

ILC加速器と超伝導加速器技術

山本 明

KEK & ILC-GDE

@ 京都大学, 2012-2-28

世界の加速器の進展と 5大加速器研究所

世界最高エネルギー・最高強度の電子・陽電子コライダー
国際協力で建設を計画中

リニアコライダーILC

2009 LHC

LEP

HERA

SLC

テバトロン

1987 トリスタン

1989

陽子シンクロトロン

1950 電子シンクロトロン

シンクロサイクロトロン

1940

ベータトロン

1930

サイクロトロン

静電型加速器

12-02-28, A. Yamamoto

SLAC@スタンフォード

KEK@つくば・東海村 (JAEAと共同)

KEKB, J-PARC
強度フロンティア
超伝導加速器開発

PEP-II(B-Factory)終了
>> 放射光施設へ

CERN@ジュネーブ

LHC
陽子 最高エネルギー

DESY@ハンブルグ

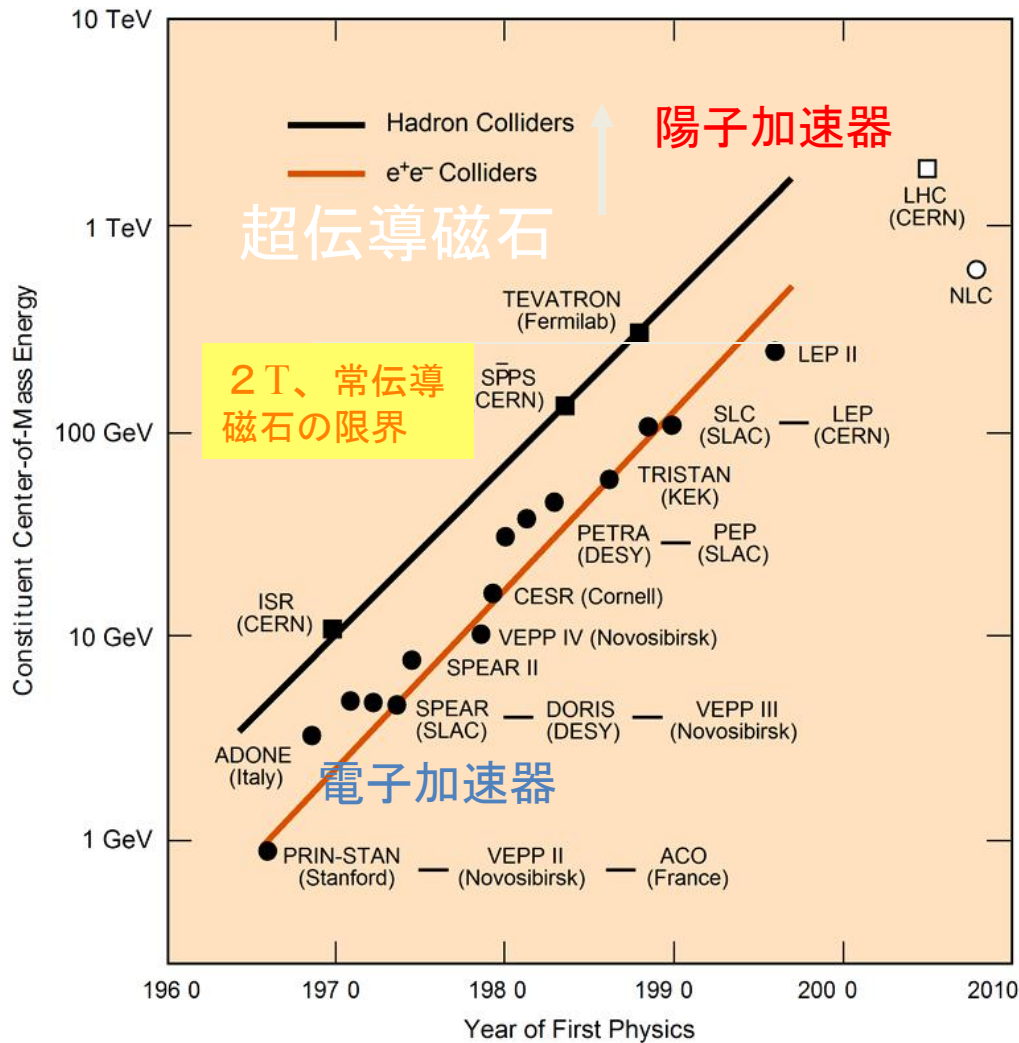
HERA(電子・陽子)終了
>> 放射光施設へ
(超伝導加速器)

FNAL@シカゴ

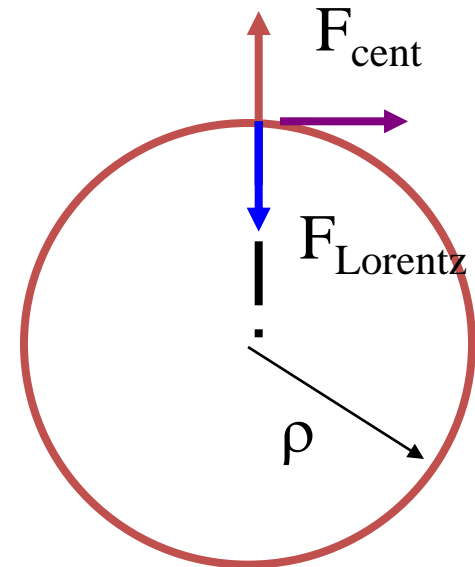
TEVATRON 終了
2010秋
超伝導加速器開発
大強度陽子、他へ

ILC Accelerator
PETRA

粒子加速器エネルギーの進展



- 高エネルギー加速器では超伝導技術が不可欠



$$p = q \cdot \rho \cdot B$$

P [TeV/c] = 0.3 · ρ [km] · B [Tesla]

- High Magnetic Field required

粒子加速器のエネルギーフロンティアを担う 超伝導技術

加速器に使われる超伝導技術

超伝導磁石:

強いDC磁場: 加速粒子の軌道を曲げる
偏向磁石、収束磁石、測定器ソレノイドなど



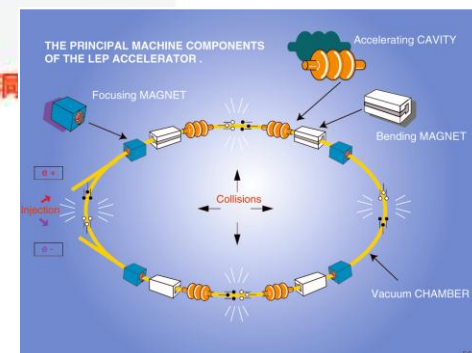
超伝導高周波空洞:

空洞共振器が作る高周波電磁場:
粒子に電圧を与える唯一の装置
加速空洞、クラブ空洞、
高周波セパレーターなど

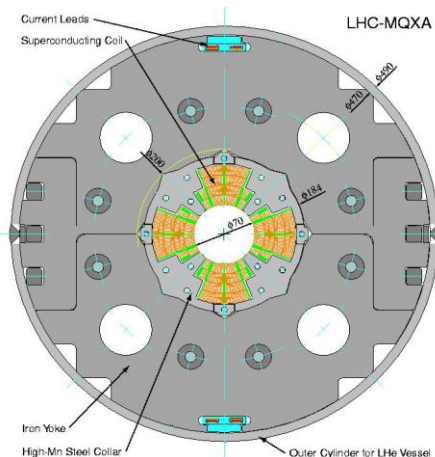
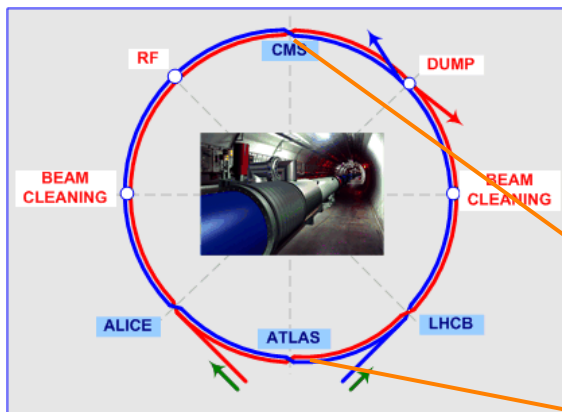


KEK-ERL 9連空洞

• 先端加速器の鍵を握る基盤技術

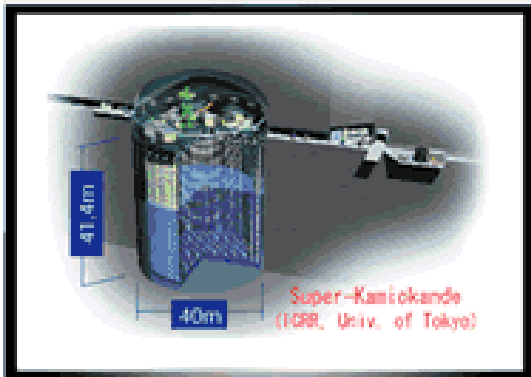


CERN-LHC ビーム衝突点収束磁石 KEK-Fermilab Collaboration



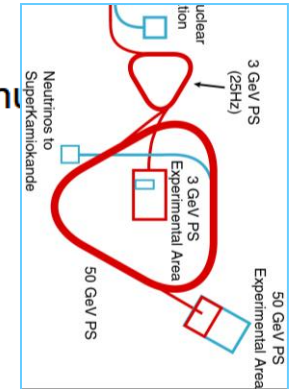
衝突点ビーム収束磁石：日本のLHC建設貢献
日(KEK)、米(Fermilab)間の国際協力

J-PARC ニュートリノ振動実験 超伝導一次陽子ビームライン・ (2009~)



Super-K: 50 kton
Water Cherenkov

~Mt "Hyper
Kamiokande"

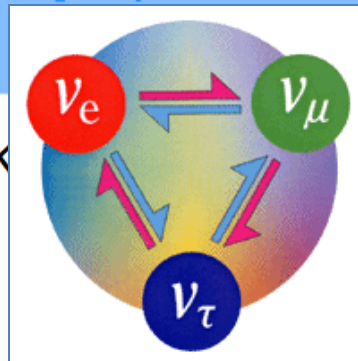


0.75 MW 50 GeV PS

4MW 50GeV PS



Approved exp ($\times 10^2$ of K2K)

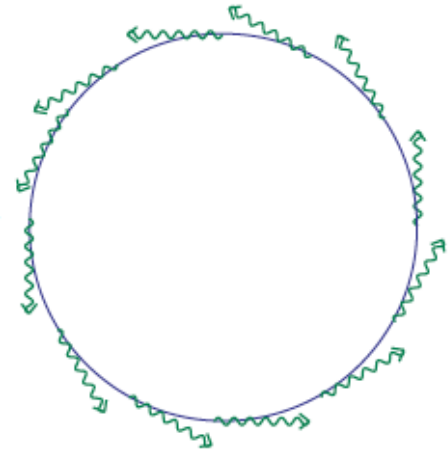


円形コライダーの限界、 リニアコライダーへの展開

- エネルギー増加は年代に対して指数関数的
- しかし、1980年頃を境にしてエネルギー増加がゆるやかになる
- 高エネルギー電子は円軌道上でシンクロトロン輻射を出してエネルギーを失う
- 一周のエネルギー損失

$$\frac{(\text{エネルギー})^4}{(\text{軌道半径})}$$

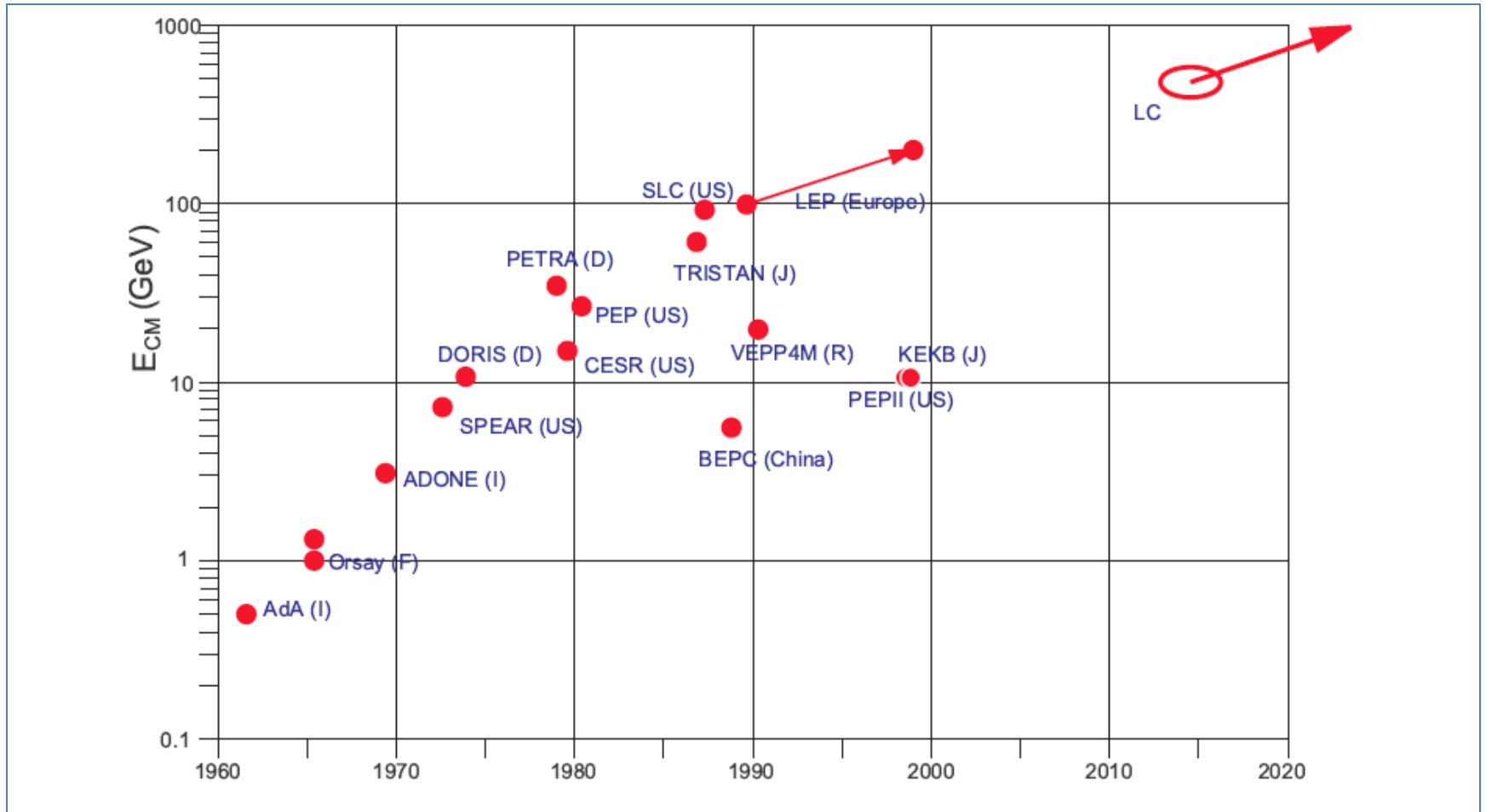
- 最大の e^+e^- Collider **LEP** (CERN) は約200GeVを達成
- しかし、LEPはすでに一周27km、より高いエネルギーは不可能



⇒ 直線的 Collider



e+e-コライダーの歴史

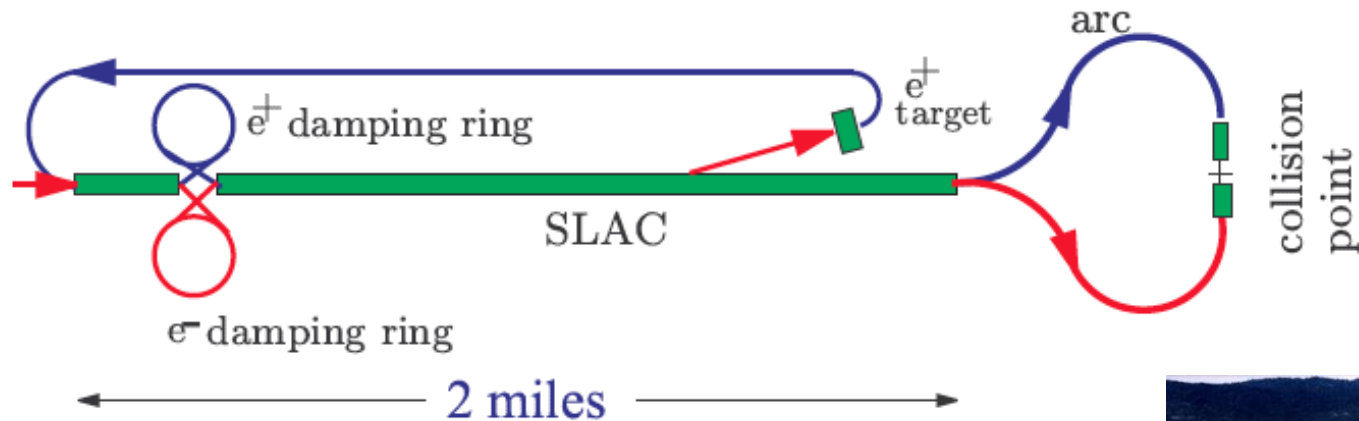


リニアコライダーへの道

Single pass ⇒ 技術的にむずかしい

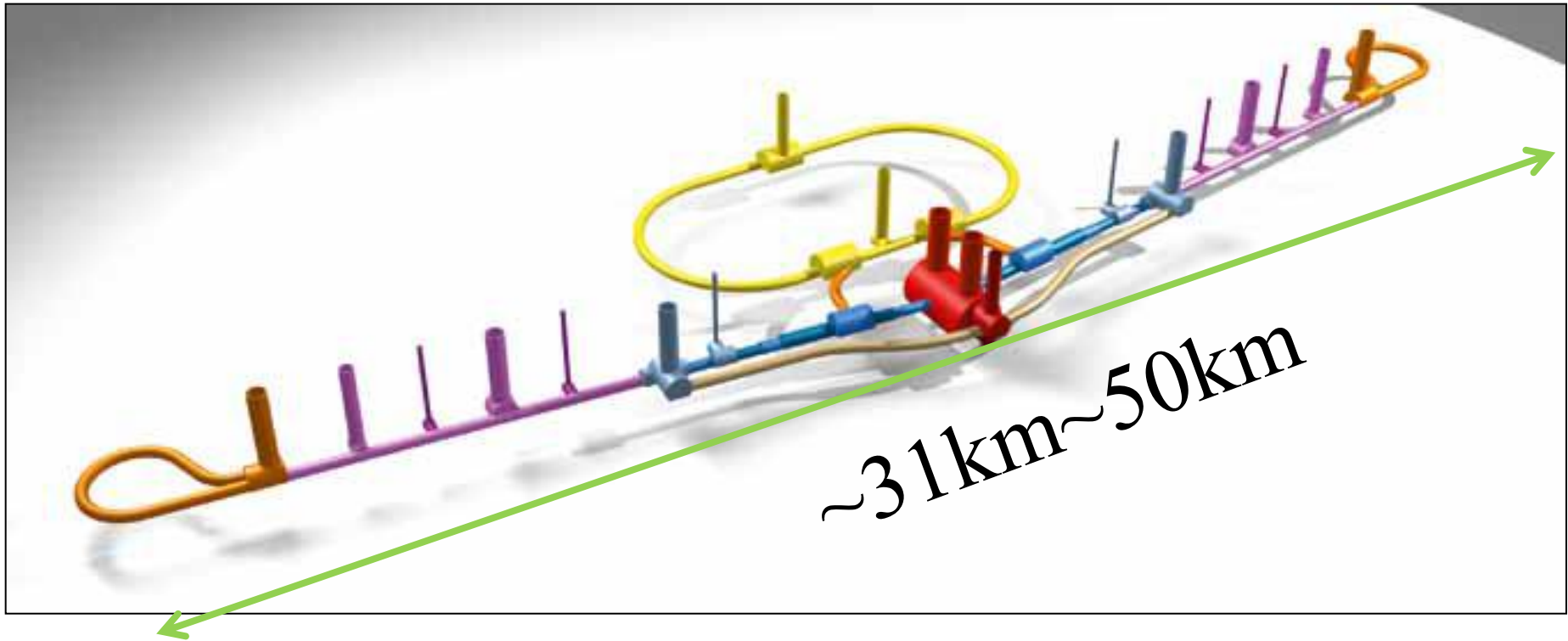
- 各粒子を1度しか加速しないので、単位長さあたりの加速（加速勾配）が大きくなる
 - いろいろな加速方式（レーザー、プラズマ、など）が考案されたが
 - 結局（少なくとも次世代までは）今までの方式しか現実的でない
- 各粒子が1度しか衝突に参加しないので、ルミノシティを上げるためには、衝突時のビームサイズを極端に小さくする必要がある
 - リングの場合は何回も回る間に衝突する

The first HE e+e- Linear Collider : SLC at SLAC (1988~)



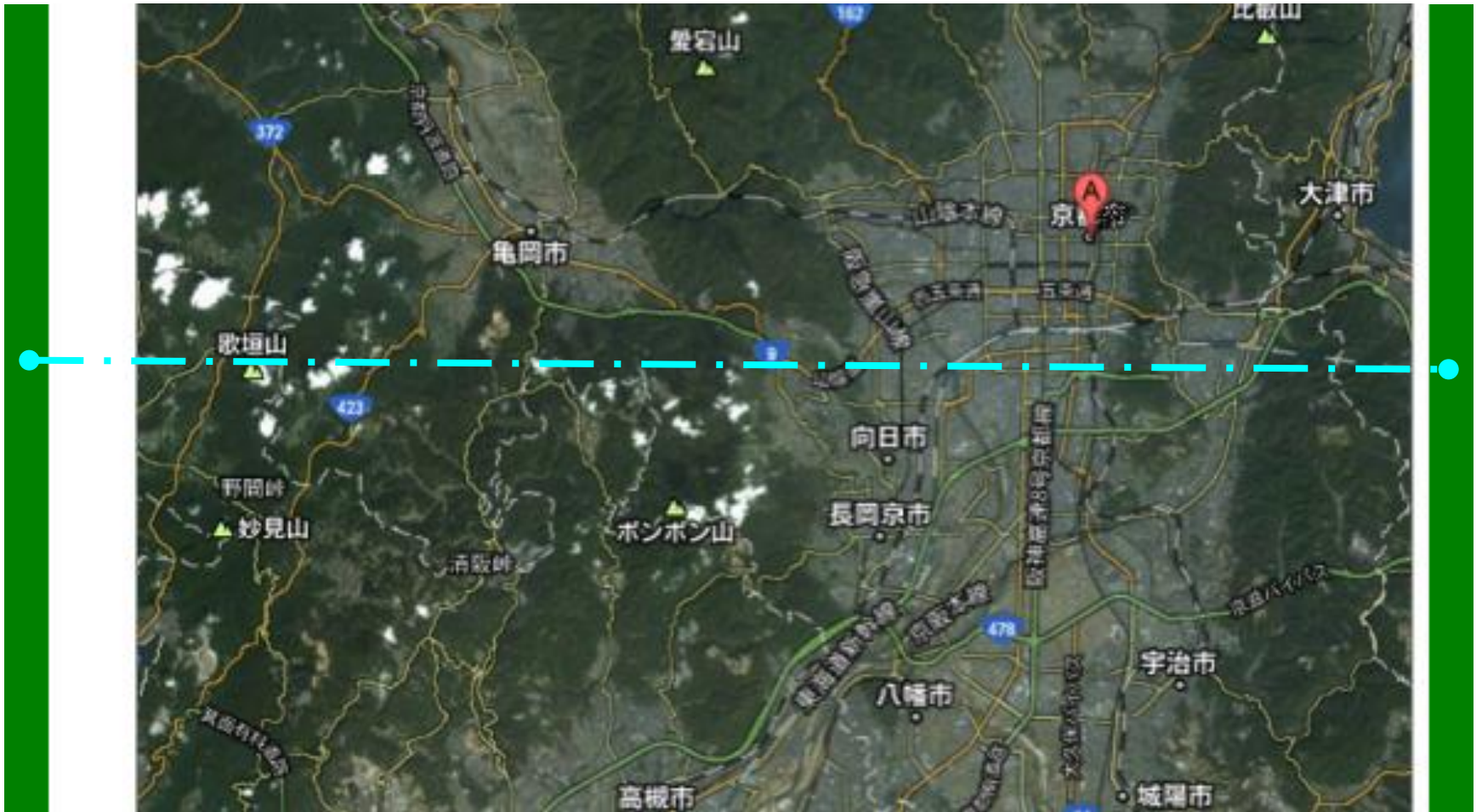
- Linacは1本のみ
- 加速後曲線軌道を通して衝突させる
- $50+50=100\text{GeV}$ 程度までならこれで可能
- Z^0 の高い断面積のおかげで物理になった
- これ以上のエネルギーでは曲線部でのsynchrotron 輻射が無視できない

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



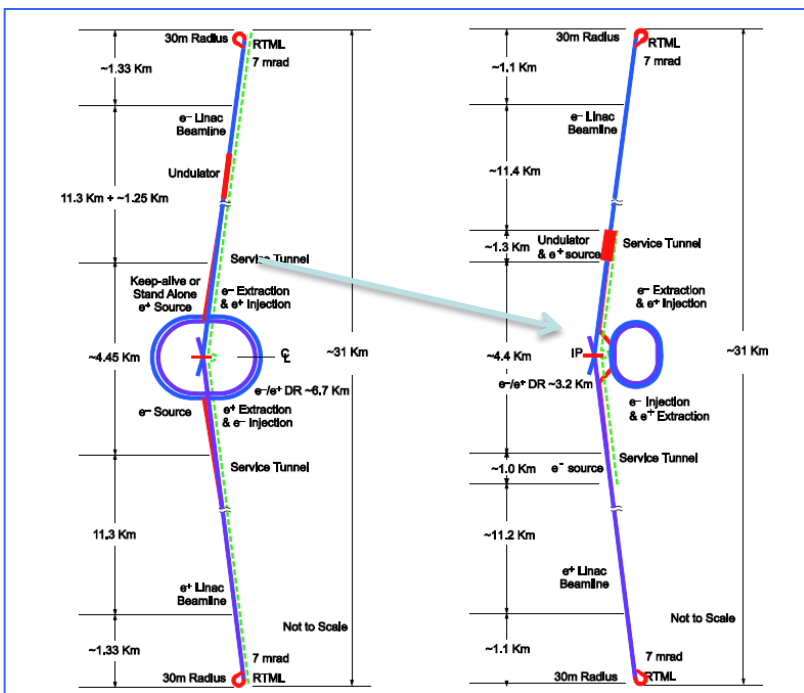
第一期 ~250GeV~500GeV (全長約31km)
第二期 ~1TeV (全長50km)

ILC scale in Kyoto





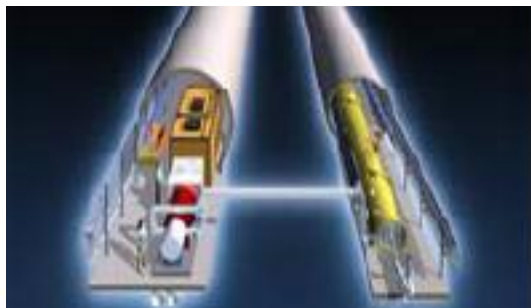
ILC-GDE: 技術設計の進展



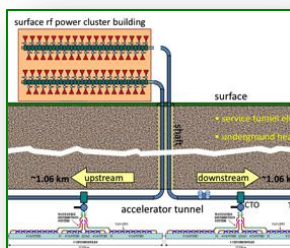
『性能／コスト』の最適化

- シングルトンネル化
 - ダンピングリング小型化
 - 陽電子生成標的@中央部
 - 空洞電界分布: 31.5MV/m+/-20%
 - クライストロン配置: 集中／分散
- 効率的な加速器設計

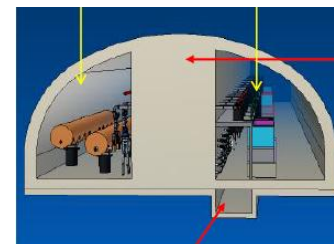
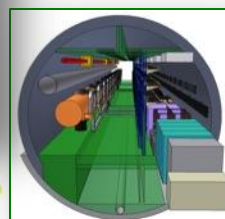
RDR2007



SB2009



→ TDR w/ mountain site



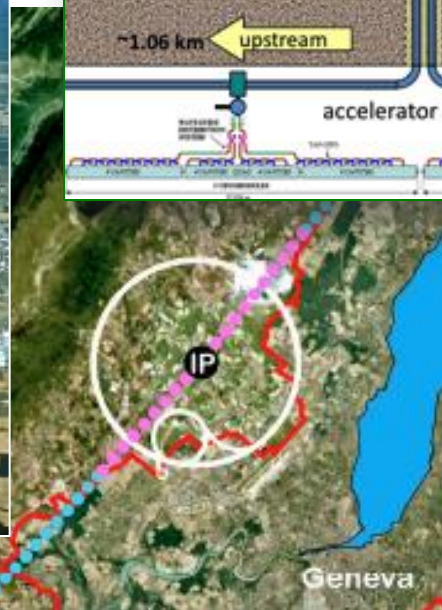
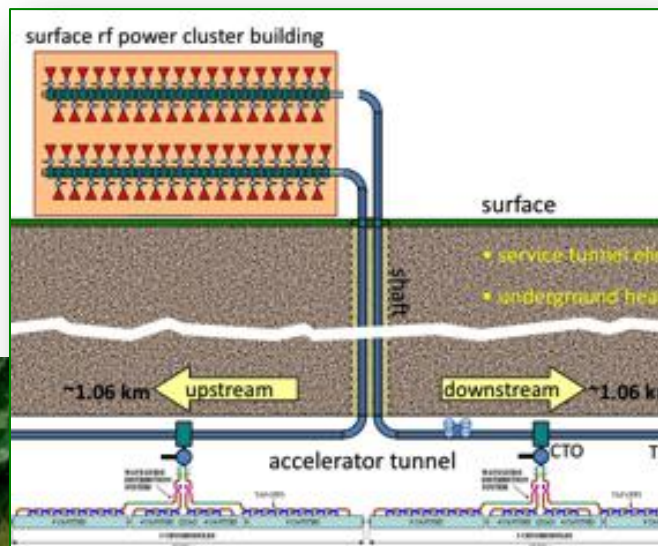
12-02-28, A. Yamamoto

ILC Accelerator



平坦地でのトンネル構成(案)

クライストロンクラスター方式



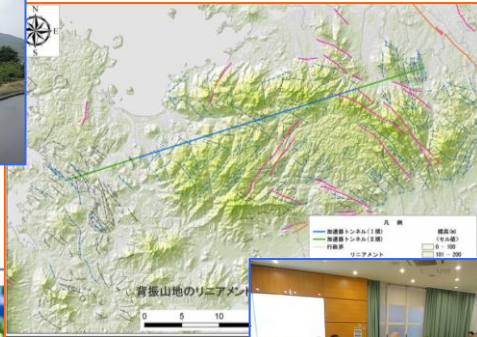


日本における候補地・地質調査の進展

- Japanese Mountainous Sites -



SEFURI



KYUSHU district

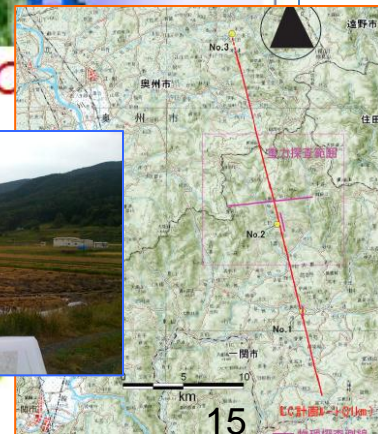


Tokyo

Site-A KITAKAMI



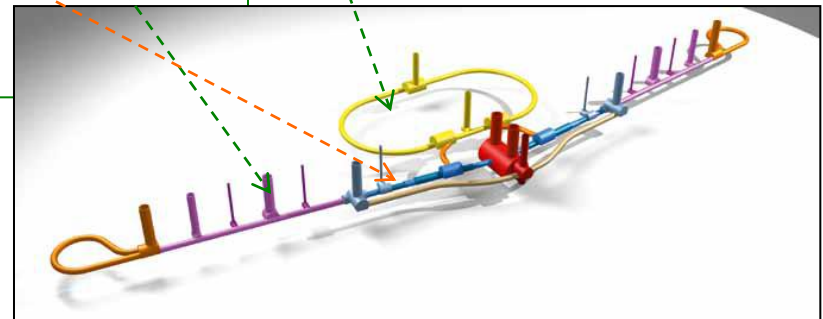
TOHO



九州、東北両地域での大学、自治体の皆様による地質調査へのご協力に感謝。

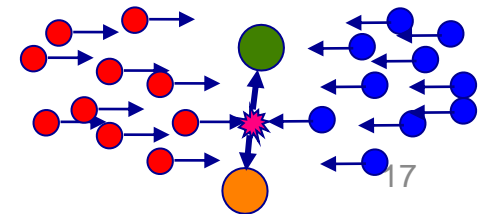
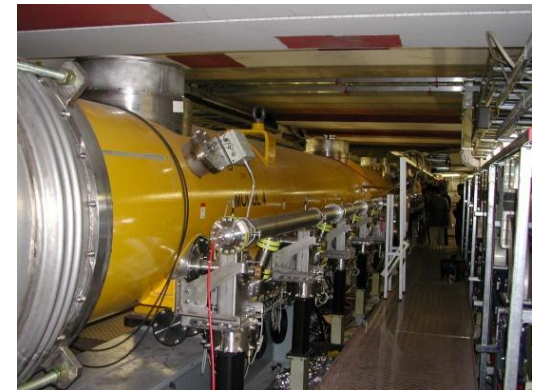
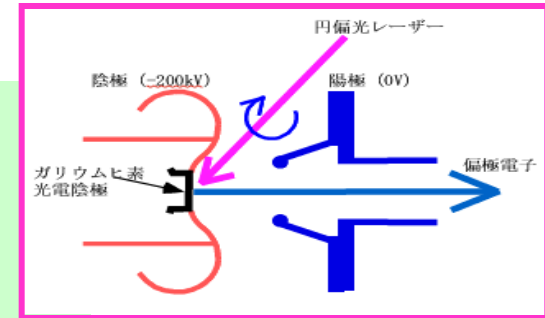
ILC の構成

5GeV Linac	電子・陽電子の前段加速器
DR	減衰リング (エミッタンスの小さいビームを作る) 周の長さ 6.6km、全部で3つのリング
SR	Spin Rotator (Spinの向きを調整する)
BC	バンチ長圧縮器 (バンチ長を短くする) 長さ各 1.4km
Undulator	アンジュレータ (電子を使って陽電子を生成する) 前後を含めて 1.2km
ML	Main Linac (加速) 各 11km (500GeV)、20km (1TeV)
BDS	Beam Delivery Section (コリメータ、最終収束) 合計 5.5km
IP	Interaction Point (衝突点)



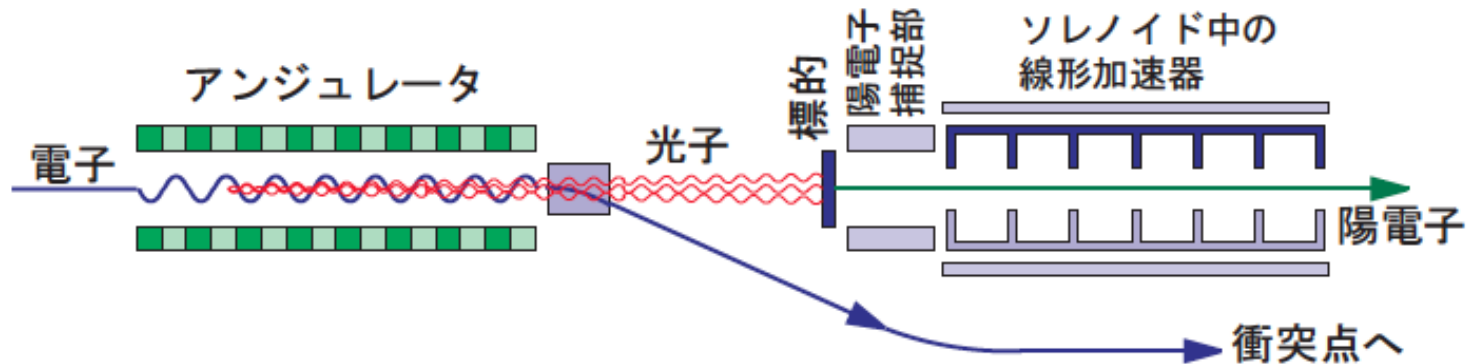
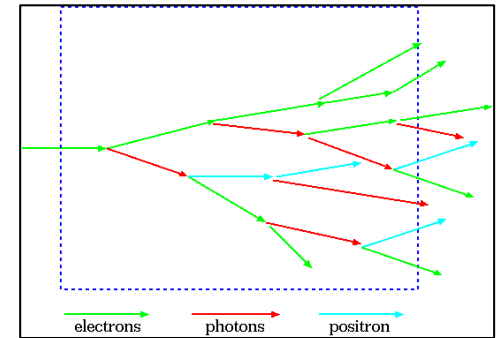
リニアコライダーのキーテクノロジー 100億個の電子と陽電子の塊(バンチ)を

- 生成する
 - 偏極電子, (偏極)陽電子
- 加速する
 - 超伝導加速空洞による高電界加速
- 衝突させる
 - ナノメートルビームの生成・制御

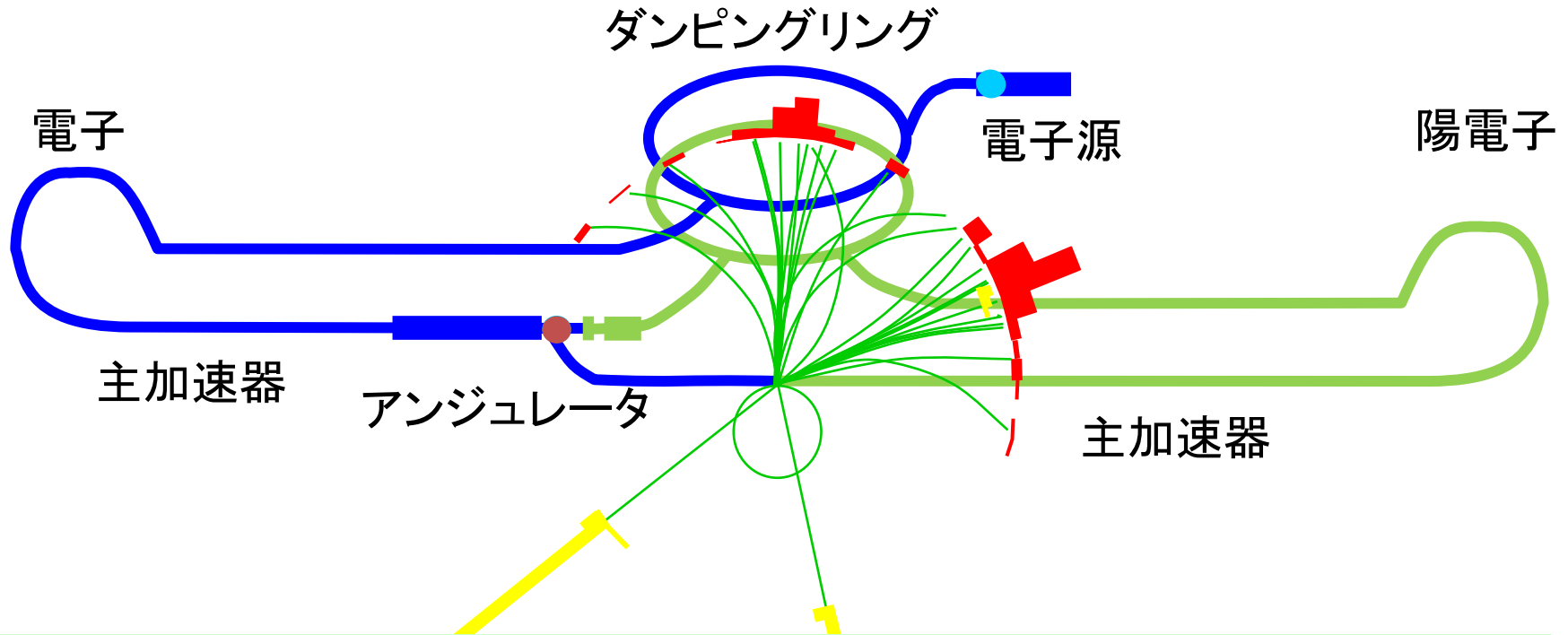


陽電子の発生

- 高エネルギー電子 ($\geq 100\text{GeV}$) を蛇行させる (アンジュレータ磁石)
- 電子が数 10MeV の光子を発生する。
- 光子を標的にあてる。
- 発生した陽電子を回収して加速する。
- ヘリカルアンジュレータを使えば偏極陽電子が得られる。
- この方式はまだ実用されたことがない。
- 電子側が運転されていない時は、陽電子の **tuning** ができない



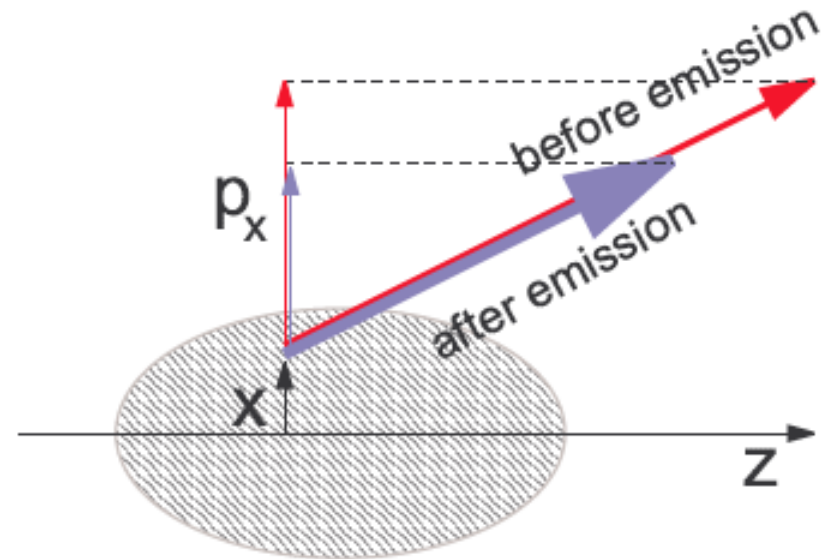
ILC Positron Source (アンジュレーター方式)



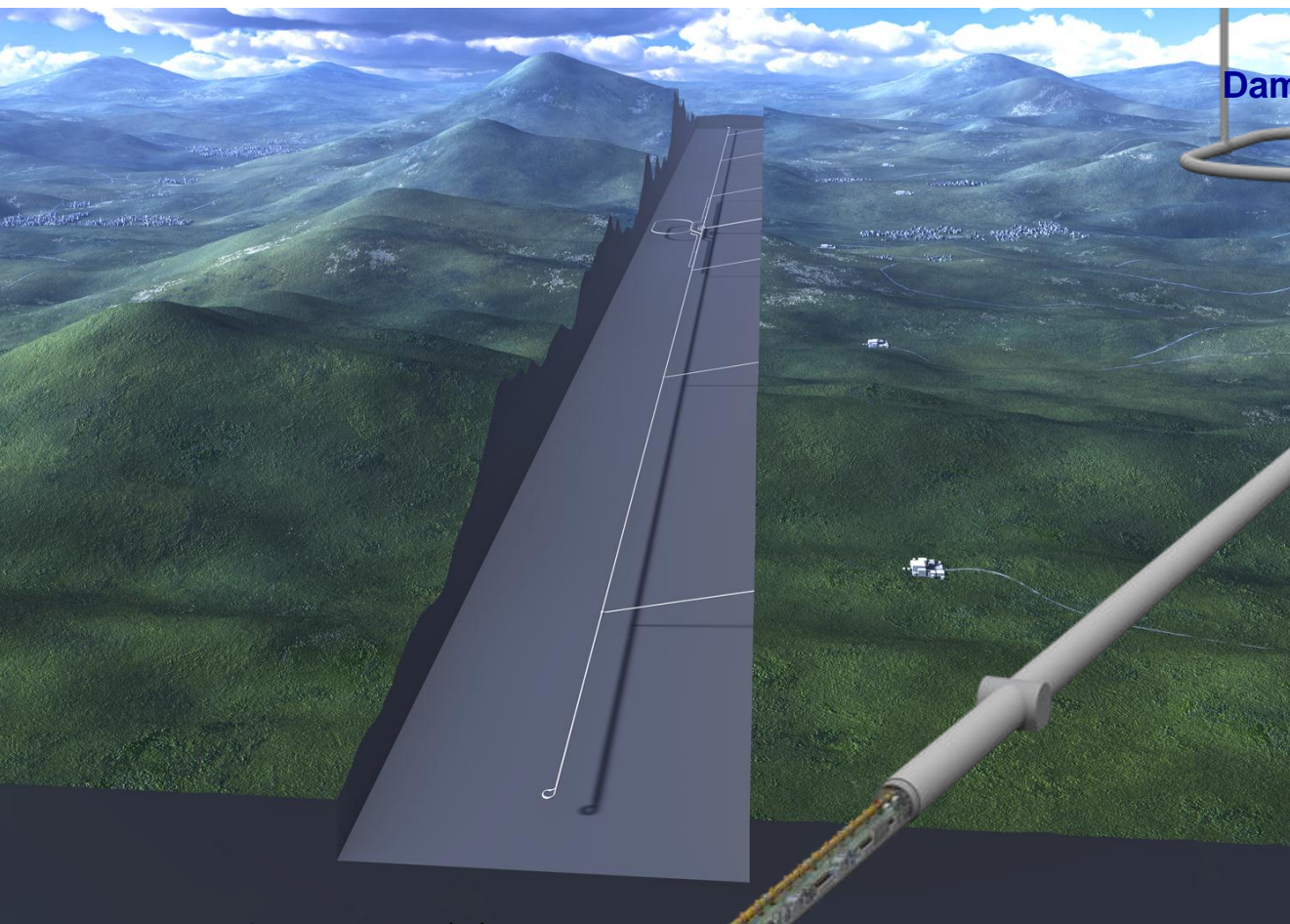
- ILCではアンジュレーターで陽電子をつくる。
- しかしわざわざ陽電子生成のためだけに100GeV以上の高エネルギー電子ビームをつくるのは効率的でない。
- そこで、物理衝突実験のためにつくった電子ビーム(250GeV)を利用して、陽電子も作ってしまう。
- つくられた陽電子は次回の衝突で使用する。

Damping Ring: エミッタンスを減少

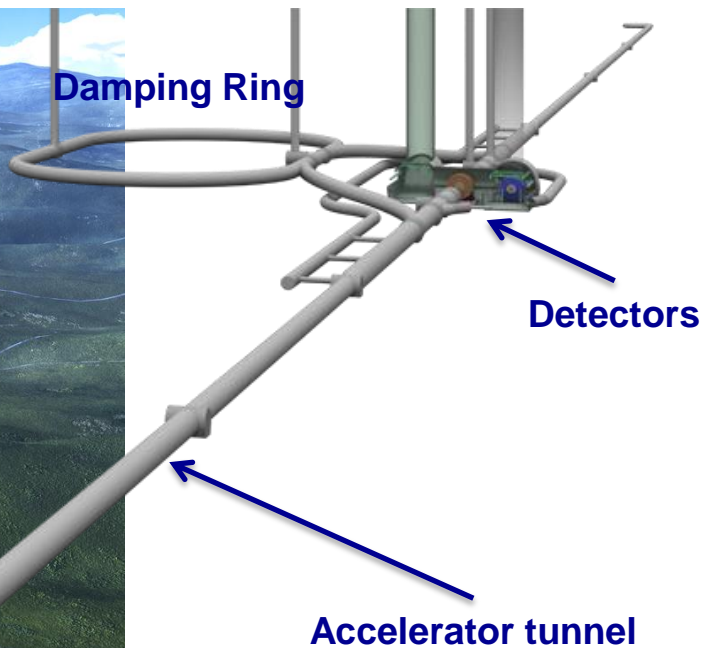
- シンクロトロン輻射は悪いことばかりではない
 - 1 粒子の輻射電力 \propto (粒子エネルギー)²(磁場)²
 - 高エネルギー粒子ほどエネルギー損失が大きい \Rightarrow エネルギー幅の減少
- エミッタンスも減少する
 - 輻射によって p_x , p_z が同じ割合で減少
 - p_z の減少は加速によって補われる
 - 輻射の瞬間に位置座標は変らない \Rightarrow エミッタンス減少



ILC : 主線形加速器



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

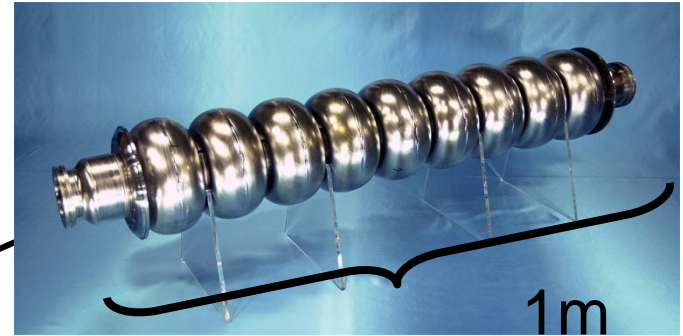
of MB-Klystron: 560 total

of Cryomodules : 1680 total

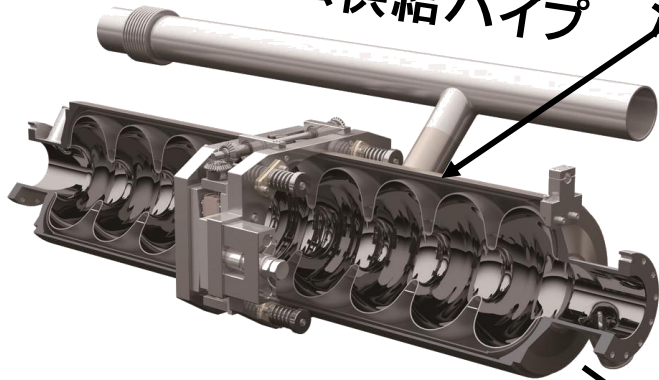
of Cavities : 14560 total

高周波加速装置

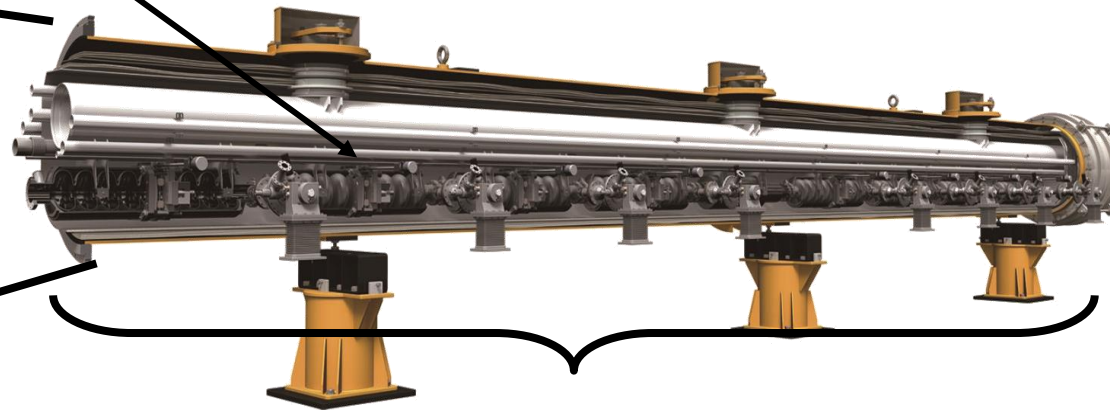
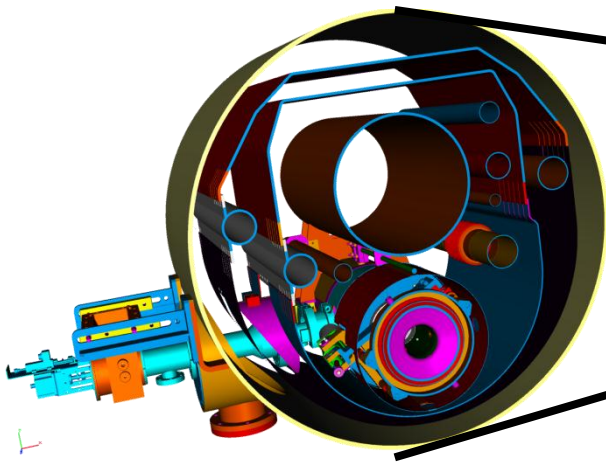
液体ヘリウム供給パイプ 液体ヘリウム容器



~8000台/beam



~900台/beam



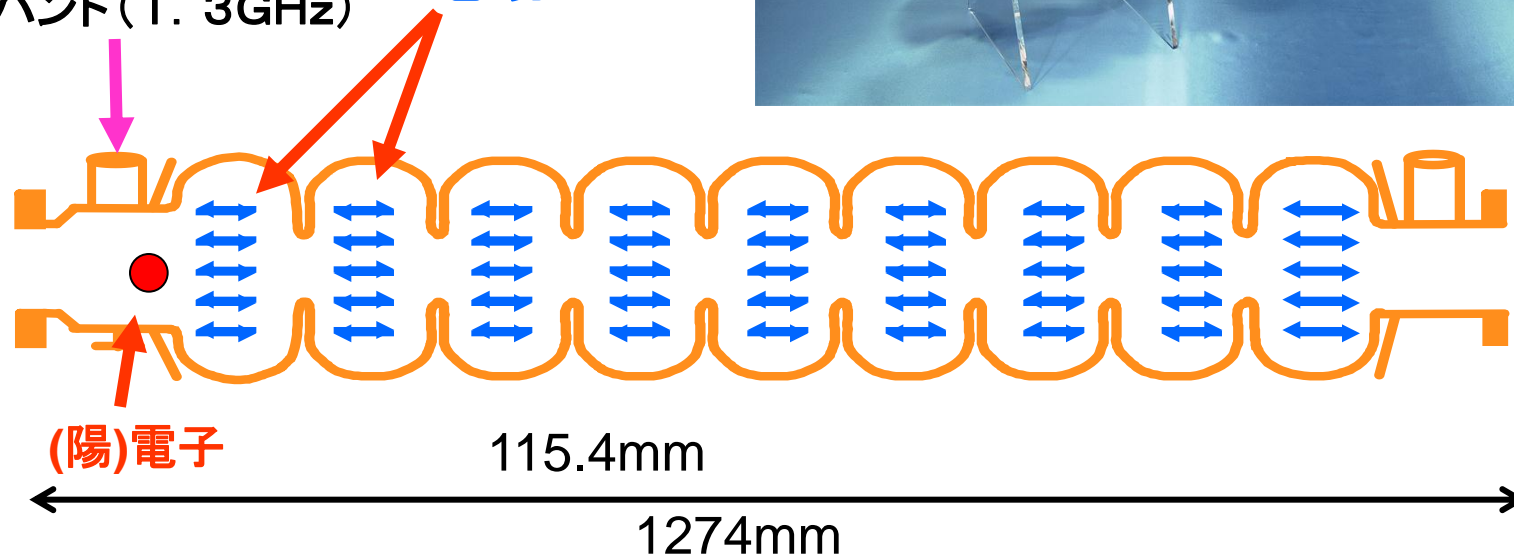
12m

加速の方法



高周波電力:
Lバンド(1.3GHz)

電場



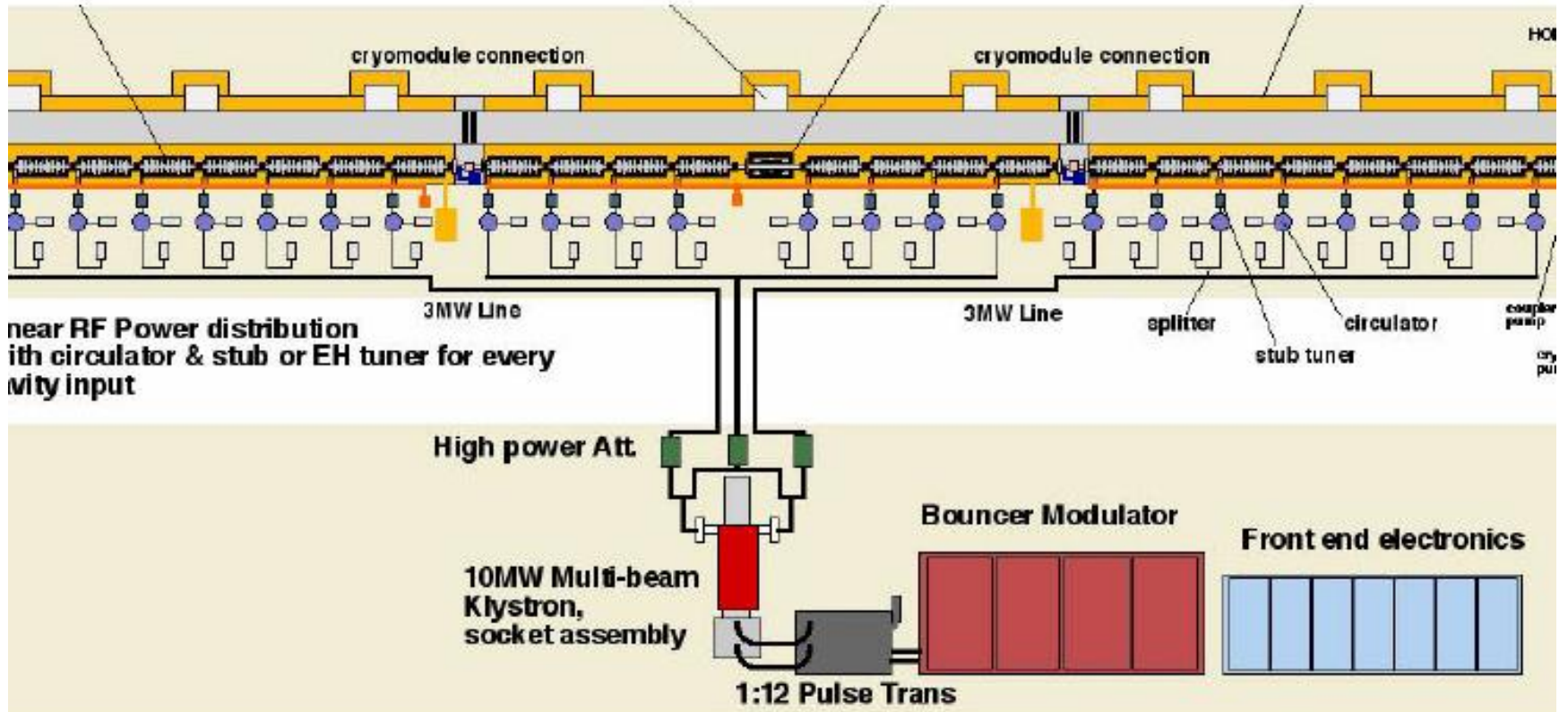
加速度 = 電場強度

ILCは $\sim 30\text{MV/m}$ (0.03GV/m)

超伝導加速空洞

エネルギー効率が高い

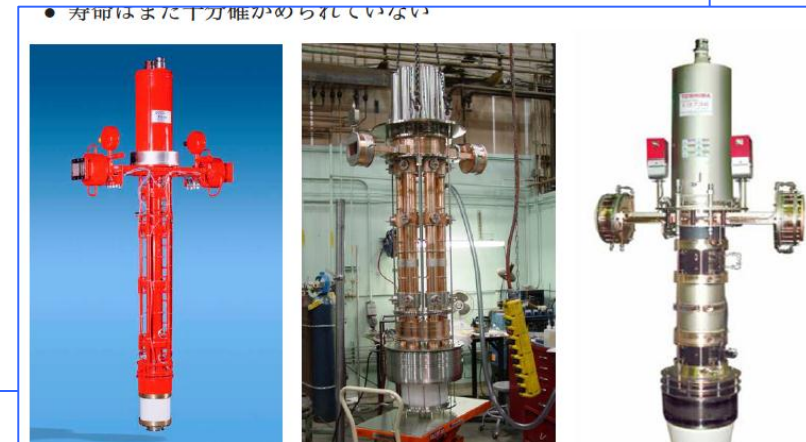
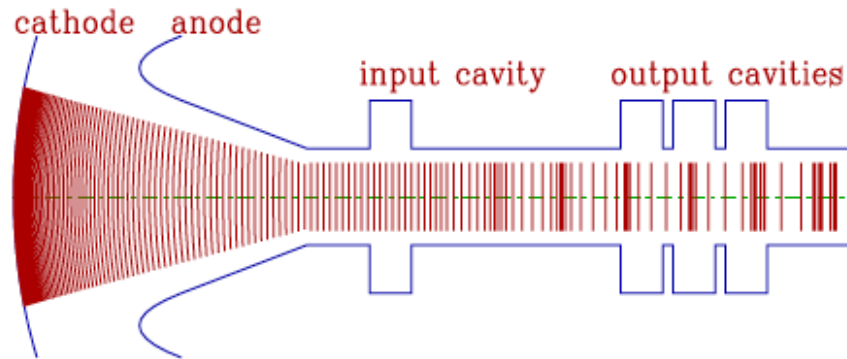
主線形加速器



ILCの主線形加速器 1 単位

Klystron: 高周波電力の供給

- 直流電圧からマイクロ波を発生する装置
- 熱陰極の直流電圧（パルス）をかけ、電子を発生する
- 弱い入力波で、速度変調をつける
- 適当な距離を走らせると密度に濃淡ができる
- 出力空洞にマイクロ波が発生する
- ILCでは、複数のビームを用いるMBK (Multi-Beam Klystron) を使う。



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

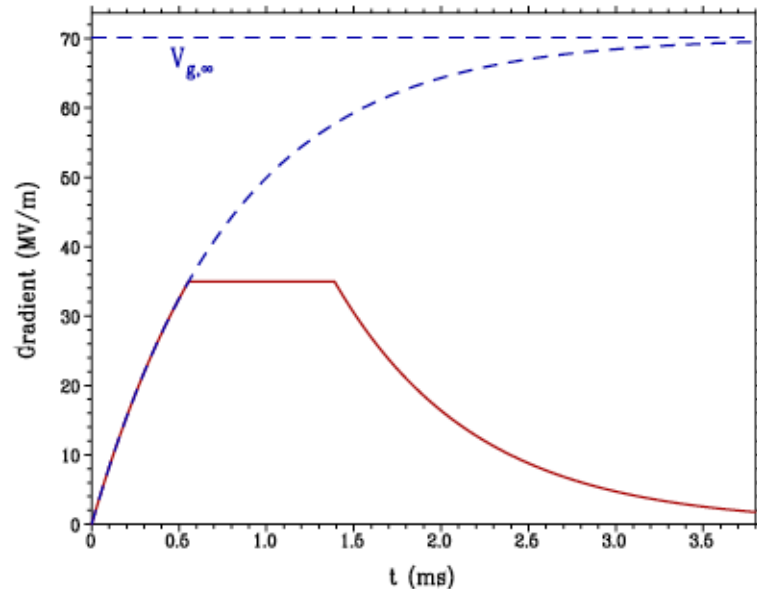
中心軸上にできるのが電場
この電場で粒子を加速する。

大電力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

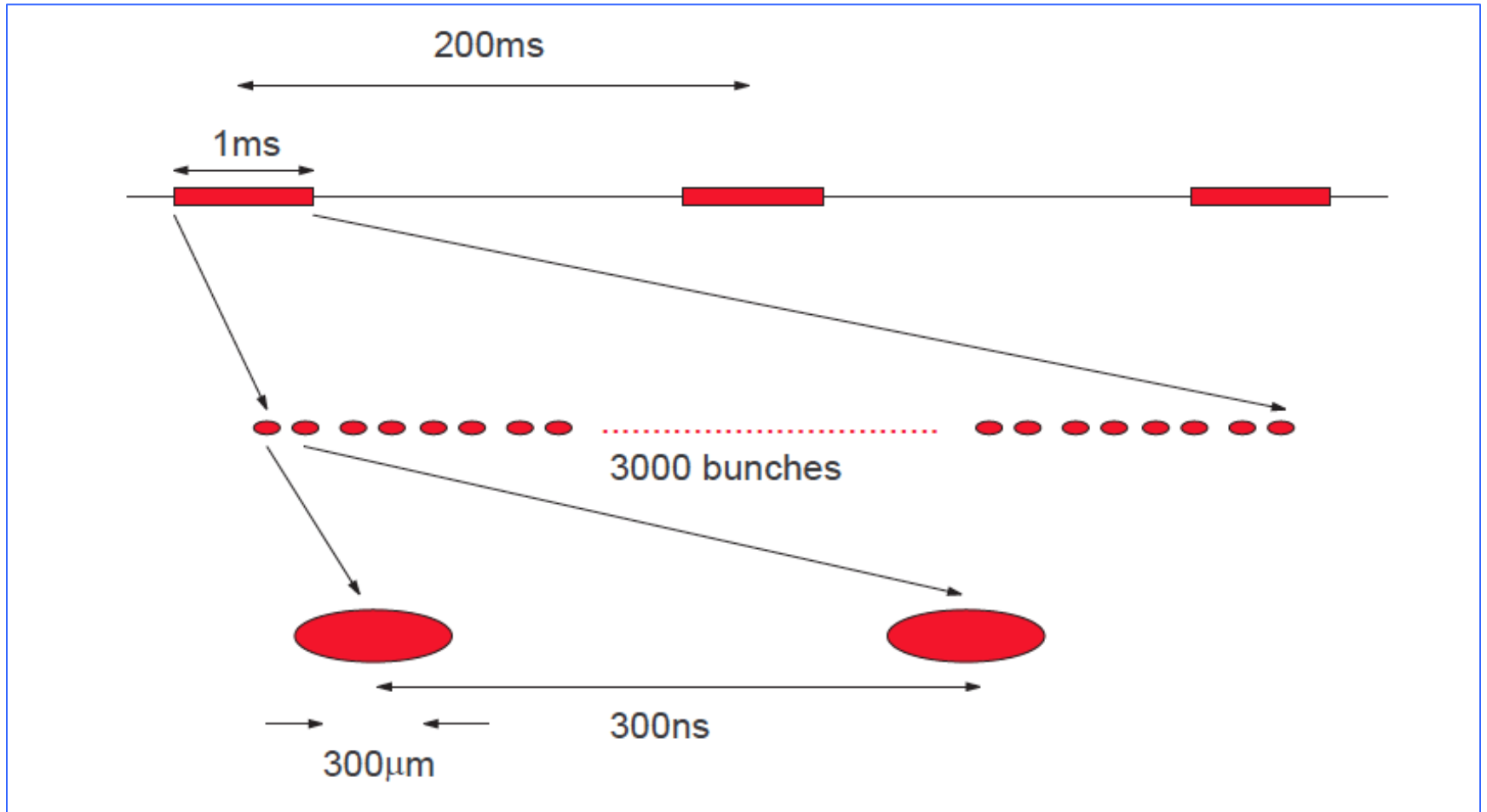
Filling and Loading Pattern

- 空洞をマイクロ波で満たすには時間がかかる
- 矩形波を入力すると空洞電圧は指数関数的に上昇する
- あるタイミングである強度のビームを入射すると、ビーム通過中、加速電圧が一定になる。
(加速電圧= V_{∞} なら無反射)
- ビーム通過が終わると同時にマイクロ波入力を止める
- 以後が指数関数的に減衰する。
(大部分は反射、一部は壁面を過熱)
- 常伝導と超伝導の決定的な違いは時間のスケール
常伝導： $\text{O}(100\text{ns})$ ，超伝導： $\text{O}(1\text{ms})$
- したがって、超伝導ではビームが長い

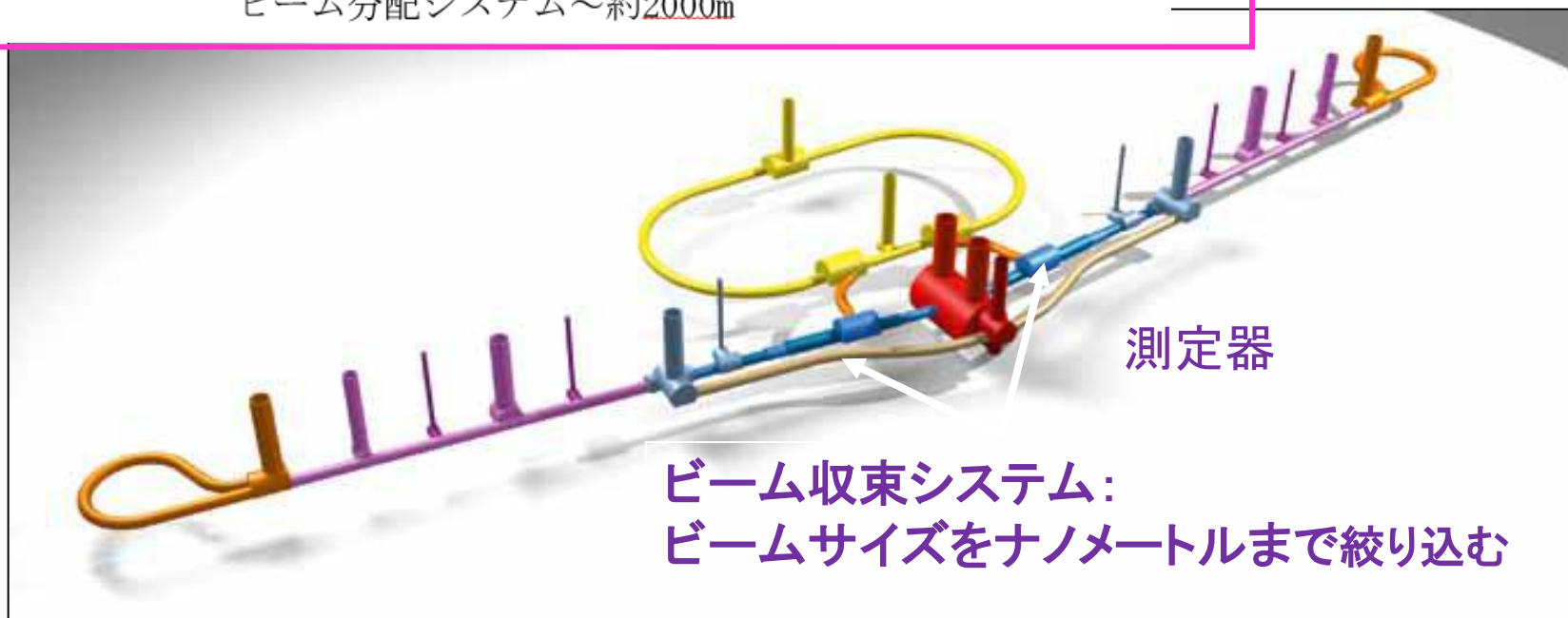
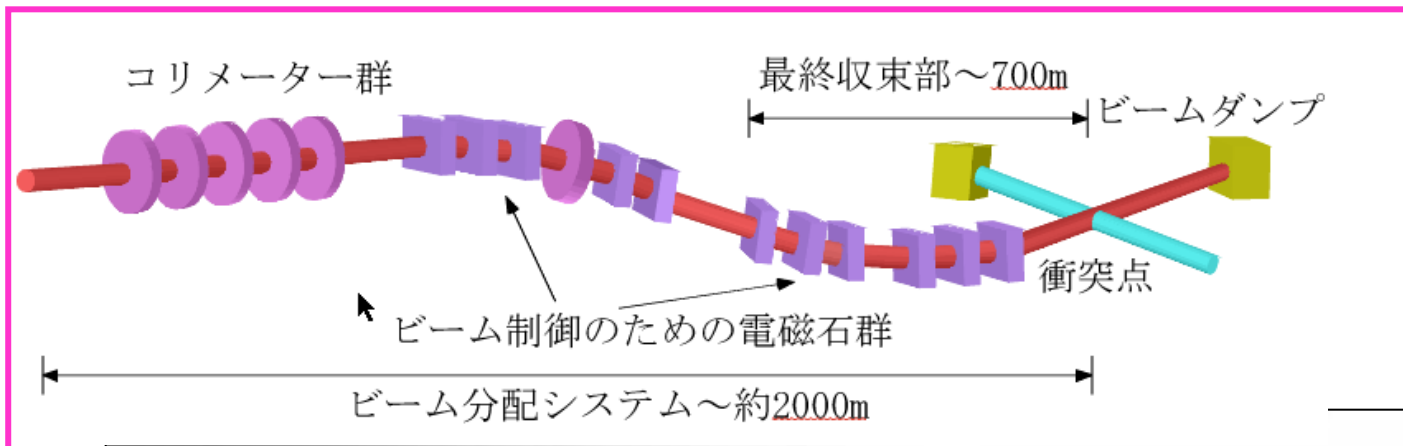


ビームの時間構造:

RFパルス: 1ms, ~3,000 バンチ、繰り返し: 5Hz



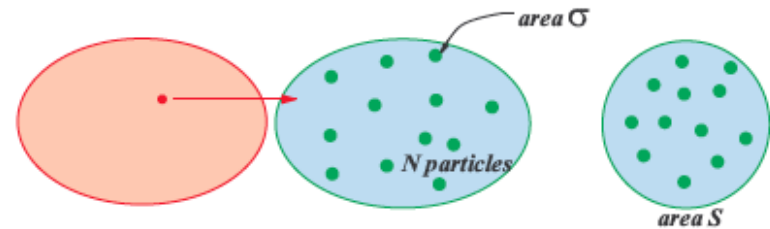
リニアコライダー衝突点でのビーム収束



Luminosity

赤粒子がどれかひとつの緑粒子と当る確率

$$\frac{N\sigma}{S}$$



1秒間の事象数を出すには次の量をかける

N 赤バンチ中の粒子数

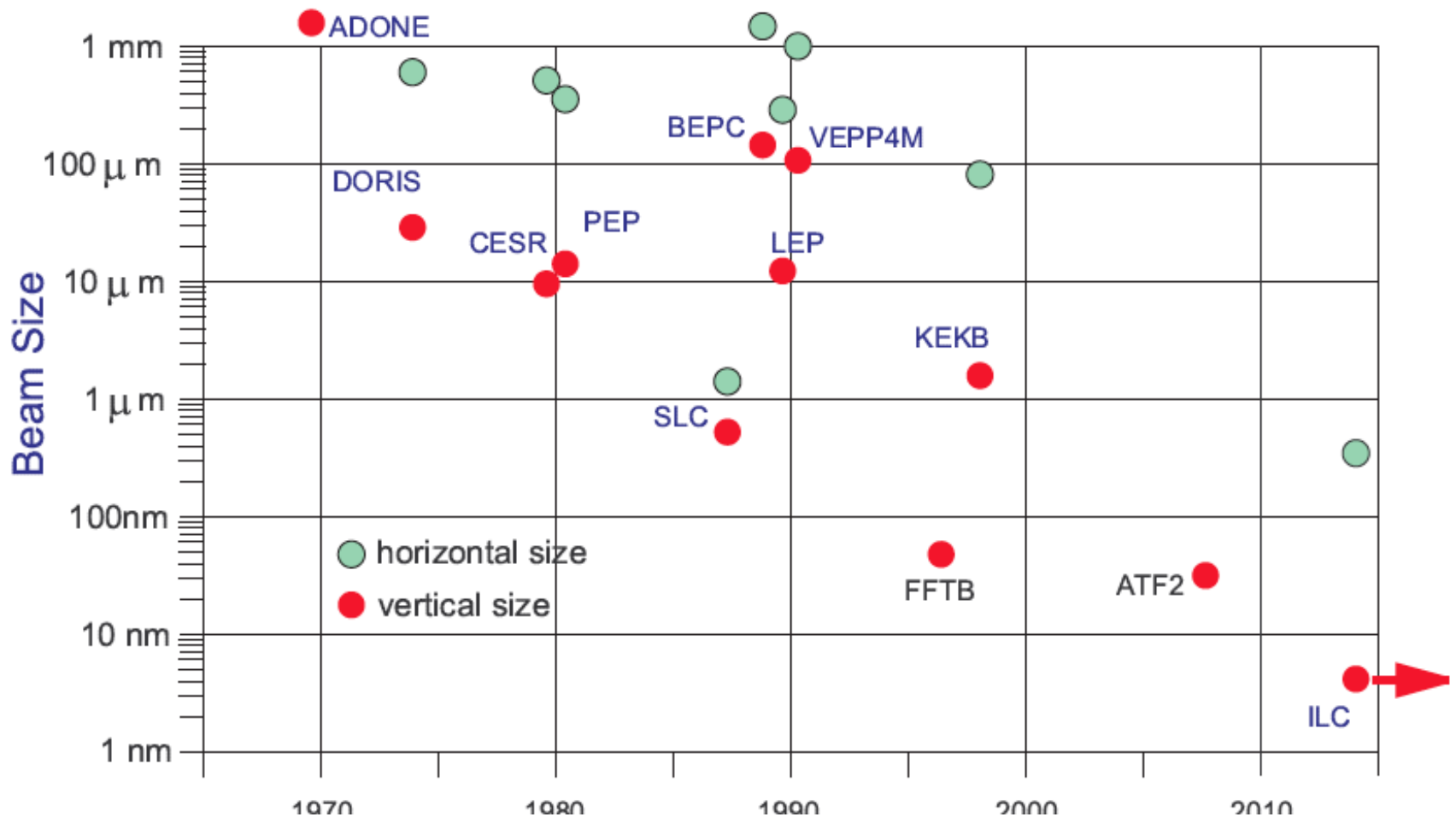
f_{col} 1秒当りのバンチ衝突回数
 \Rightarrow 1秒間の事象数 $= \mathcal{L}\sigma$

$$\mathcal{L} = f_{col} \frac{N^2}{S} = \text{luminosity}$$

Gauss分布なら

$$\mathcal{L} = f_{col} \frac{N^2}{4\pi\sigma_x\sigma_y}$$

e+e- Collider のビームサイズの歴史



ILC Accelerator Baseline Parameters

E_{cm} : adjustable from 200 – 500 GeV

Luminosity: $\int L dt = 500 \text{ fb}^{-1}$ in the first 4 years ($L \sim 2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

e^- beam polarization: 80%

Upgradable: to $\sim 1 \text{ TeV}$ with 1 ab^{-1} / 3-4 years

Options :

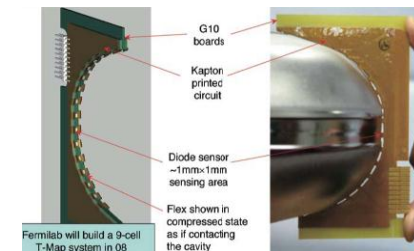
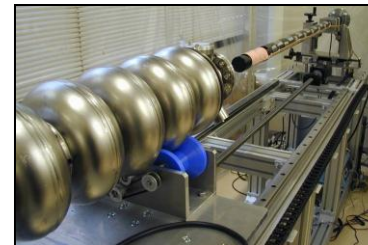
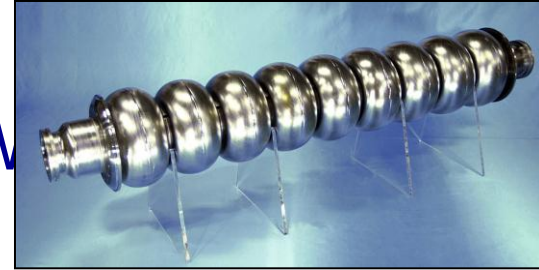
- e^+ polarization >50%
- GigaZ (high luminosity running at M_Z and $2M_W$)
- $\gamma\gamma$, $e\gamma$, e^-e^- collisions

**Choice of options depends on LHC+ILC results*

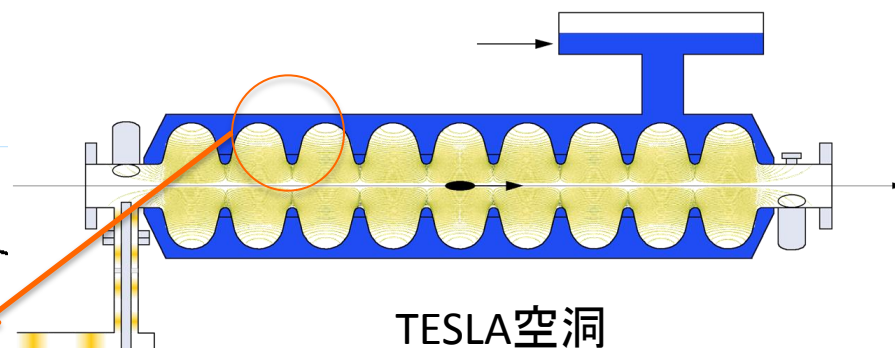
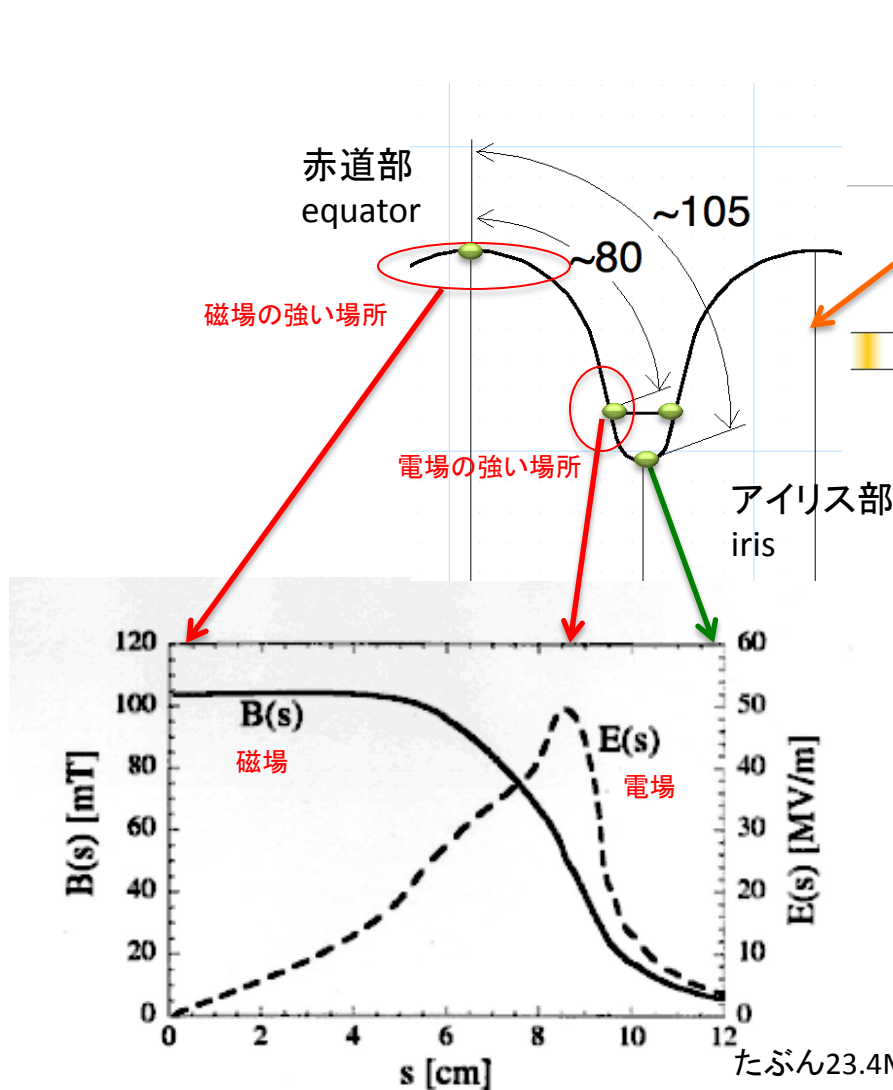
[<http://www.fnal.gov/directorate/icfa/para-Nov20-final.pdf>, Heuer et al]

超伝導加速空洞における開発研究課題

- **製造** :
 - Forming and welding (EBW)
- **表面処理**
 - Chemical etching
 - Electro-polishing
 - Cleaning
 - Ethanol, Detergent, Micro-EP
 - High pressure water rinsing
- **測定**
 - Optical Inspection (warm)
 - Thermometry (cold)



空洞内面の表面磁場強度、表面電場強度の分布



表面磁場が強い場所: 赤道部のかなり広い範囲

ピットやバンプがあると磁場が強くなる
 → 高電界で臨界磁場を超えて発熱、クエンチする。

表面電場が強い場所: スティフナー溶接部分

ピットやバンプのエッジで電場が強くなる
 → 高電界で電子放出をしやすい。

Distribution of the magnetic and electrical field from equator to the iris on the surface of the TESLA cavity

35MV/m時はこのグラフ値の1.5倍

Why Field Gradient Limited in SC Cavity ?

Current major reasons

- **Field Emission**

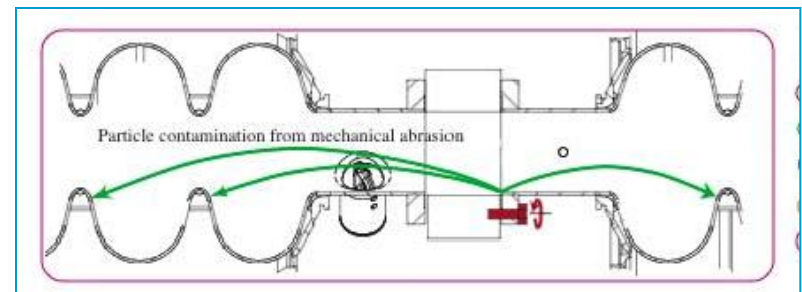
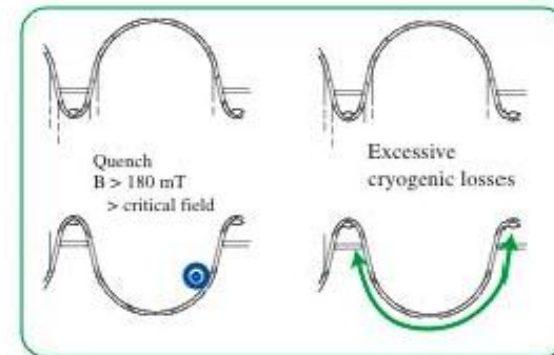
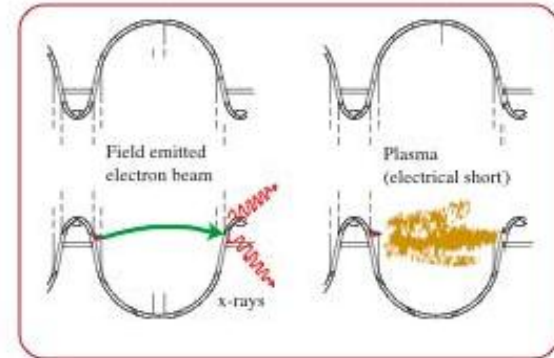
- due to high **electric field**
 - around “Iris”

- **Quench**

- caused by surface heating from dark current, or
- **magnetic field** penetration.
 - around “Equator”

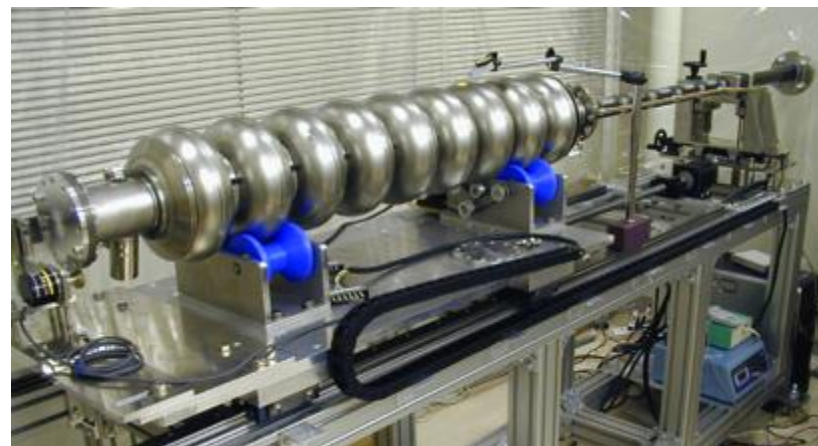
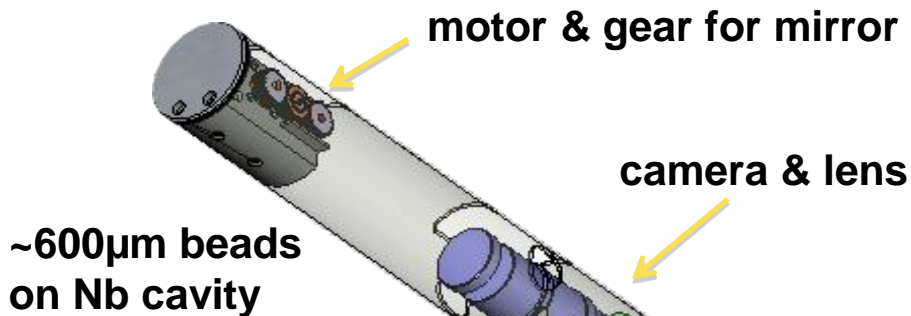
- **Contamination**

- during assembly



New High Resolution, Optical Inspection System

For visual inspection of cavity inner surface.

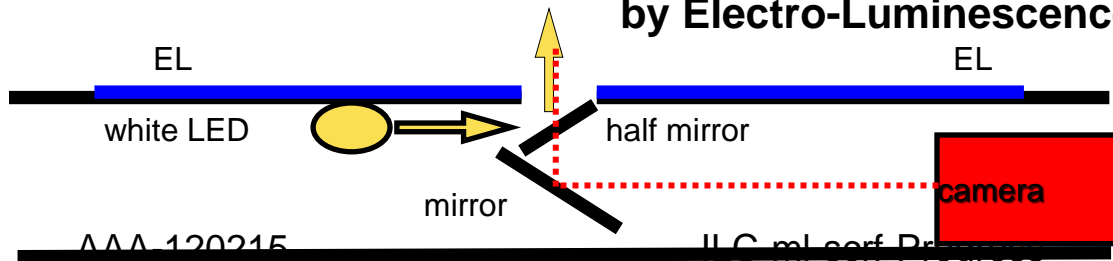


Camera system (7 μ m/pix) in 50mm diameter pipe.



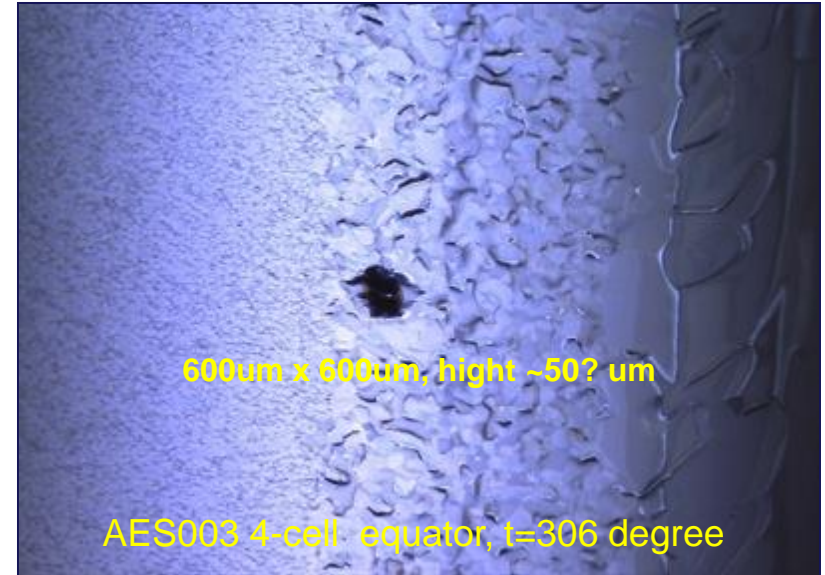
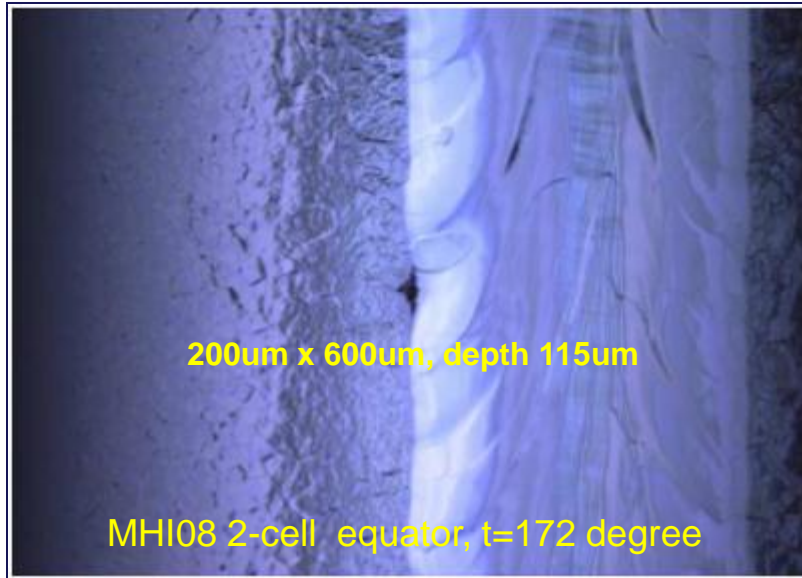
perpendicular illumination by LED & half mirror

tilted sheet illumination by Electro-Luminescence

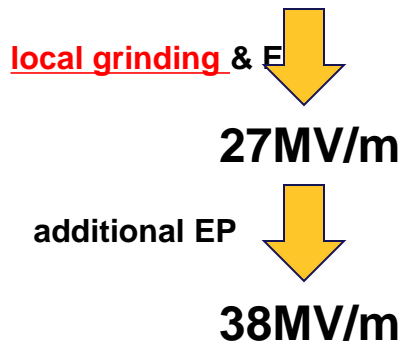


sliding mechanism of camera

Local grinding of quench location

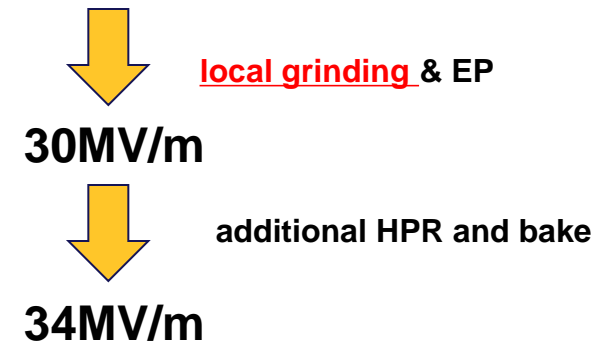


**Pit; appeared after bulk EP,
limit to 16MV/m**

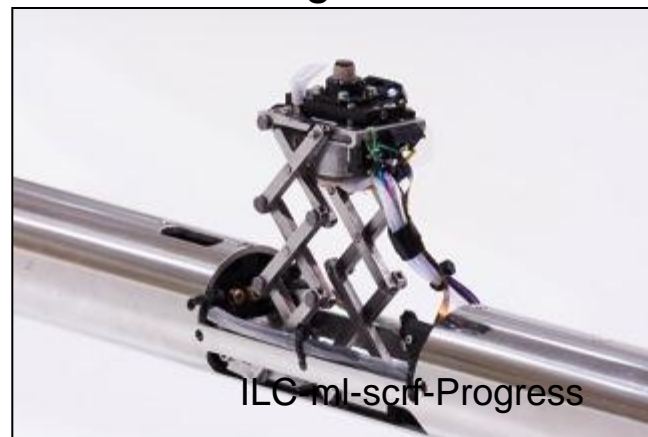


AAA-120215,
Yamamoto

**Bump at heat affecting zone,
limit to 20MV/m**

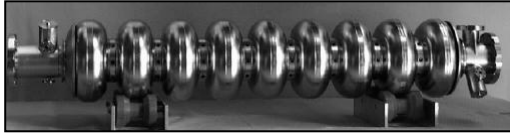


Local grinder tool



空洞製造・成功率の進展

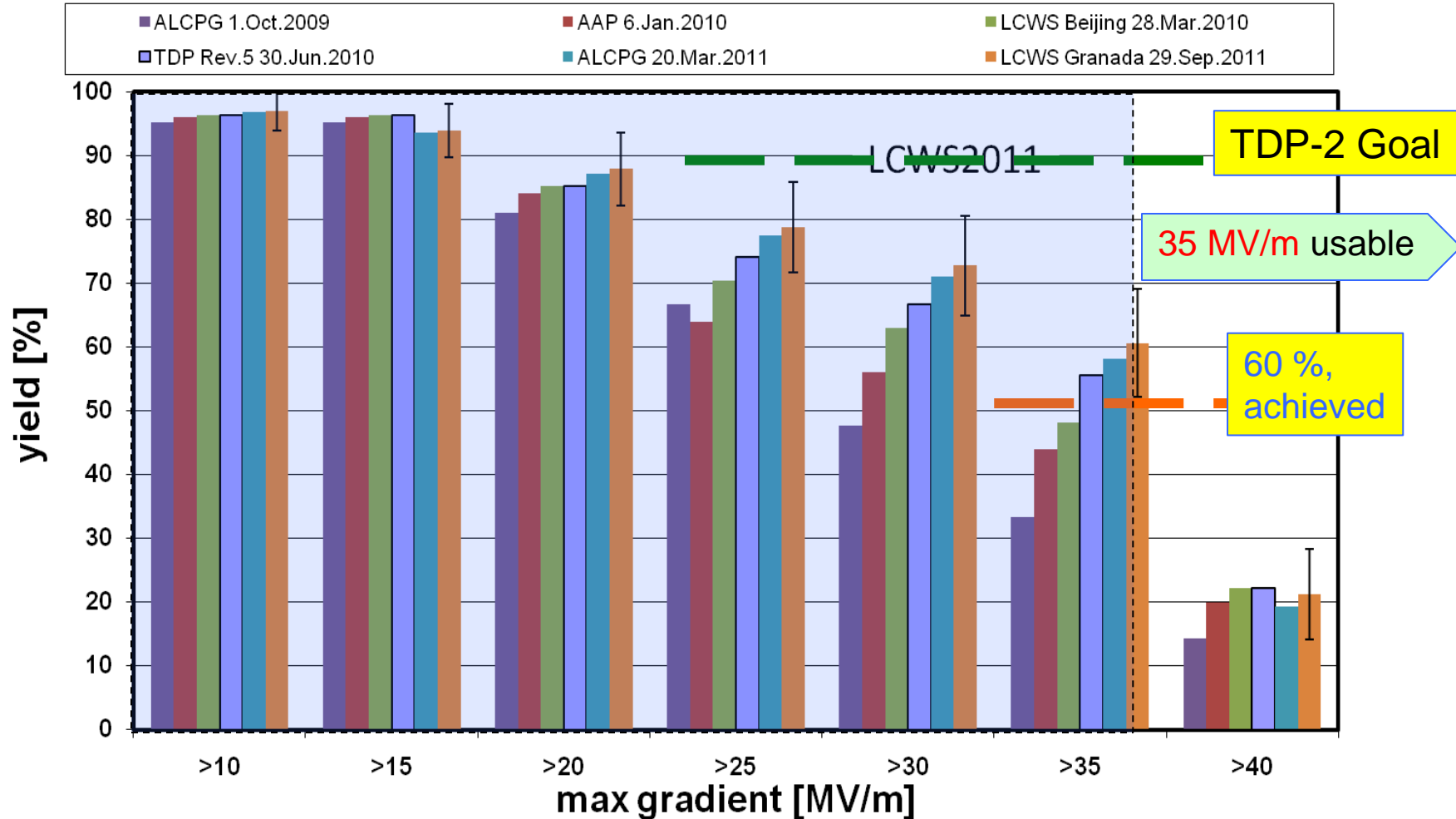
Updated, Sept., 2011



Electropolished 9-cell cavities

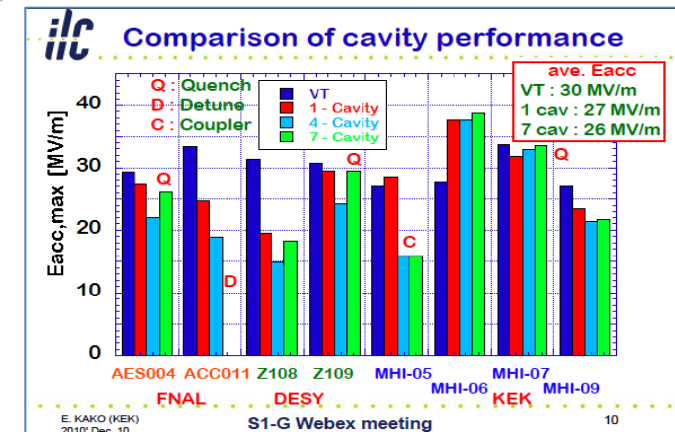
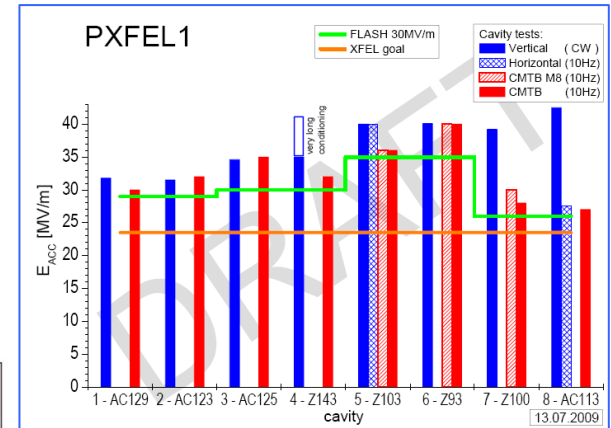
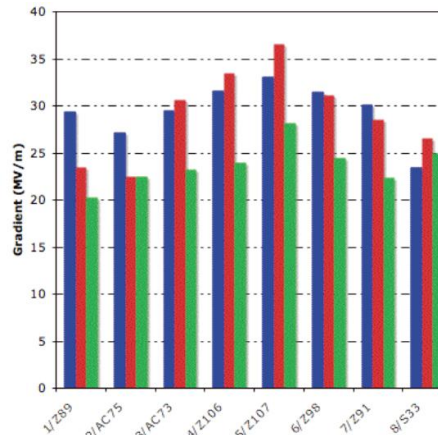
KEK (combined) up-to-second successful test of cavities from established vendors

Plot courtesy
Camille Ginsburg of FNAL



Cryomodule Development & Test

- FLASH (DESY)
 - $<32 \text{ MV/m}>$ in CM operation, PXFEL-1
 - $<30 \text{ MV/m}>$ in FLASH operation
- NML-CM1 (Fermi)
 - $<24 \text{ MV/m}>$ in CM
- STF: S1-Global (KEK)
 - Global effort
 - DESY/INFN/FNAL/SLAC/KEK
 - $<26 \text{ MV/m}>$ in CM



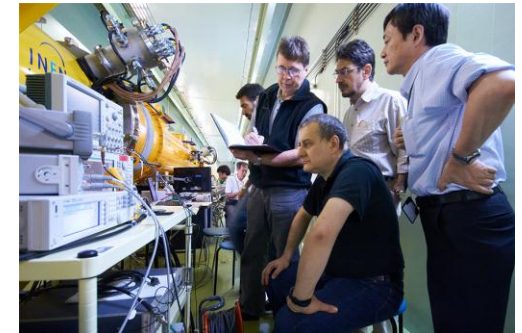
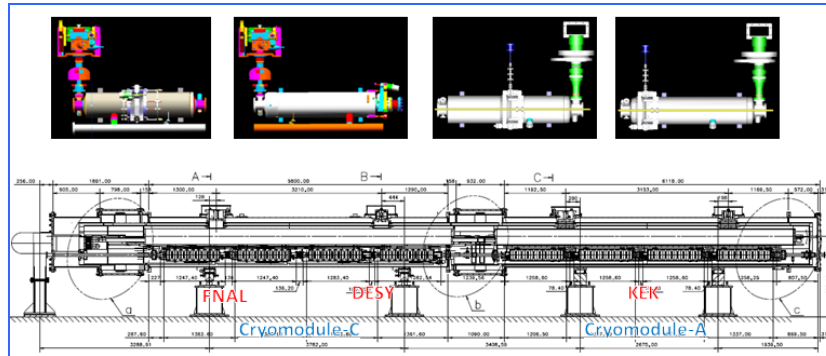
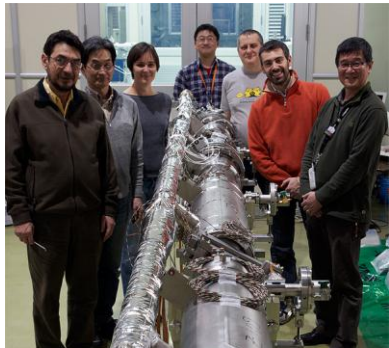
S1-Global Assembly/Test with Global Effort



DESY, FNAL, Jan., 2010



DESY, Sept. 2010



FNAL & INFN, July, 2010

INFN
and
FNAL
Feb.
2010



March, 2010

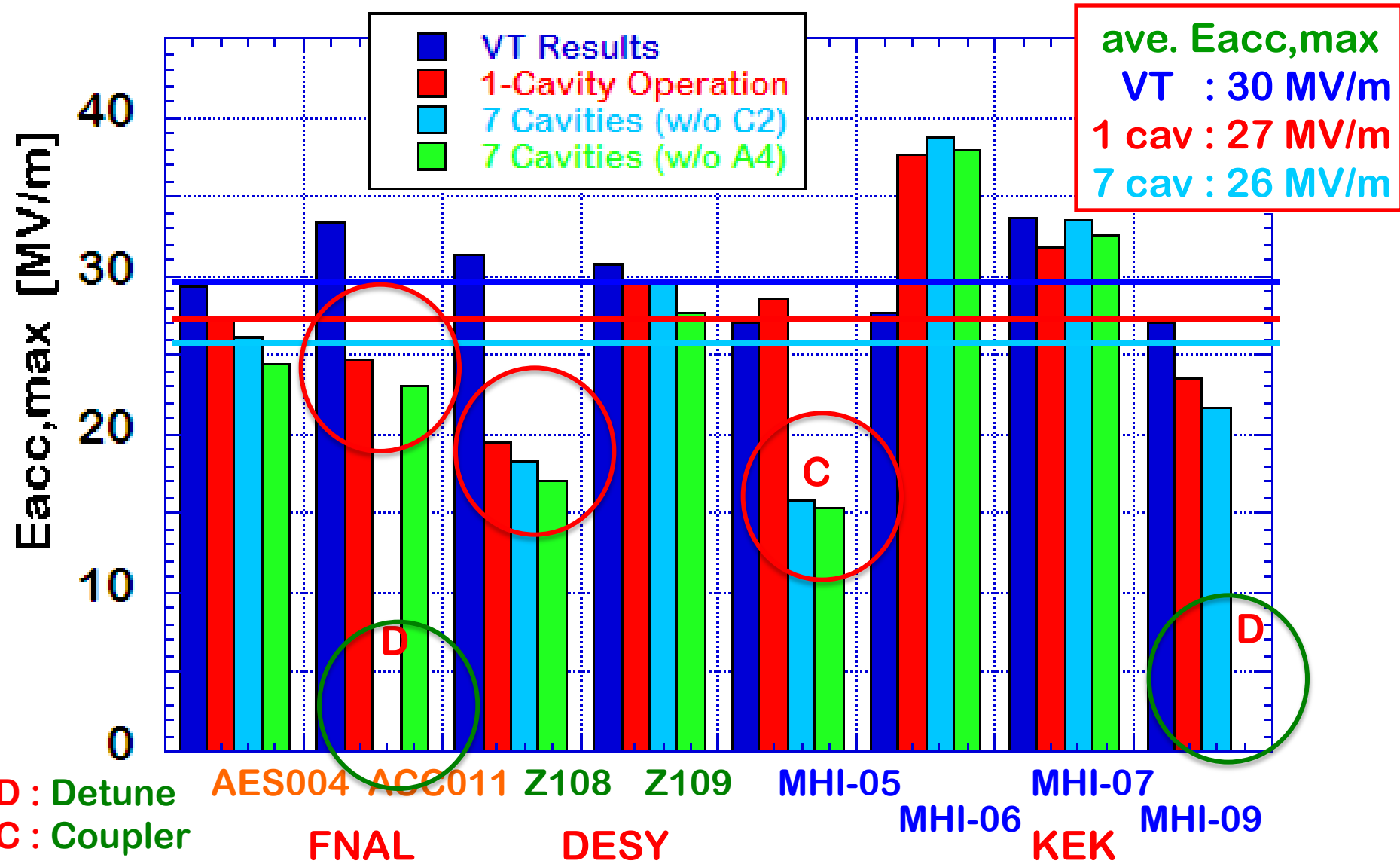


DESY, May, 2010



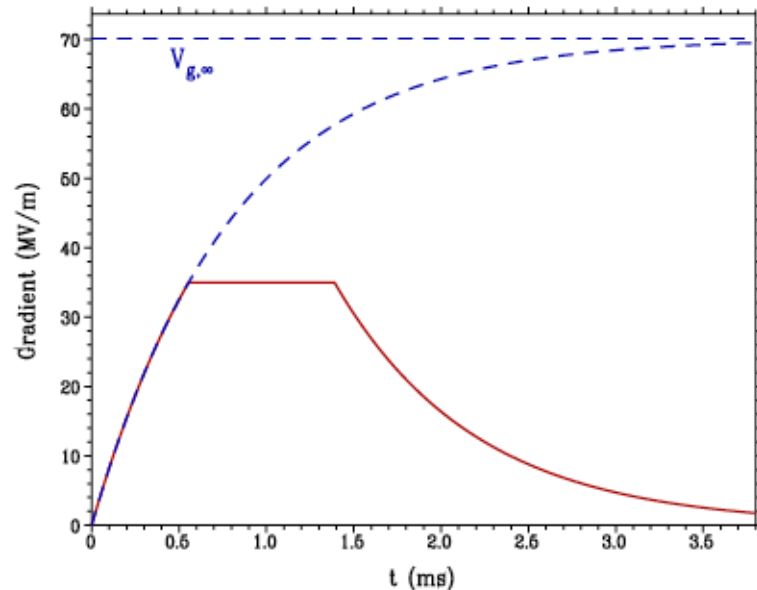
June, 2010 ~

S1-Global における空洞性能の経過



Filling and Loading Pattern

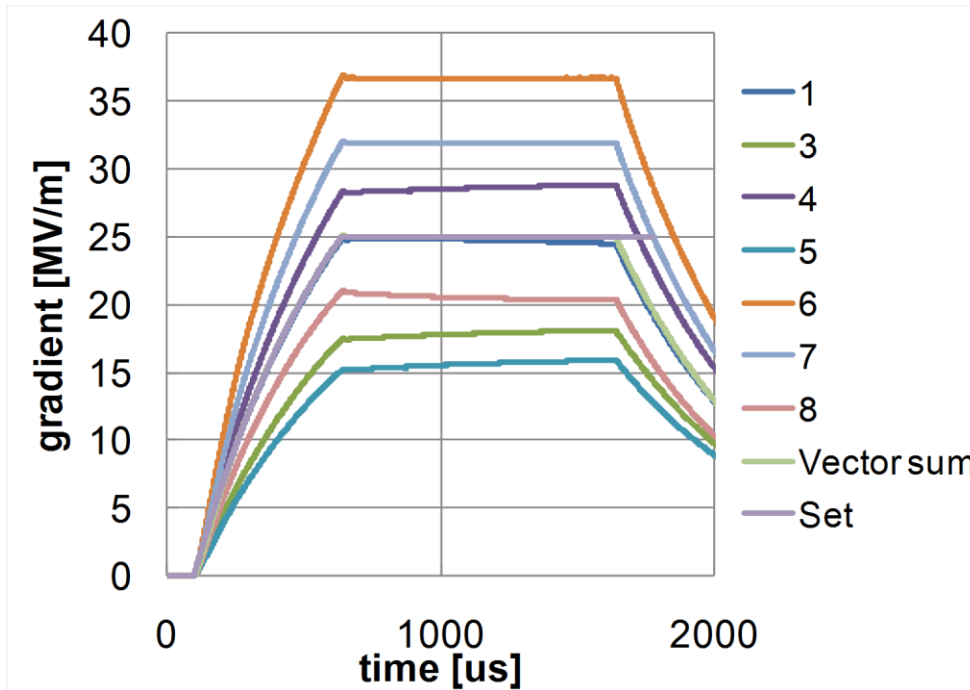
- 空洞をマイクロ波で満たすには時間がかかる
- 矩形波を入力すると空洞電圧は指数関数的に上昇する
- あるタイミングである強度のビームを入射すると、ビーム通過中、加速電圧が一定になる。
(加速電圧= V_{∞} なら無反射)
- ビーム通過が終わると同時にマイクロ波入力を止める
- 以後が指数関数的に減衰する。
(大部分は反射、一部は壁面を過熱)
- 常伝導と超伝導の決定的な違いは時間のスケール
常伝導： $\text{O}(100\text{ns})$ ，超伝導： $\text{O}(1\text{ms})$
- したがって、超伝導ではビームが長い



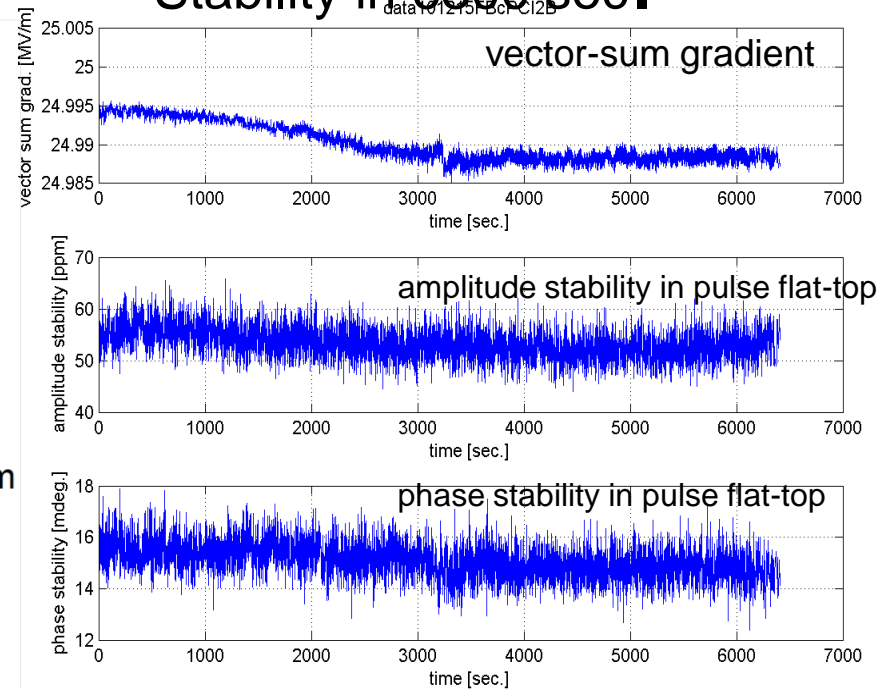
S1-Global : 7連空洞システム運転実績

LLRF stability study with 7 cavities operation at 25MV/m

Field Waveform of each cavity



Stability in 6300 sec.

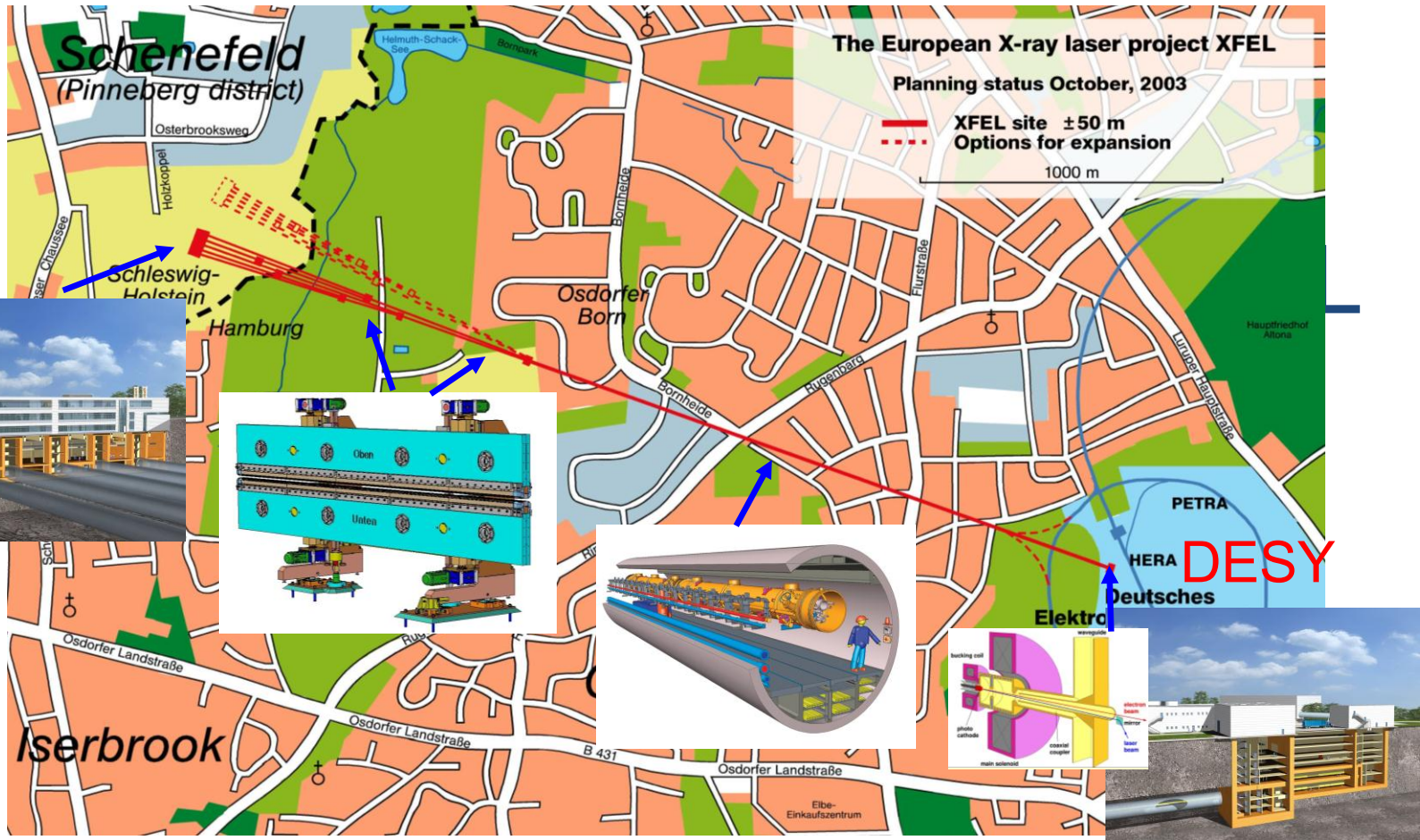


- Vector-sum stability: **24.995MV/m ~ 24.988MV/m (~0.03%)**
- Amplitude stability in pulse flat-top: **< 60ppm=0.006%rms**
- Phase stability in pulse flat-top: **< 0.0017 degree.rms**

European XFEL Facility

Introduction

← 3.4km →



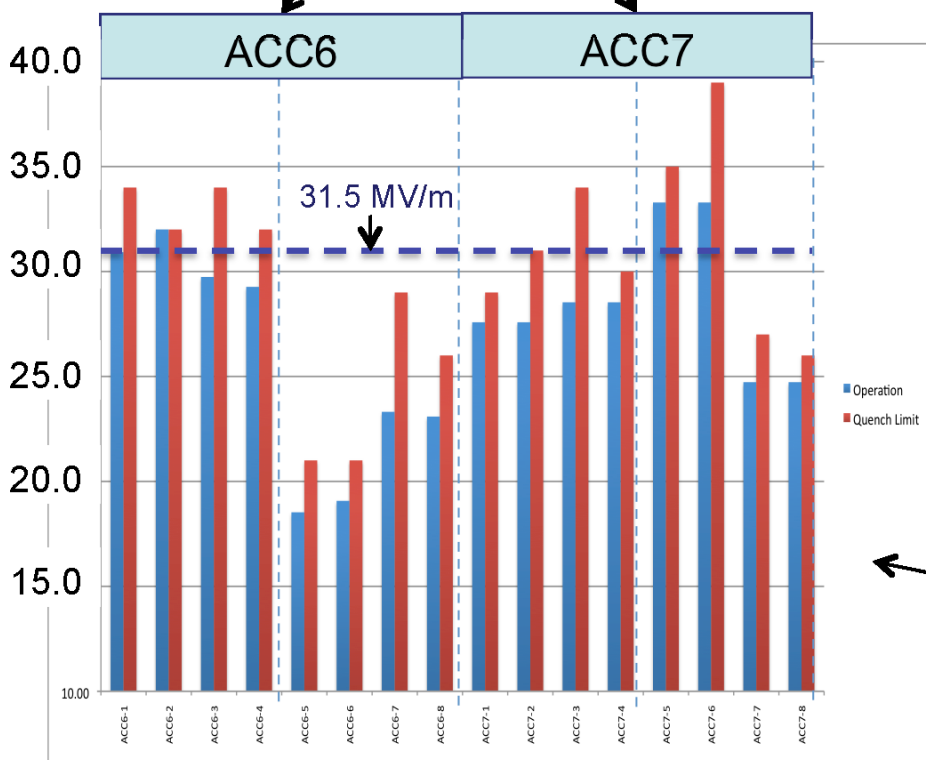
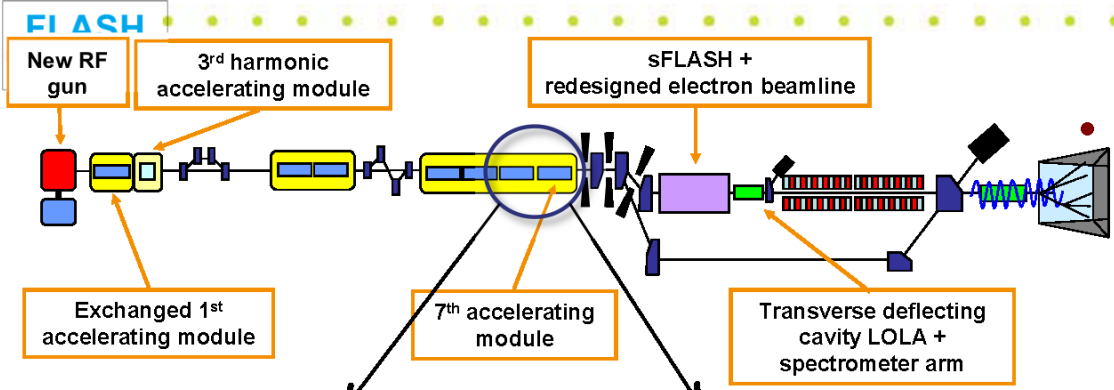
FLASH: Cryo Module Test Bench



4Z-02-28, A. Yamamoto

ILC Accelerator

Main TDP R&D goal driving the 9mA studies in February 2011



Operation with Gradient Spread

- From single RF source

- **Specifically: achieving constant gradients for each individual cavity during beam pulse**

- to within few percent

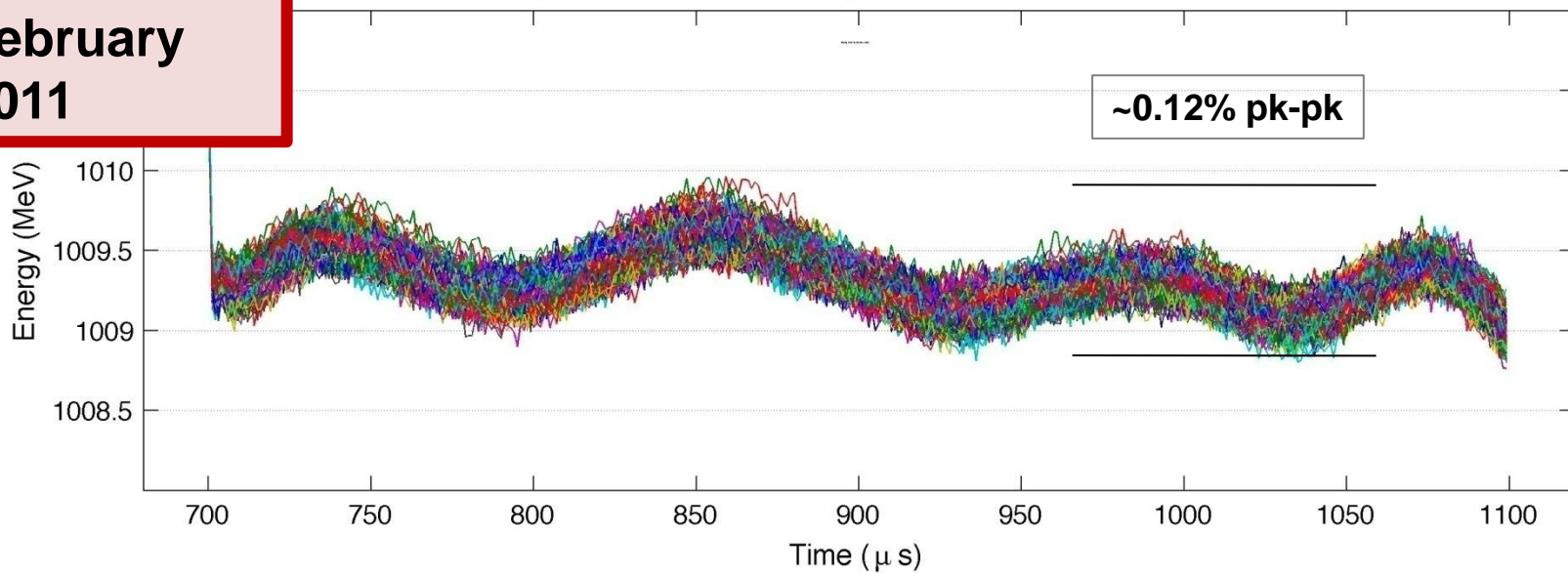
- close to gradient limits

- 'Effective usable gradient'

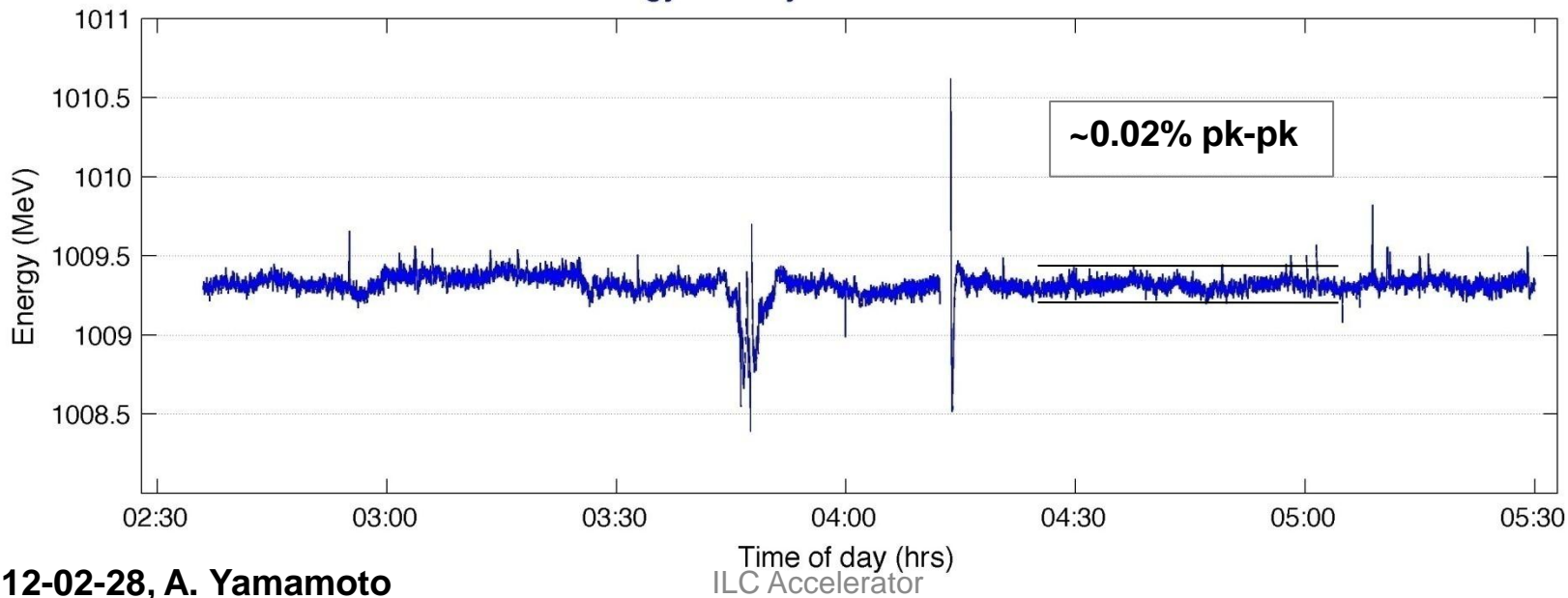
- **ACC67 modules at FLASH have operating gradient spread around +/-25%**

**FLASH:
February
2011**

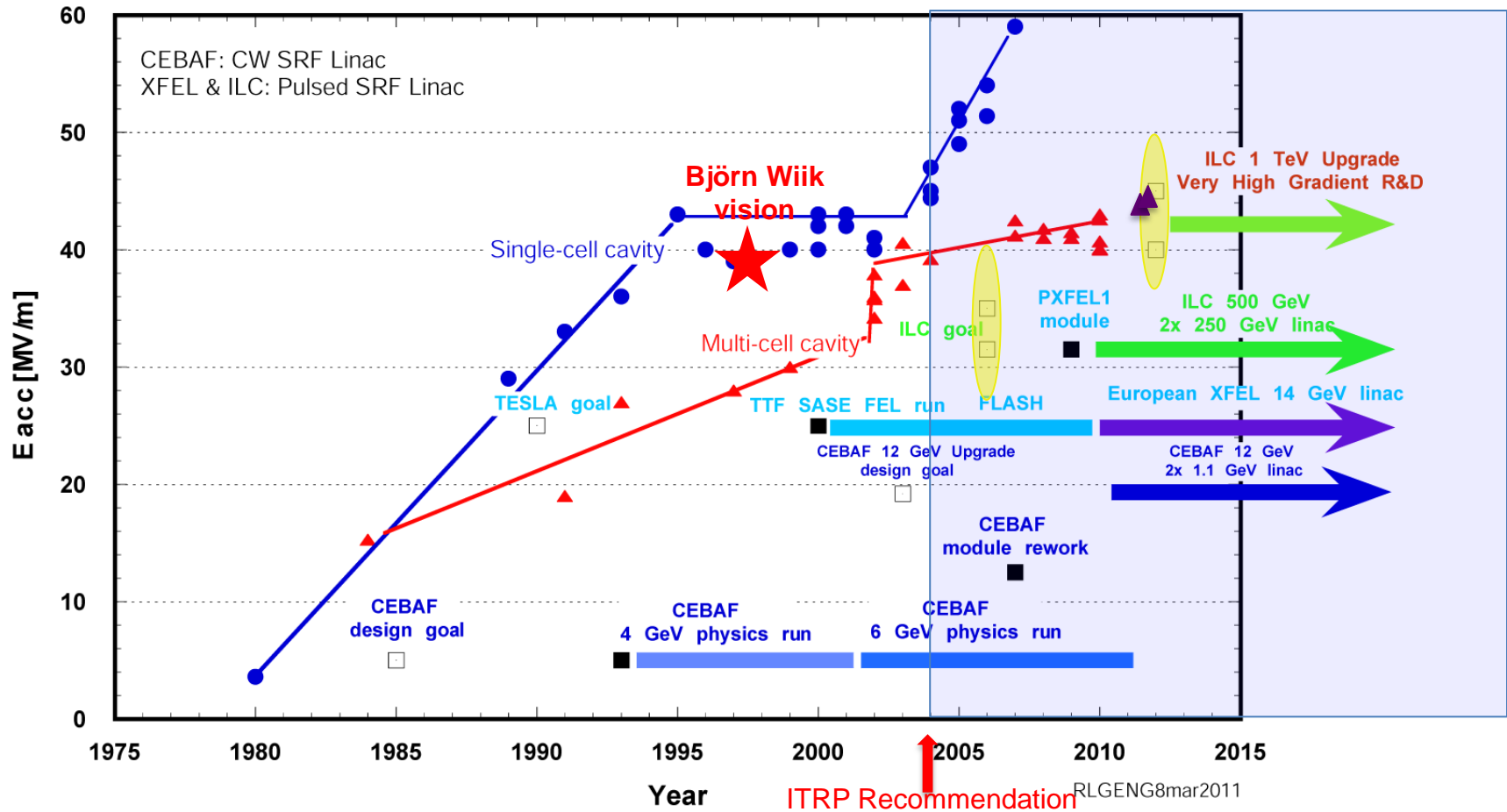
Energy stability over a 400 μ s bunch-train with 4.5mA



Energy stability over 3hrs with 4.5mA



超伝導加速空洞性能、プロジェクトの進展



- Continued progress in SRF gradient : breakthrough of 45 MV/m in 1-cell, ~60 MV/m record; 45 MV/m in 9-cell
- GDE began in 2005: produce a design for ILC and coordinate worldwide R&D efforts
- New SRF Test Facilities in operation: STF at KEK and NML at Fermilab
- Upgrade of CEBAF to 12 GeV underway at Jefferson Lab (80 cavities)
- FLASH operation and construction of European XFEL underway (640 cavities)

ILC-TDR: 技術設計書の完成にむけて

2007

2011

2013*



Reference Design Report



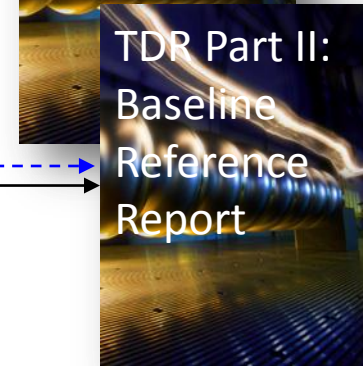
ILC Technical Progress Report ("interim report")

AD&I



TDR Part I:
R&D

~250 pages
Deliverable 2



TDR Part II:
Baseline
Reference
Report

~300 pages
Deliverables
1,3 and 4

2012 年末、完成予定

Technical Design Report

* end of 2012 – formal publication early 2013

GDE: ILC Timeline

