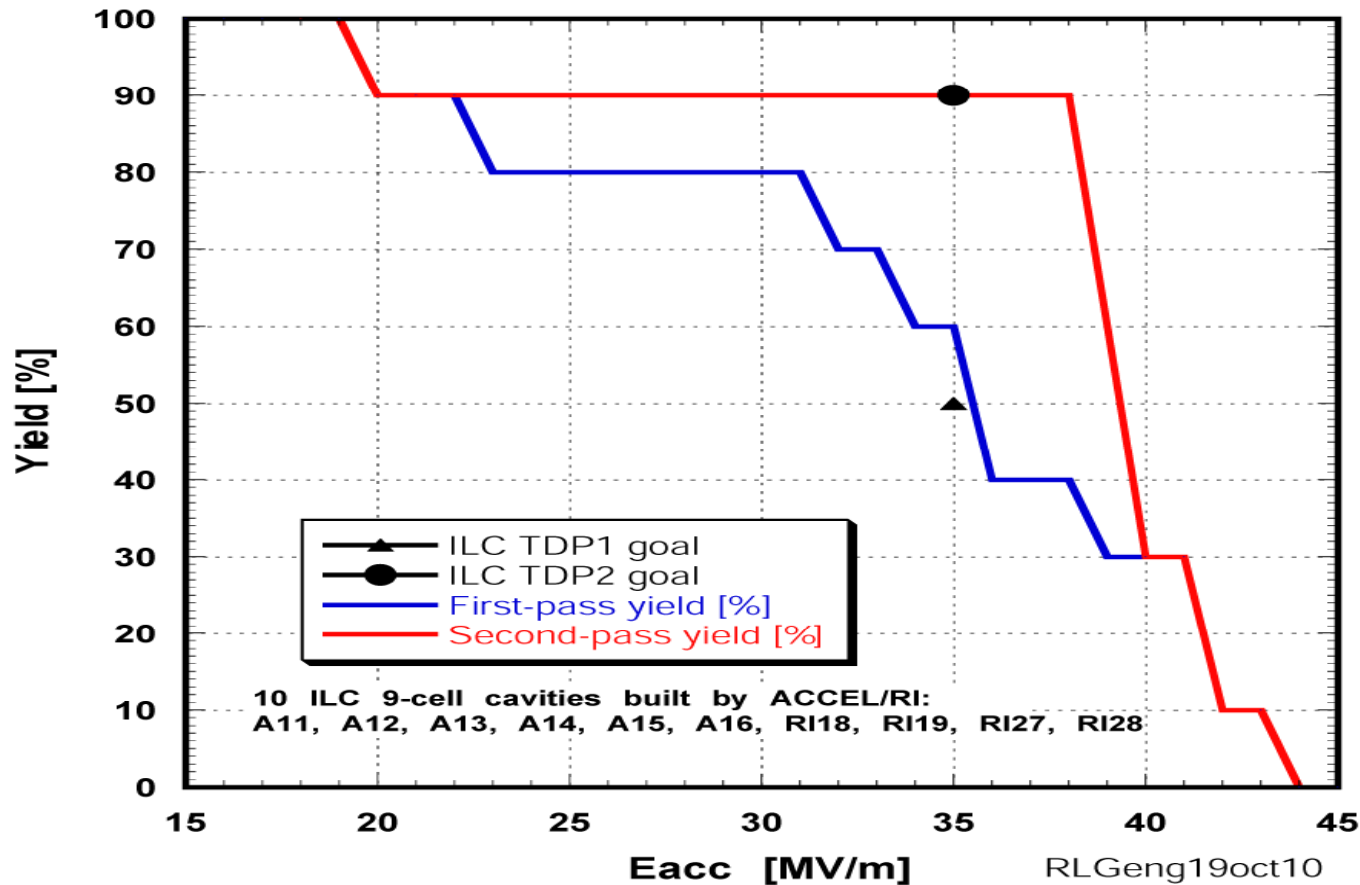
世界の超伝導空洞性能 (3極平均)

Updated, March, 2011

RDRでは、製造受け入れ性能 $>35\text{MV/m}$ で90%の歩留まり(Yield)を仮定している。



Gradient Yield of 10 ILC Cavities Built by One Vendor
Processed and Tested at JLab since July 2008



Jlabにおける標準的な内面処理を行ったRI社製9セル空洞(10台)の性能歩留まりのプロット。製造受け入れ性能 $>38\text{MV/m}$ 対して、歩留まりが90%であることを表している。材料の欠陥や製造時の欠陥がなければ、この歩留まりが得られると考えられる。

良い製造会社と良い表面処理を選ぶと、ILCの最終目標である製造受け入れ性能 $>35\text{MV/m}$ で90%の歩留まり(Yield)を既に達成している。

ILC(500GeV)の空洞生産台数の定義

クライオモジュールの台数(1.3GHz空洞を装荷するもの):総数1824台

6空洞クライオモジュール:4台(e⁺booster)

8空洞クライオモジュール:560台(Main Linac)+36台(RTML)+24台(e⁻source)
+18台(e⁺booster)+2台(e⁺keepalive)=640台

9空洞クライオモジュール:1120台(Main Linac)+60台(RTML)=1180台

使用する1.3GHz ILC空洞の総数=15,764台 (RDRの定義)

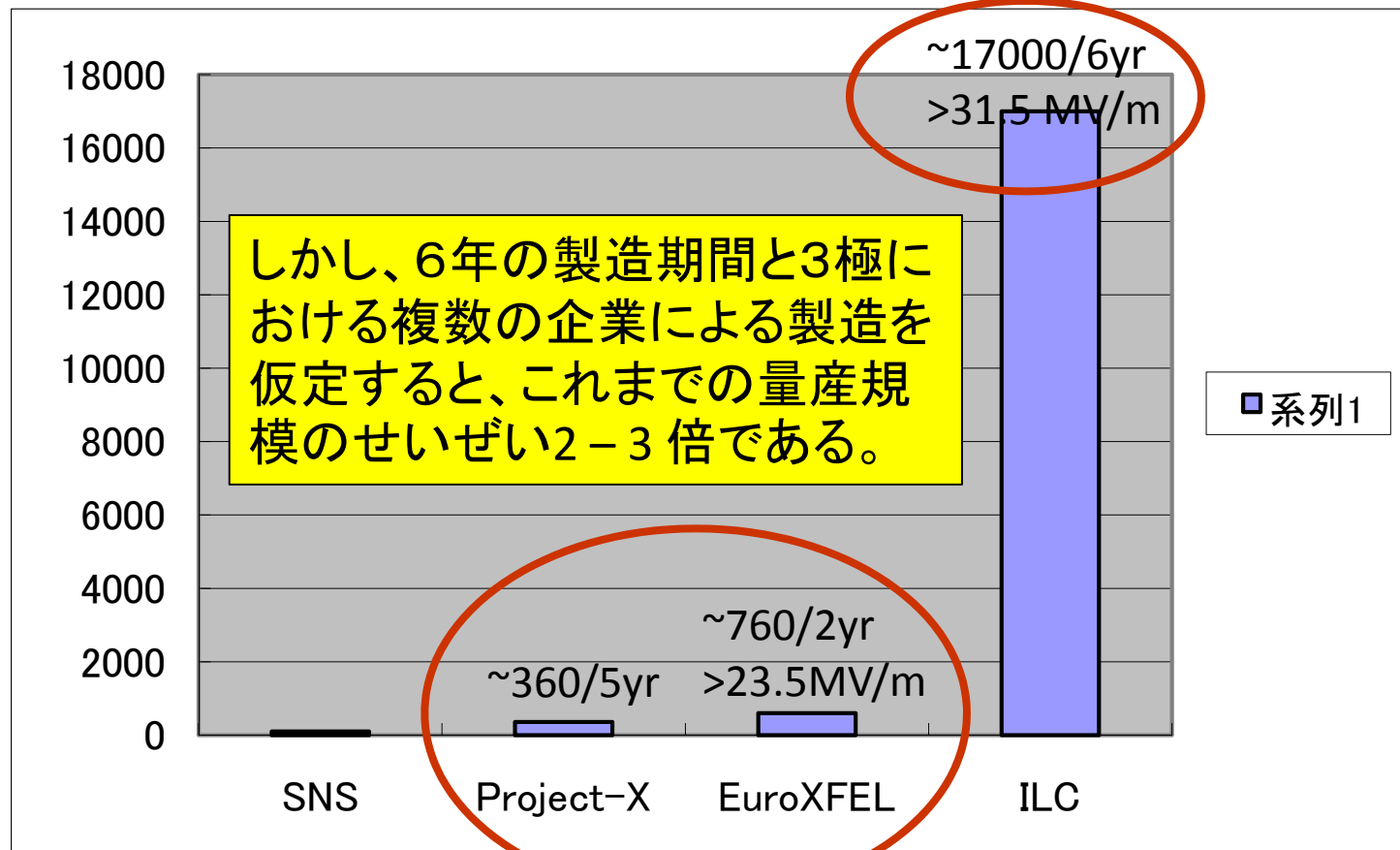
製造時受け入れ性能>35MV/mの空洞をクライオモジュールに使用する場
合、歩留まりを90%と仮定すると、あらかじめ9.9%多い台数を生産しなけ
ればならない。(ただし、これはRDRの定義ではない)

15764 x 1.099 = **17,325台の空洞生産が必要**

ILCの空洞製造数は文字通り桁違い

加速空洞
多セル超伝導
空洞の総数

ハイテック装置
の大量生産
品質管理
コストダウン



ILCの量産化に向けて

- 世界の超伝導空洞製造会社
 - Research Instruments (旧ACCEL) and Zanon in Europe
 - AES, Niowave, Roak, PAVAC in Americas
 - MHI, Hitachi, Toshiba, and others in Asia

Project Scope			Assuming 200 work-days/yr
SNS	~ 110	3years	< ~ 1 cavity / week
XFEL → ÷ 2 社	~760	2 years	380/yr : ~ 1.9 cavities /day → 0.95 cavities /day/vendor
Project X	~360	4-5 years	72/yr : 1.8 cavity / week
ILC			
1 社対応 model	~17,000	6 years	~2800/yr → 14 cavities /day
6 社対応 model (3 regions x 2)	~17,000	6 years	~ 470/yr → 2.2 cavities /day/vendor

実際には、既に9社が存在している。
9社対応 model → 1.5 cavities / day/vendor

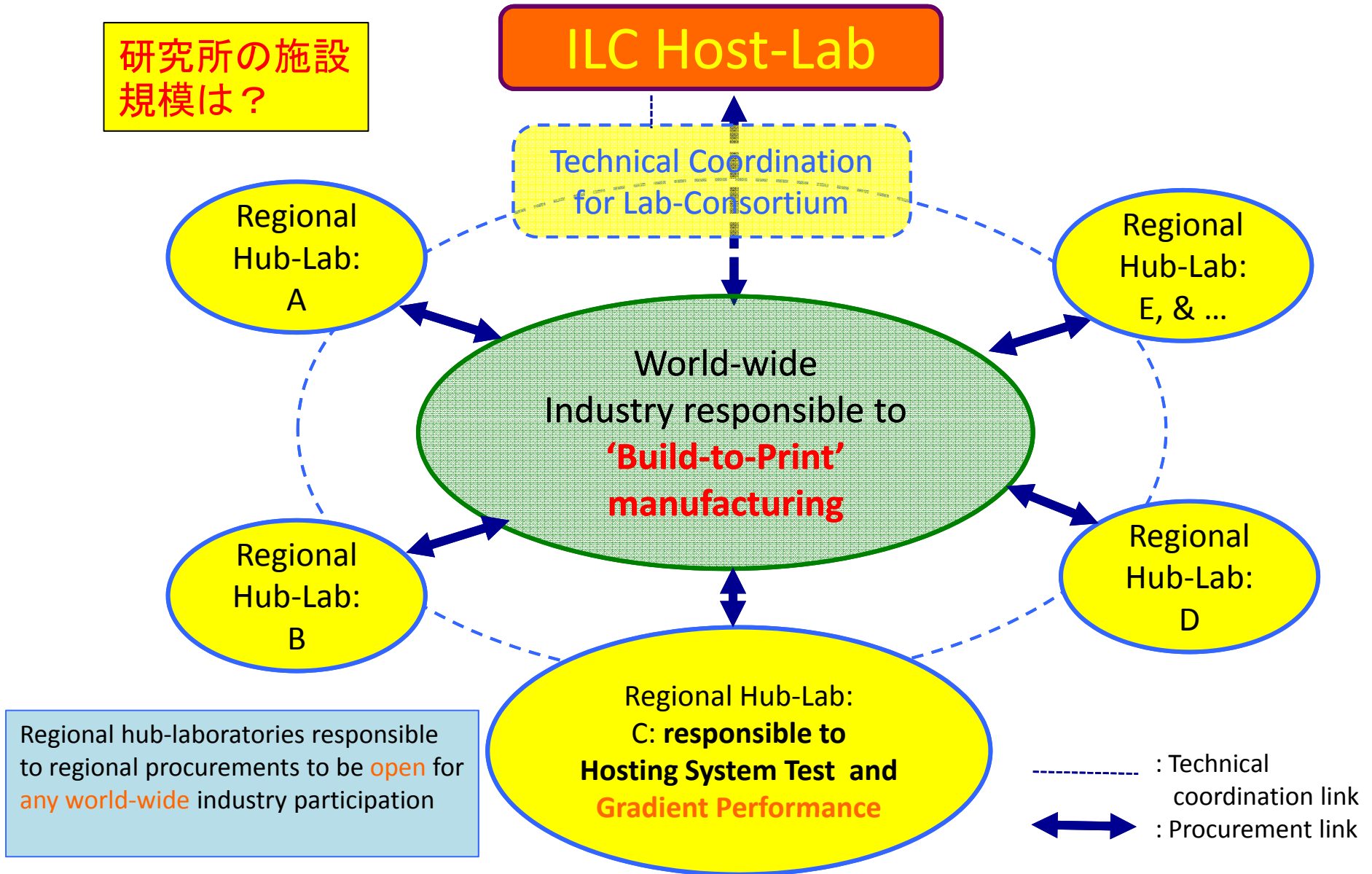
ILC Project Managers がILC関連の各製造会社を訪問 (and further plan)

	Date	Company	Place	Technical subject
1	2/8	Hitachi	Tokyo (JP)	Cavity/Cryomodule
2	2/8	Toshiba	Yokohana (JP)	Cavity/Cryomodule, Magnet
3	2/9	MHI	Kobe (JP)	Cavity / (Cryomodule)
4	2/9	Tokyo-Denkai	Tokyo (JP)	Material (Nb)
5	2/18	OTIC	NingXia (CN)	Material (Nb, NbTi, Ti)
6	3/3	(Zanon) mtg at INFN	Verona (IT)	Cavity/(Cryomodule)
7	3/4	RI	Koeln (DE)	Cavity (Cryomodule)
8	3/14, (4/8)	AES	Medford, NY (US)	Cavity (Cryomodule)
9	3/15, (4/7)	Niowave	Lansing, MI (US)	Cavity/ (Cryomodule)
10	4/6	PAVAC	Vancouver (CA)	Cavity, EBW-machine
11	4/25	ATI Wah-Chang	Albany, OR (US)	Material (Nb, Nb-Ti, Ti)
12	4/27	Plansee	Ruette (AS)	Material (Nb, Nb-Ti, Ti)
13	5/24	SDMS	Sr. Romans (FR)	Cavity, Vessel, joint
14	7/6	Heraeus	Hanau (DE)	Material (Nb, Nb-Ti, Ti)
15	9/14	Zanon	Verona (IT)	Cryomodule
16	11/16	SST	Munchen (DE)	EBW-machine

Factor 2 -3 倍の規模拡張は問題なく対応可能

Slide by A. Yamamoto

SCRF Procurement/Manufacturing Model



Accelerator technology - collaborative effort

Industrial study module assembly (M6 done, M8 autumn 2007)

Superferric magnet (CIEMAT)



2 more cryostats (TTF3/INFN) delivered



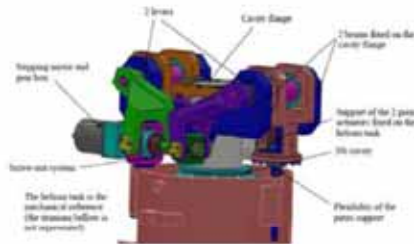
BPM (Saclay)



Integrated HOM absorber



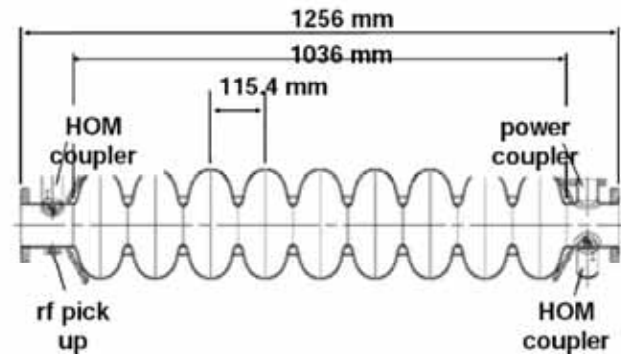
Length quantized $n \cdot \lambda/2$ (possibility of ERL)



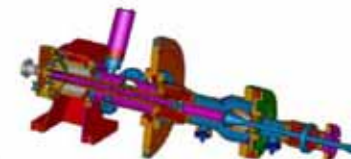
Tuner w/piezo (Saclay)



Industrialization in preparation



LLRF development (collab. Warsaw/Lodz)



TTF3-type coupler
Industrialization launched (Orsay)



EURO-XFEL in construction

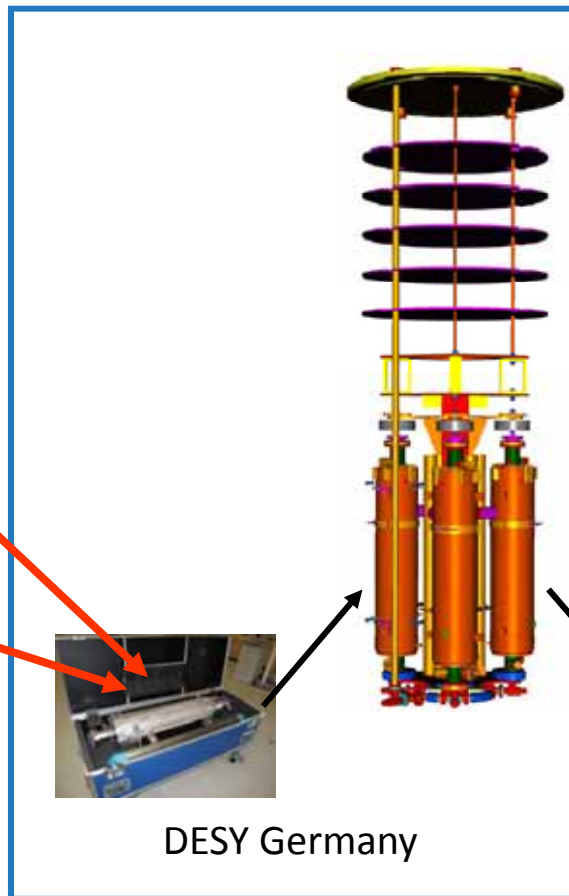


RI: 380 cavities / 2 year
Zanon: 380 cavities / 2 year
Total 760 cavities / 2 year

EURO-XFEL in production

DESY

Saclay

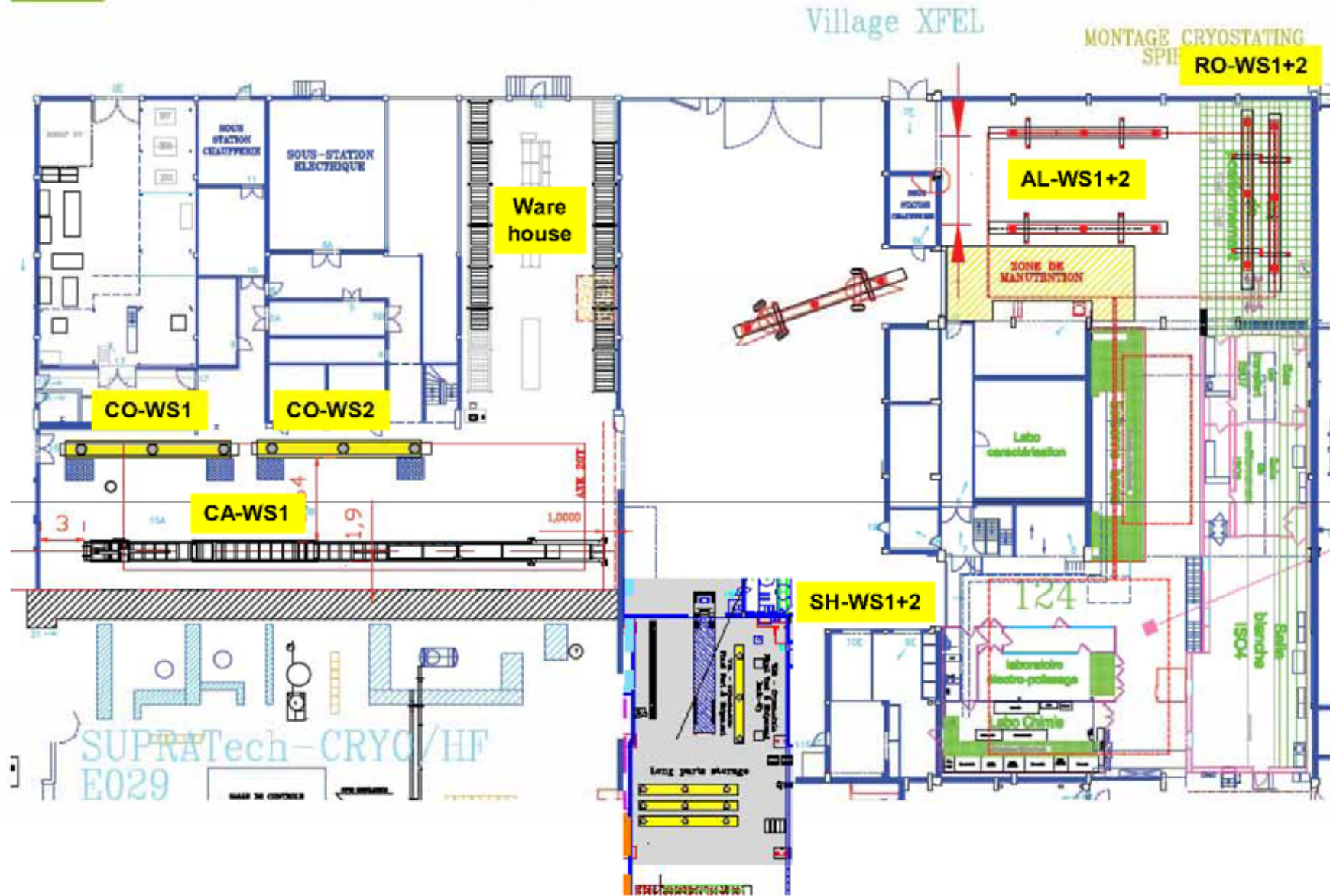


**DESY takes care of installation / dismounting of cavities into / from test insert
Transport to CEA in transport boxes as well**

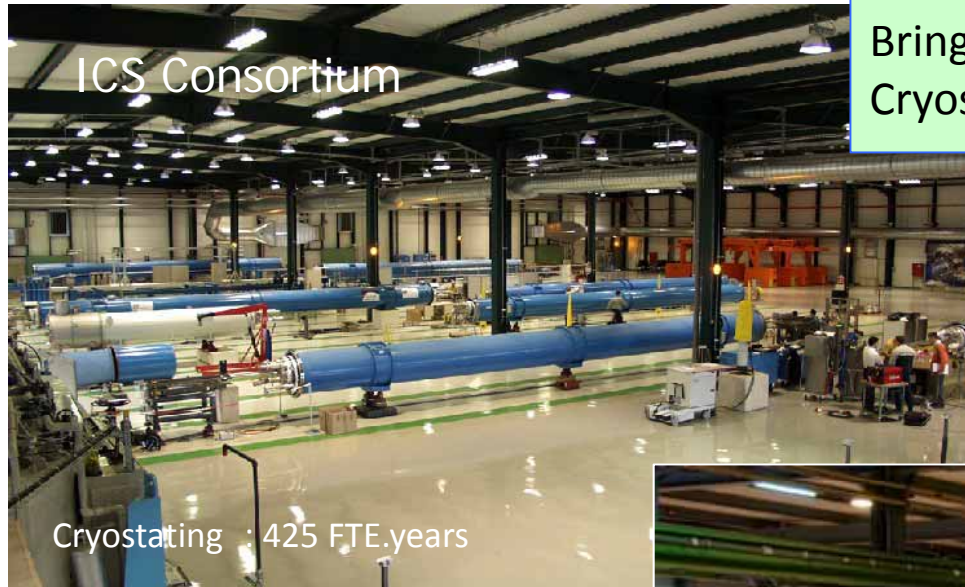
TTC Meeting, Milano, February 28 to March
3, 2011
Hans Weise, DESY



Cryomodule 組み立て工場 @ Saclay (FRANCE)



CERN's Experience from LHC Cryostating and Test

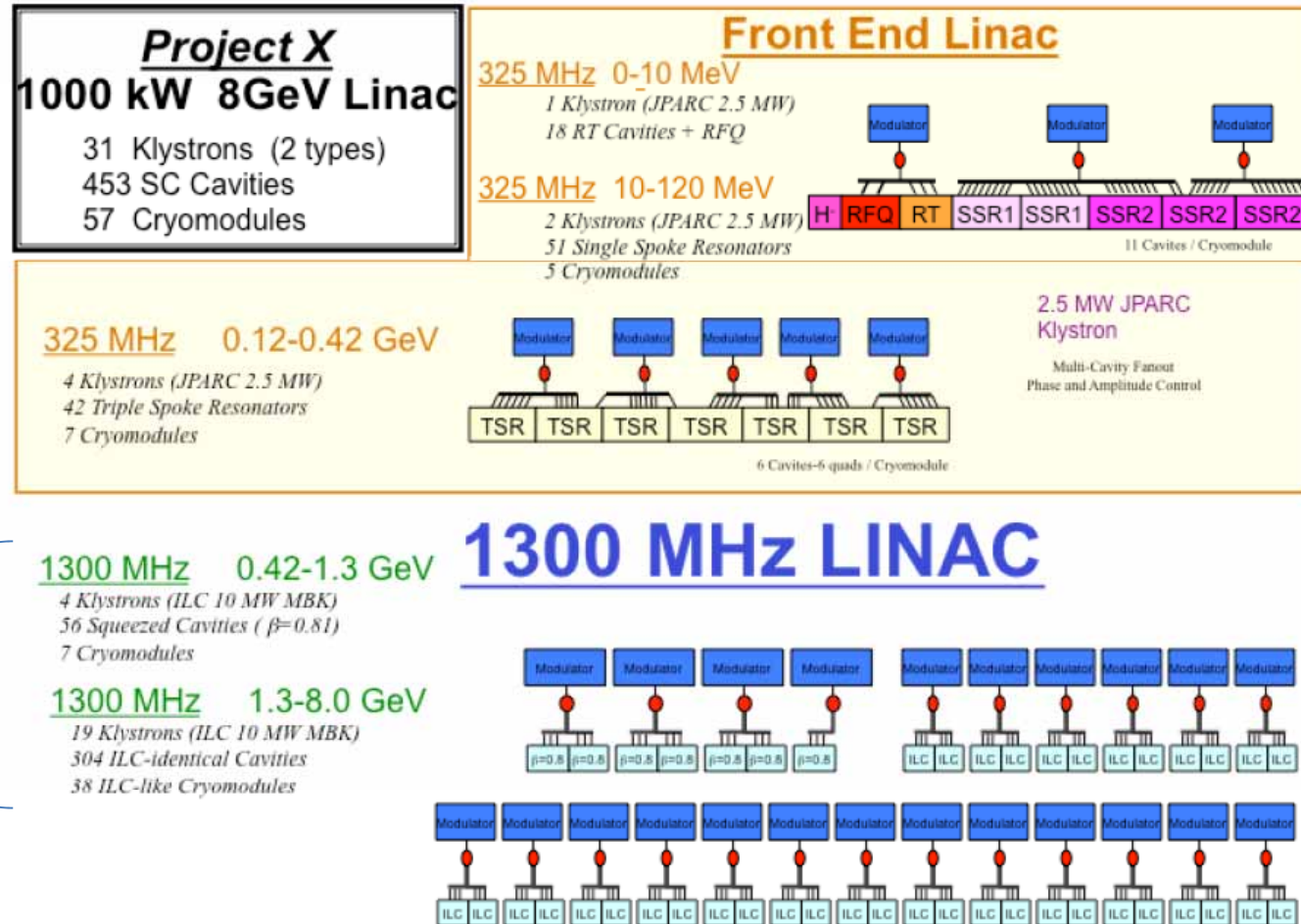


Bringing industry to the laboratory
Cryostat assembly by industry on CERN site



Producing in-house with industrial methods
Cryogenic magnet test station at CERN

Project X Linac Configuration at FNAL



360 Cavities

Figure III-3 : Layout and component counts for the initial Project X linac configuration

Cryomodule activities at FNAL



CM1 String Assembly



MP9 Clean Room



Final Assembly



CM1



Move to NML



CM1 installed

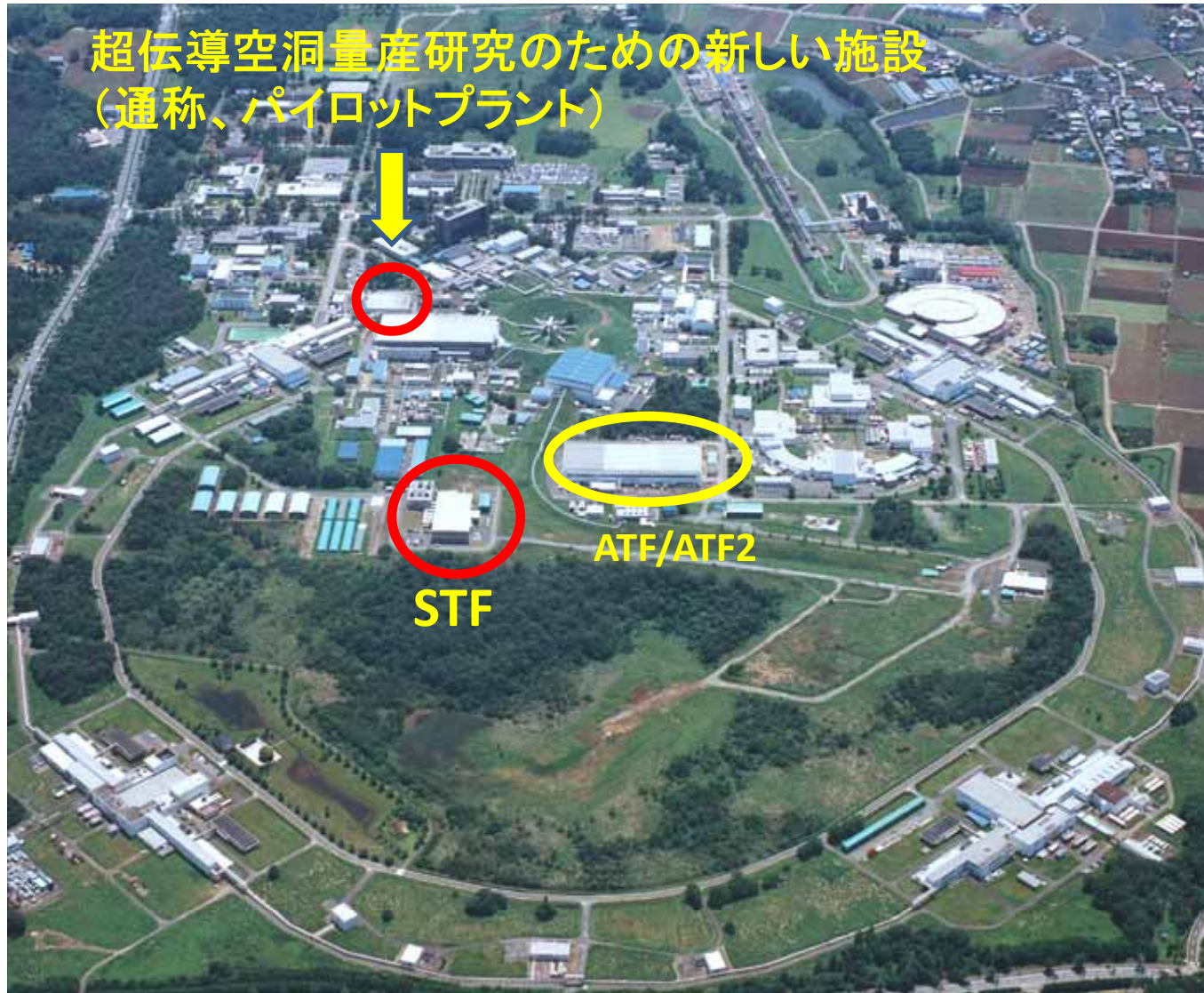


Dressing cavities for CM2

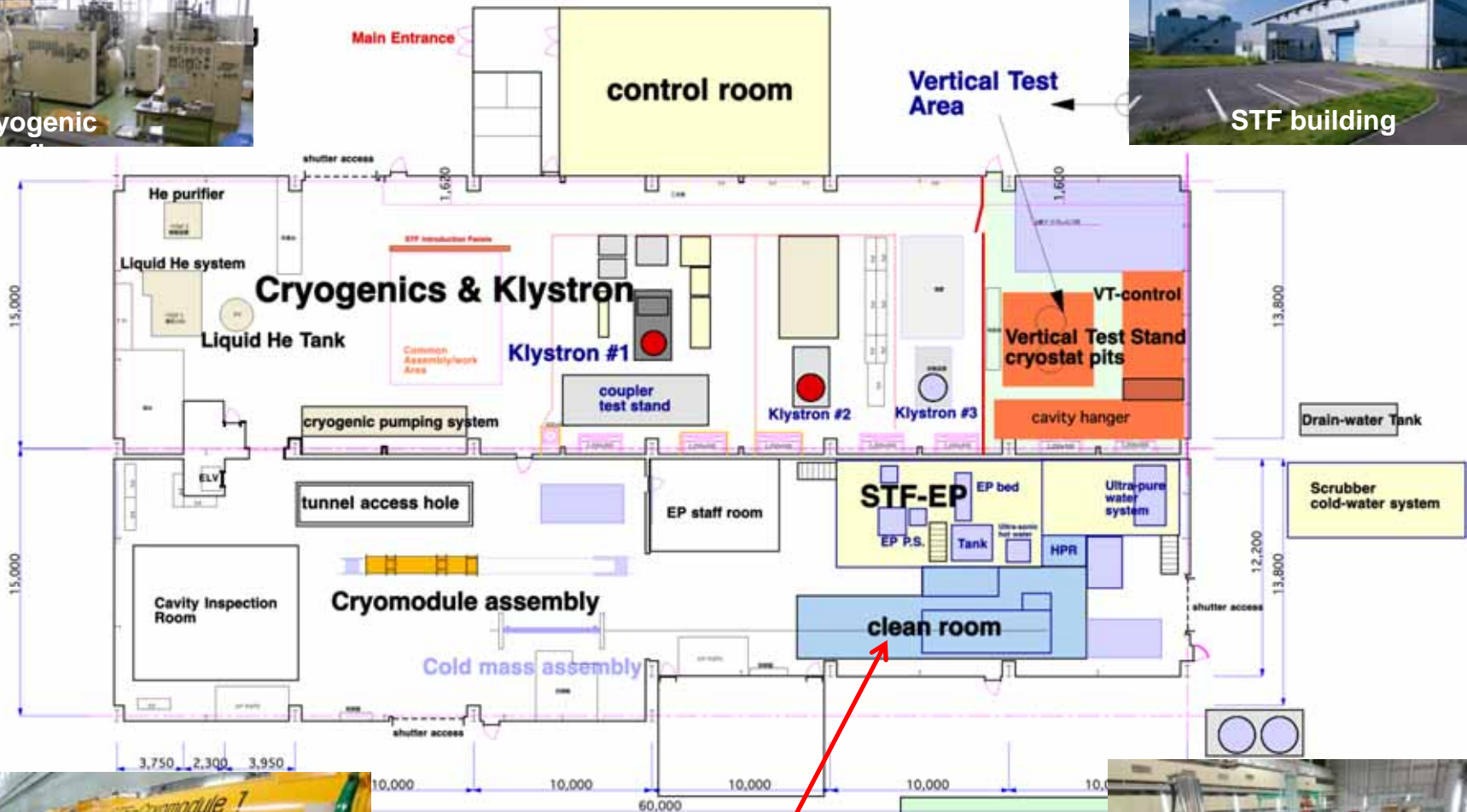


FNAL S1 global Cavities @ KEK

KEKのILC試験設備



STF (Superconducting RF Test Facility)



4空洞のストリング組み立て

DC-HV power supply for Klystron #1 mod



S1-Global クライオモジュール試験

Demonstration of average gradient 31.5MV/m cryomodule by international collaboration

Realization of ILC Plug-compatibility concept

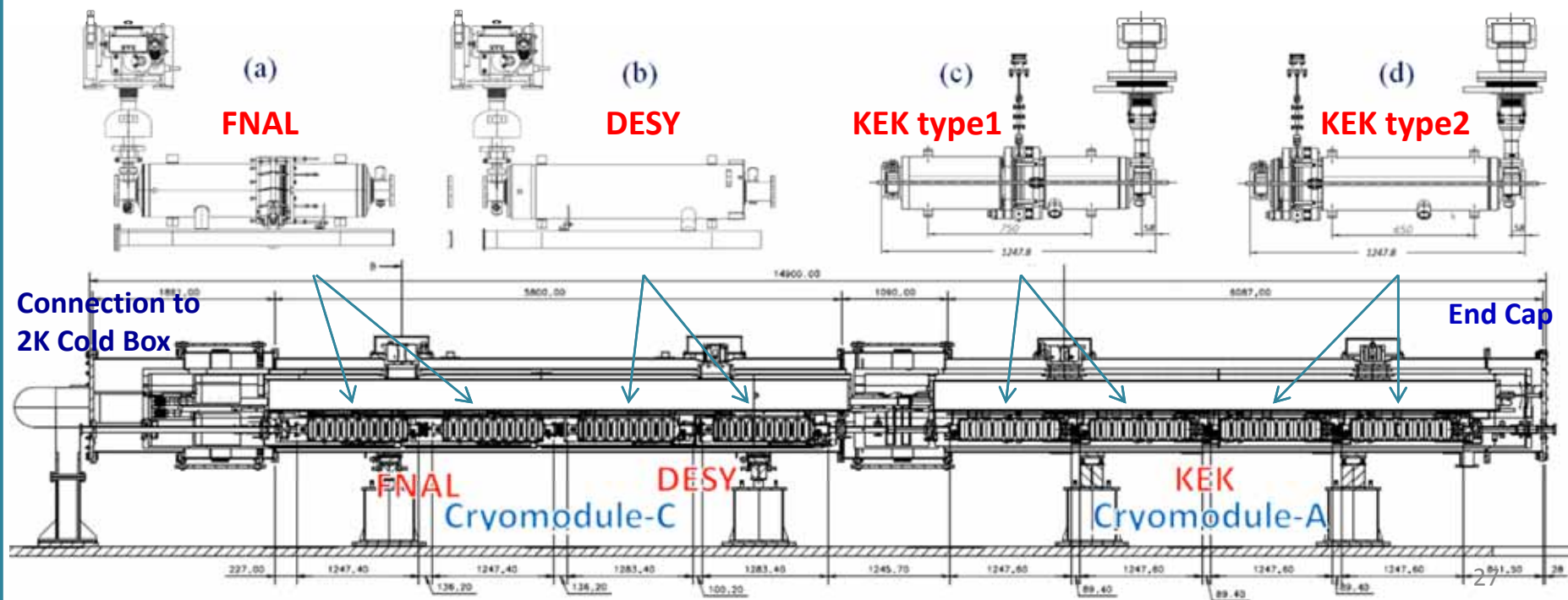
Module-C : INFN Cryostat + 2 FNAL cavities + 2 DESY cavities

Module-A : STF short cryostat + 4 KEK TESLA-style cavities

power distribution : 2 SLAC VTO + STF waveguides

Assembly: Jan 2010 - May 2010

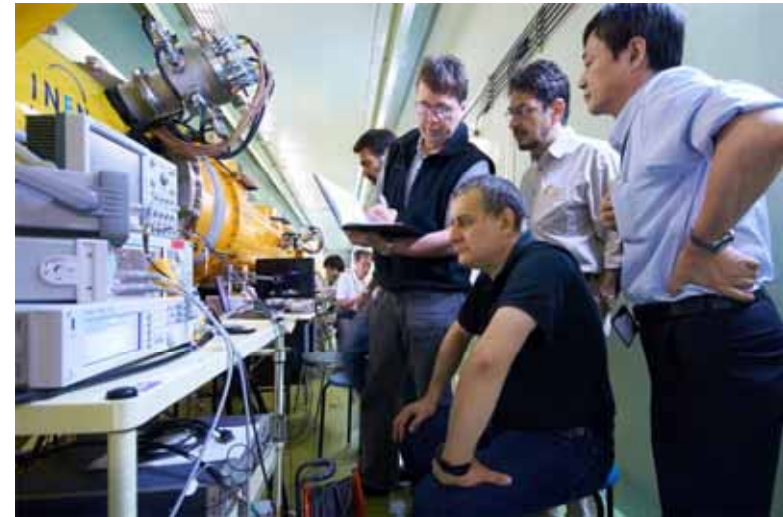
Operation: June 2010 – February 2011



Finish Cryomodule assembly, start cryomodule cool-down



cavity connection in clean room for module installation



Tuner test collaboration work with INFN/FNAL researcher

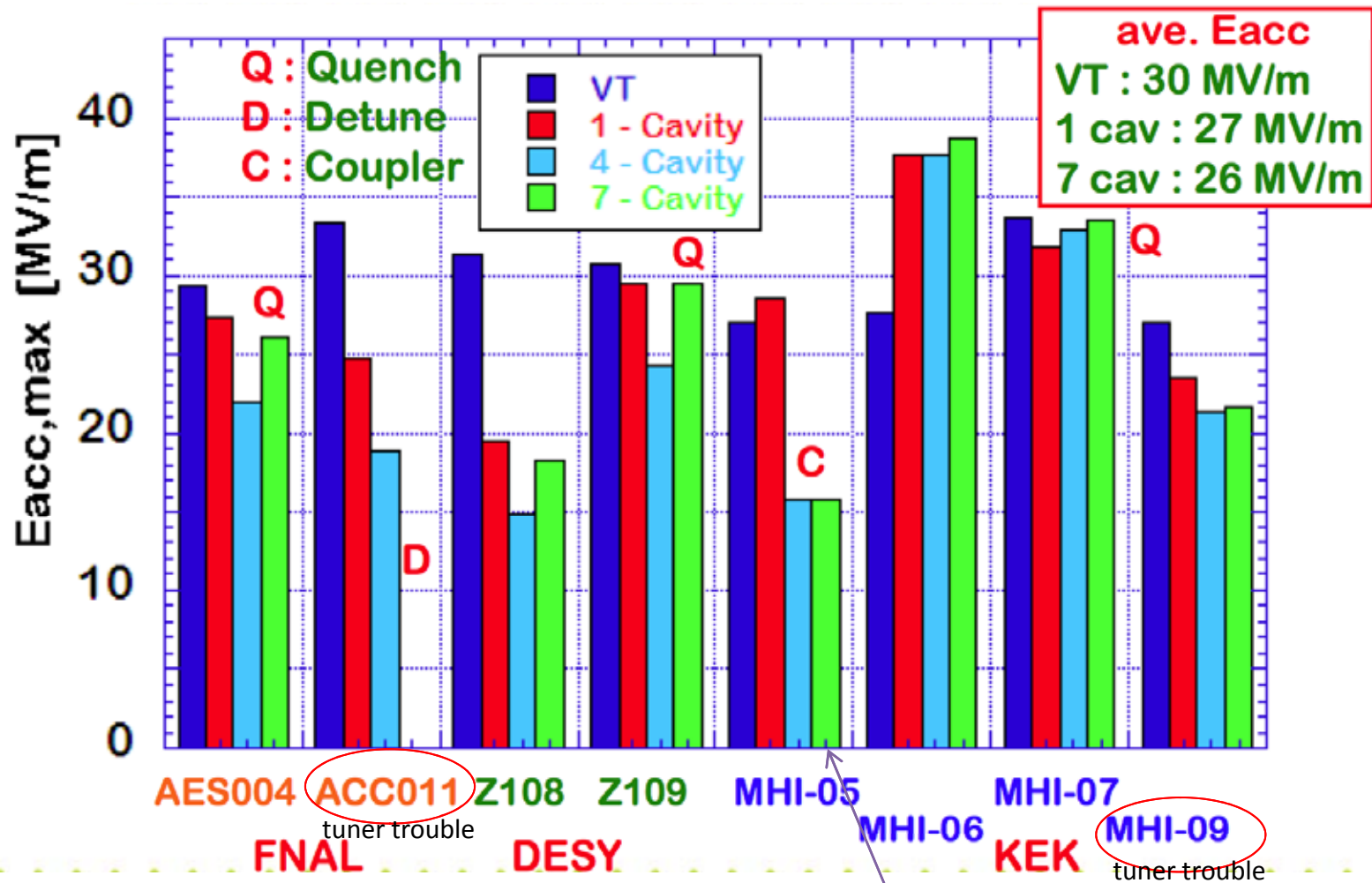


S1-Global Cryomodule

7 Cavities combined operation

7 cavities: Frequency was tuned to MHI-09 and ACC011 was not used -> Max. 26MV/m

7 cavities: to ACC011 MHI-09 was not used -> Max. 25MV/m



Coupler vacuum trouble happened during test at MHI-05

STF 最近の実績

最近のKEK空洞(6台)の性能

- ◎ MHI-012 **40.7MV/m** for capture cryomodule
- MHI-013 32.2MV/m for capture cryomodule (contamination)

- ◎ MHI-014 **36.6MV/m** for CM-1 ILC cryomodule
- △ MHI-015 28.5MV/m for CM-1 ILC cryomodule (limited by defect) 局所研磨中
- × MHI-016 21.3MV/m for CM-1 ILC cryomodule (limited by defect) 局所研磨中
- ◎ MHI-017 **38.4MV/m** for CM-1 ILC cryomodule

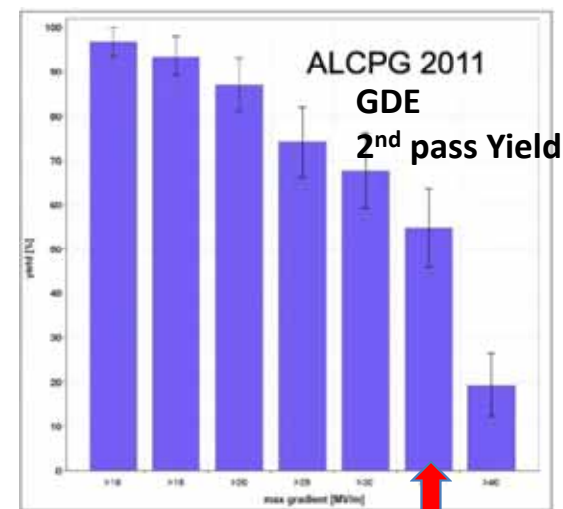
MHI-018~022 については2011秋から表面処理と試験

S1-Global クライオモジュールでの到達性能

Performance before assey: average 30MV/m

Each cavity performance after assey: average 27MV/m

7 cavity vector-sum operation: 26MV/m



>35MV/m : 55% +/-9% Yield

KEKの新しい空洞製造研究施設

EBW



SST EBOCAM KS-110 – G150KM Chamber (Stainless Steel chamber)

Press



AMADA digital-survo-press SDE1522
150t, 50stroke/min, 225mmstroke

Trim



MORI VKL-253
Vertical CNC lathe



Tape-cut Ceremony on July 13, 2011 for EBW operation start.



Chemi-room³¹

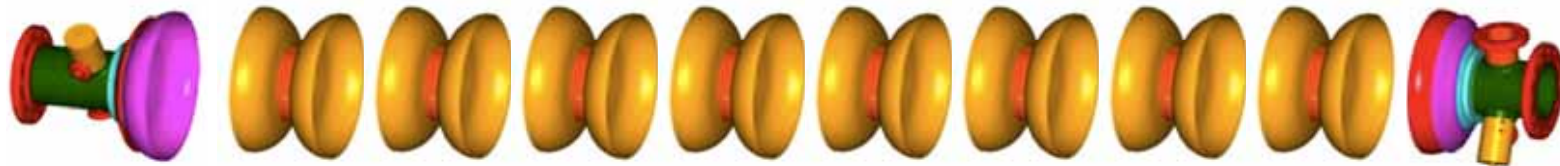
超伝導9セル空洞の製造工程

ダンベル組み立てのEBW:

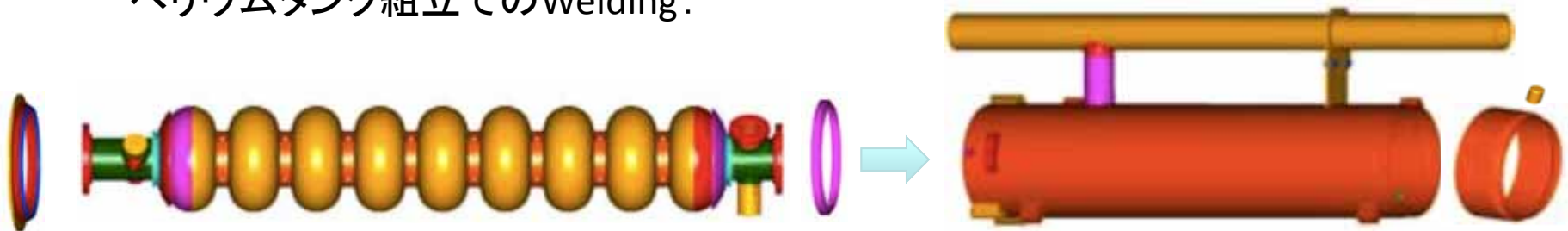


空洞組立てのEBW:

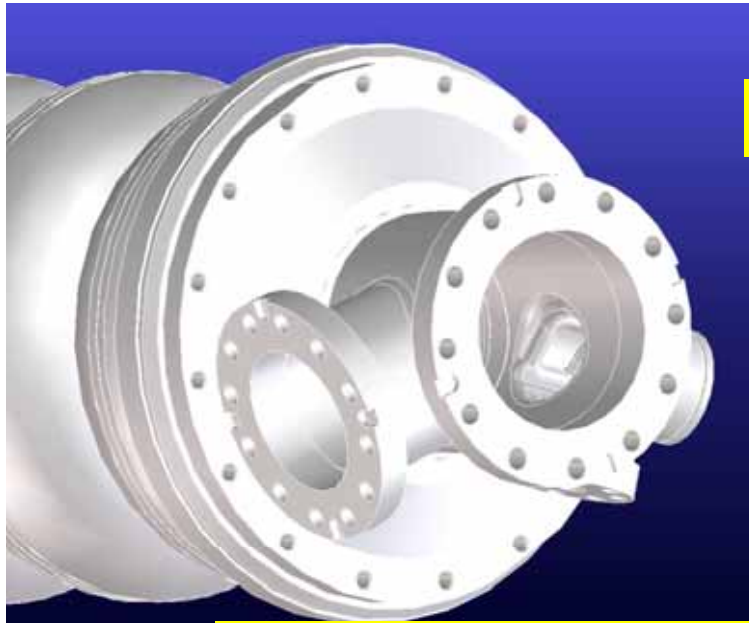
ダンベルの組み立ては単純だが数が多い



ヘリウムタンク組立てのWelding:



エンド部分の複雑な構造



HOM coupler



エンド部は複雑な機械加工と溶接組み立て工程が必要



HOM can



HOM antenna

9セル空洞の量産とコスト削減に向けた研究

AES社のダンベル量産治具。
1回の真空排気で10個のダンベルを溶接。



KEKでは、これをさらに発展させた量産方法を検討中。



HOM外導体の突起構造をプレス機で成形した試験サンプル。

KEKでは、従来は削り出し法で行っていたHOM外導体の加工を、プレス機で成形する試験を行っている。

SHINOHARA

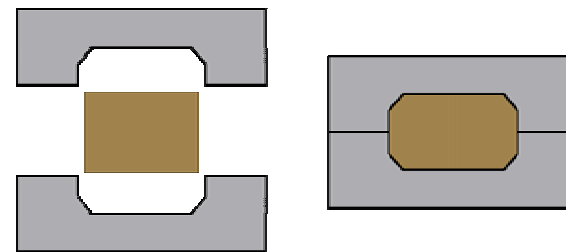
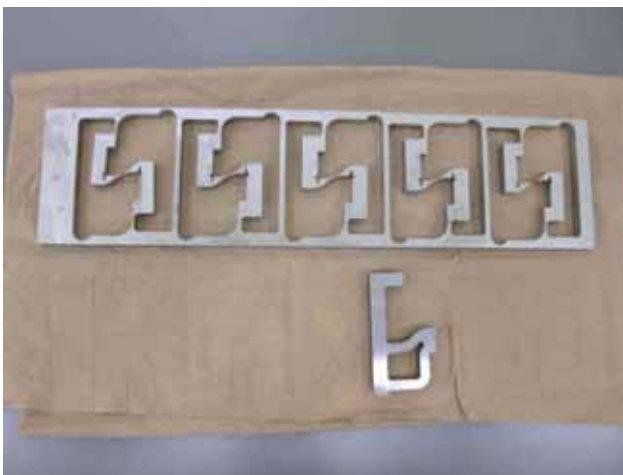
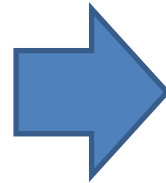


製造工程の大幅な簡素化によって、量産コストの削減が期待できる。

9セル空洞の量産とコスト削減に向けた研究



Water-jet cutter in a job shop



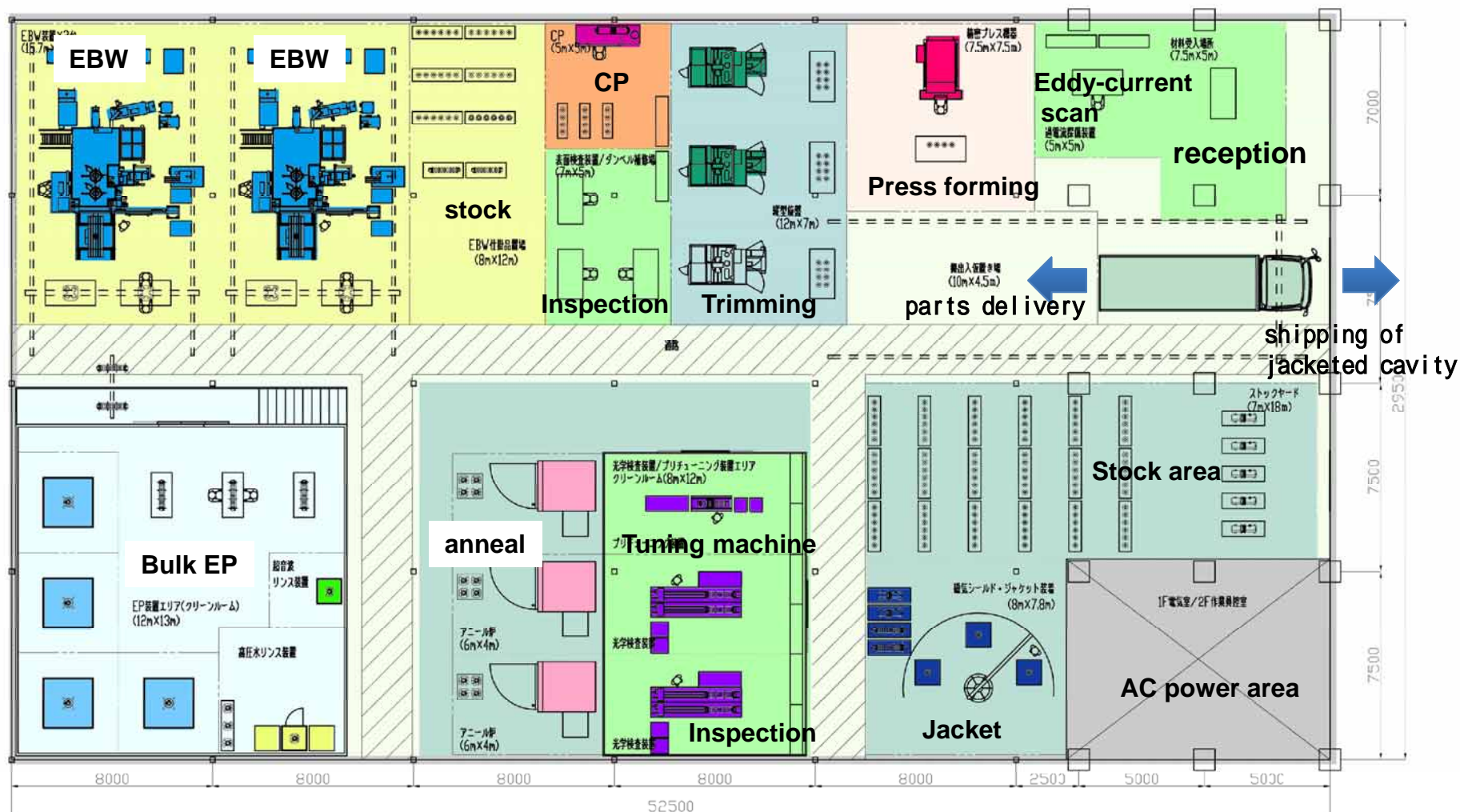
KEKでは、従来は削り出し法で行っていたHOM内導体(HOMアンテナ)の加工を、プレス機で成形する試験を行っている。工程の大幅な簡素化が期待できる。

日本における空洞製造工場の設計検討

Slide by Hayano

KEK-MHI

Plant Simulation study using CFF housing area (53m x 30m)



Assuming Nb plates for cell, fabricated end-group parts are input, 200 working days/year, 2 shifts/day with 30 people times 2 shifts



Max. production rate will be ~530 cavities/year, ~2650 cavities for 5 years.

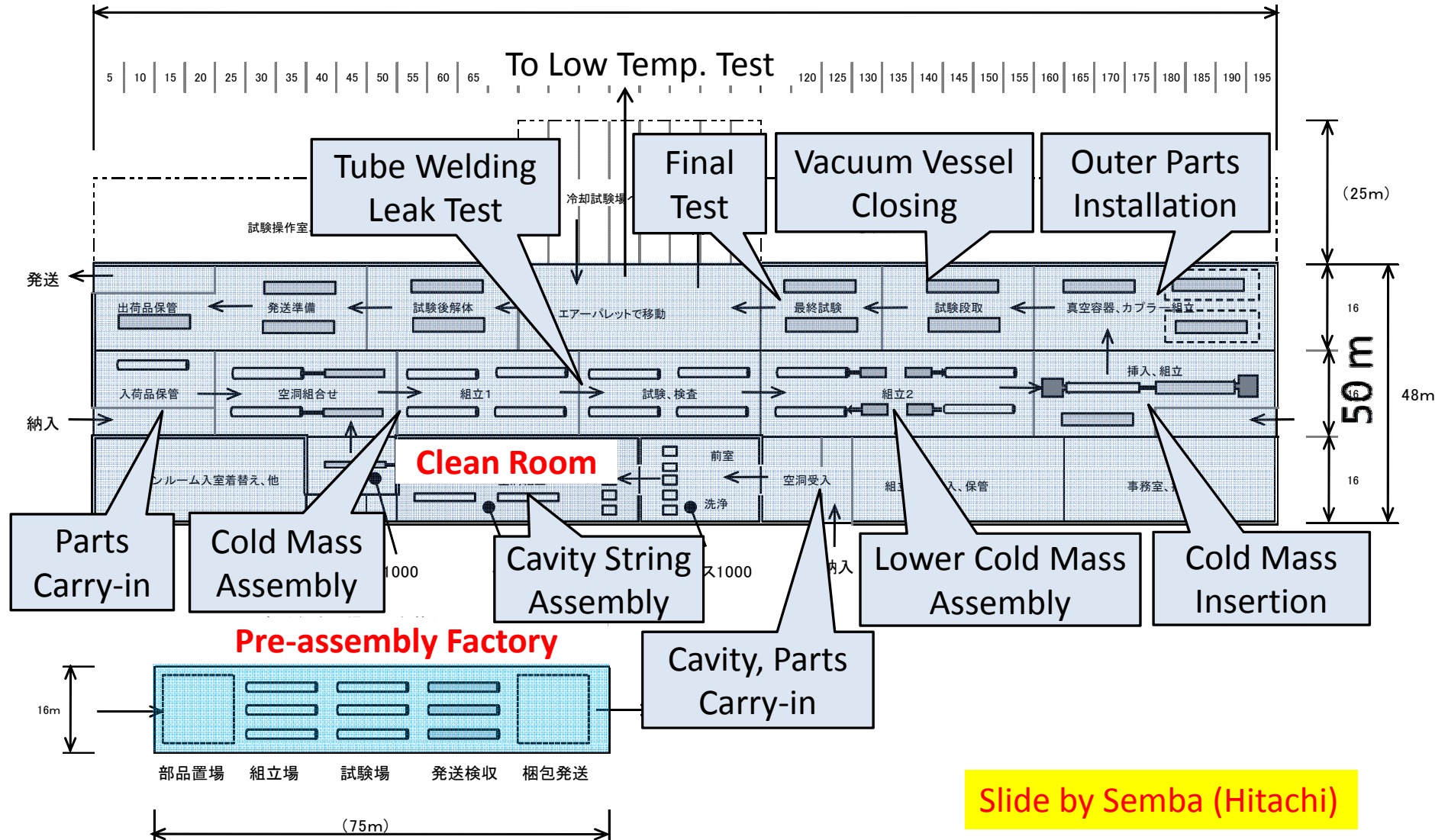
Assuming that final treatment and vertical test will be done in other place.

日本におけるクライオモジュール 組み立て工場の設計検討

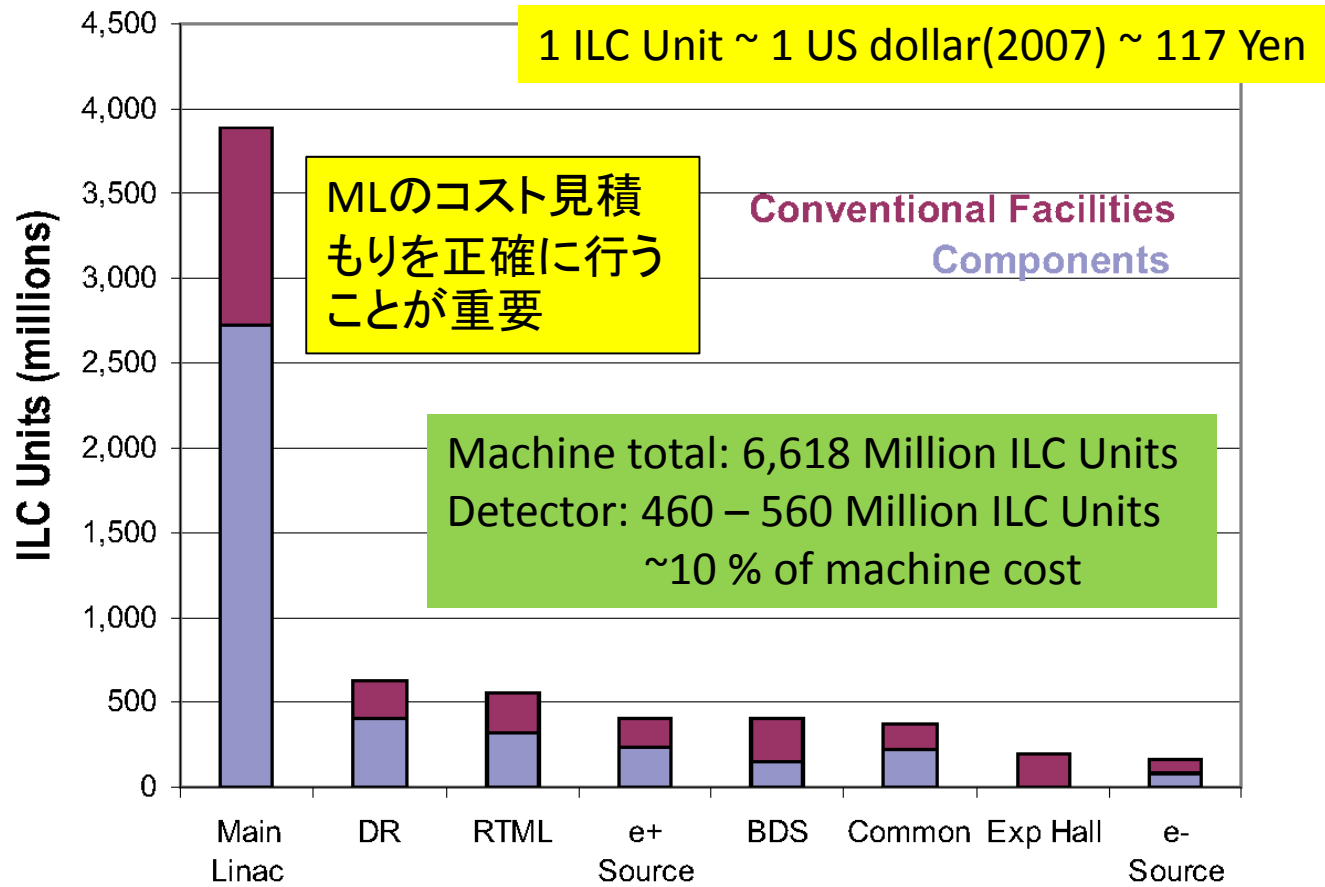
Day shift only

200m

条件： 昼勤務のみで月産7台を想定



ILCのコスト内訳 (RDR 2007)



SB2009 では、ダンピングリング周長を半分にし、トンネルを2本から1本にするなど、かなり大胆な設計変更をした結果、13%のコスト削減を行った。

ILC GDE Project Manager の展望・見解

- **超伝導加速空洞技術開発：**
 - 全世界的協力で着実に進展。性能達成率 **>50%** を実現。
 - 運転加速電界: **~90 % x 31.5 MV/m(@ RDR)** を前提とすれば、工学設計(TDR) 完成後、加速器建設を受けて立てる。
- **建設コスト (Cost Containment) :**
 - 2009年の設計改訂(SB2009)にて、既存技術部分でコスト節減を計った意味は大きい。
 - ILC加速器全体として、RDR で提案した建設予算内に保つ見通しを得つつある。
 - 更なるコスト節減にむけ、特に超伝導加速空洞工業技術への取り組みを強めている。

Summary (1/2)

- 超伝導空洞の製造受け入れ性能(>35MV/m)の歩留まり目標90%に対し、現在の世界平均は55%程度である。しかし、良い空洞製造会社と良い処理方法を選べば、既に90%に到達している。

- 空洞の生産台数

XFEL: 760台/2年

Project X: 360台/5年

ILC: 17000台/6年 桁違いの生産台数だが、製造期間は6年と長い。

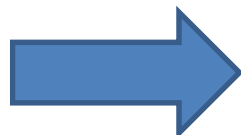
- さらに、Multi-vendor model を仮定すれば、せいぜいfactor 2-3 の規模拡張でILCに対応できる。実際には既に製造会社は9社が存在している。各製造会社は、factor 2-3 程度の規模拡張は問題なく可能。

- Hub-laboratories の施設も同様に拡張が必要。

EU: DESY + Saclay + CERN

USA : FNAL + Jlab

Asia : KEK



EUとUSAでは、潜在的に既にILCの量産に対応できるHub-laboratories を持っている。Asiaにおいては、KEKがHub-lab. となるために、EUやUSA並みの設備投資が必要であり、設備の設計準備を進めている。

Summary (2/2)

- ILC超伝導Main Linacの目標運転性能は31.5 MV/mである。日本で2010年に行われたS1-Global試験(DESY空洞2台, FNAL空洞2台, KEK空洞4台)で運転性能 = 26MV/m(空洞7台の平均)を達成した。
- ILCのコストは、約59%がmain linacのコストである。Main linacの主要素である超伝導空洞の生産が見積もり通りに行えるかがILC建設において重要。KEKにおいて、空洞の生産コスト削減の研究が着実に進行中である。
- ILC GDE project managers による建設コストの展望
 - 2009年に行った設計改訂(SB2009)によるコスト節減を計った意味は大きい。全体として、ILC加速器全体でRDRで提出した建設予算内に保つ見通しを得つつある。
 - 更なるコスト削減にむけ、特に超伝導加速空洞工業技術開発への取り組みを強めている。