

LHC-ATLAS実験用 ミュー粒子トリガーシステムの構築

名古屋大学 GCOE研究員

杉本 拓也

(On behalf of ATLAS-TGC group)

略歴

ATLAS実験用ミュー粒子トリガーシステムの構築

1. 日本製TGCの性能評価 (品質保証)

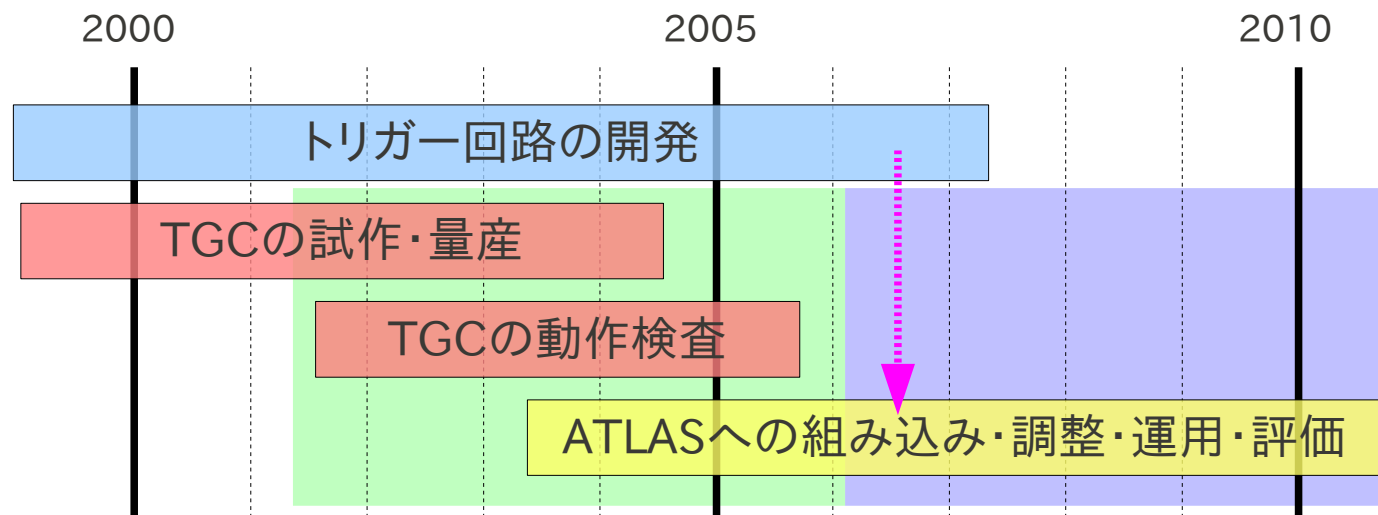
修士課程1年(2001年4月) ～ 博士課程3年(2006年3月)

神戸大学にて理学博士を取得

2. 実機トリガーシステムの構築

名古屋大ポスドク(2006年6月) ～ 現在

4年間CERN長期滞在

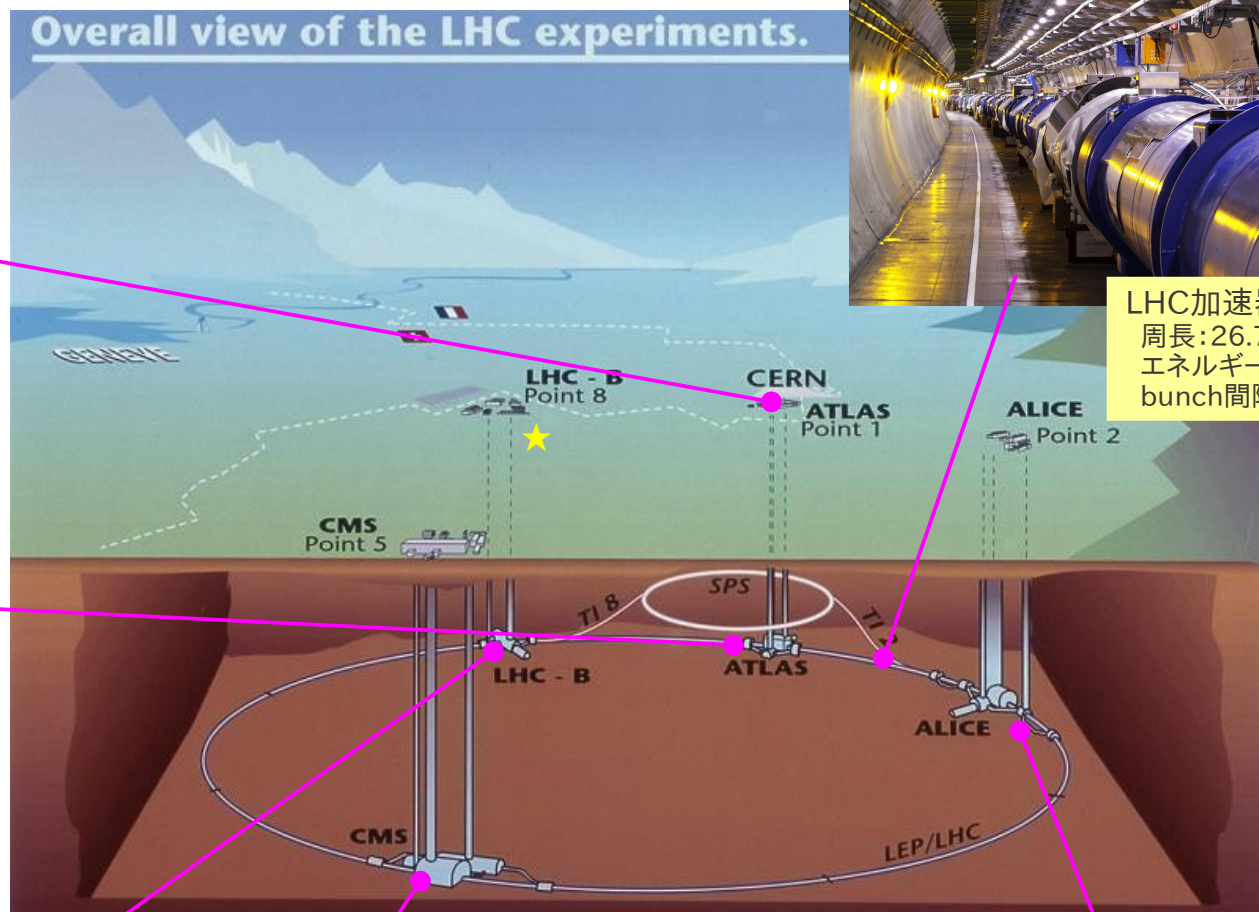


LHCの最新情報＋運転プラン

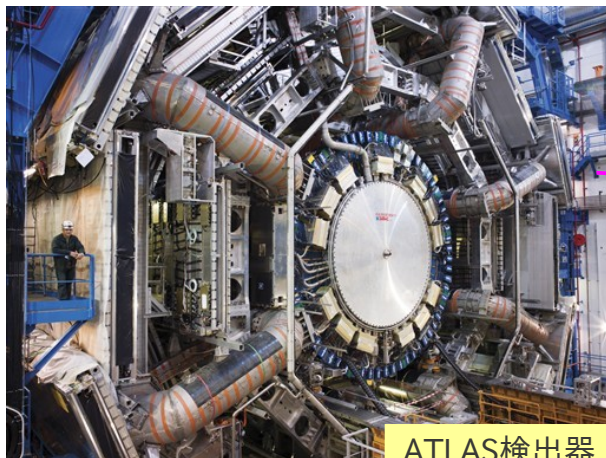
LHC加速器と4大検出器



CERN研究所 (スイス・ジュネーブ)



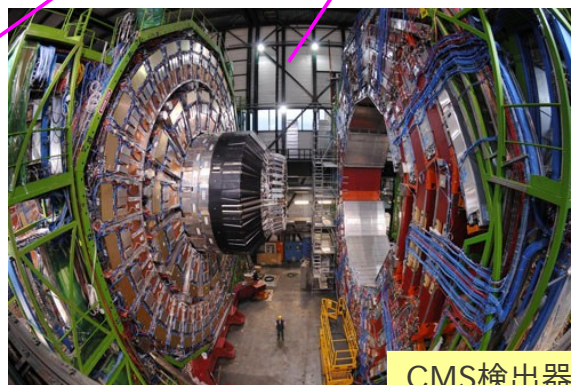
LHC加速器
周長: 26.7km
エネルギー: 14TeV
bunch間隔: 25nsec



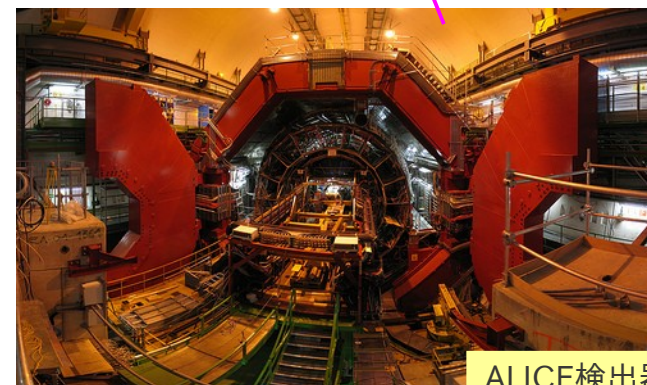
ATLAS検出器



LHCb検出器



CMS検出器

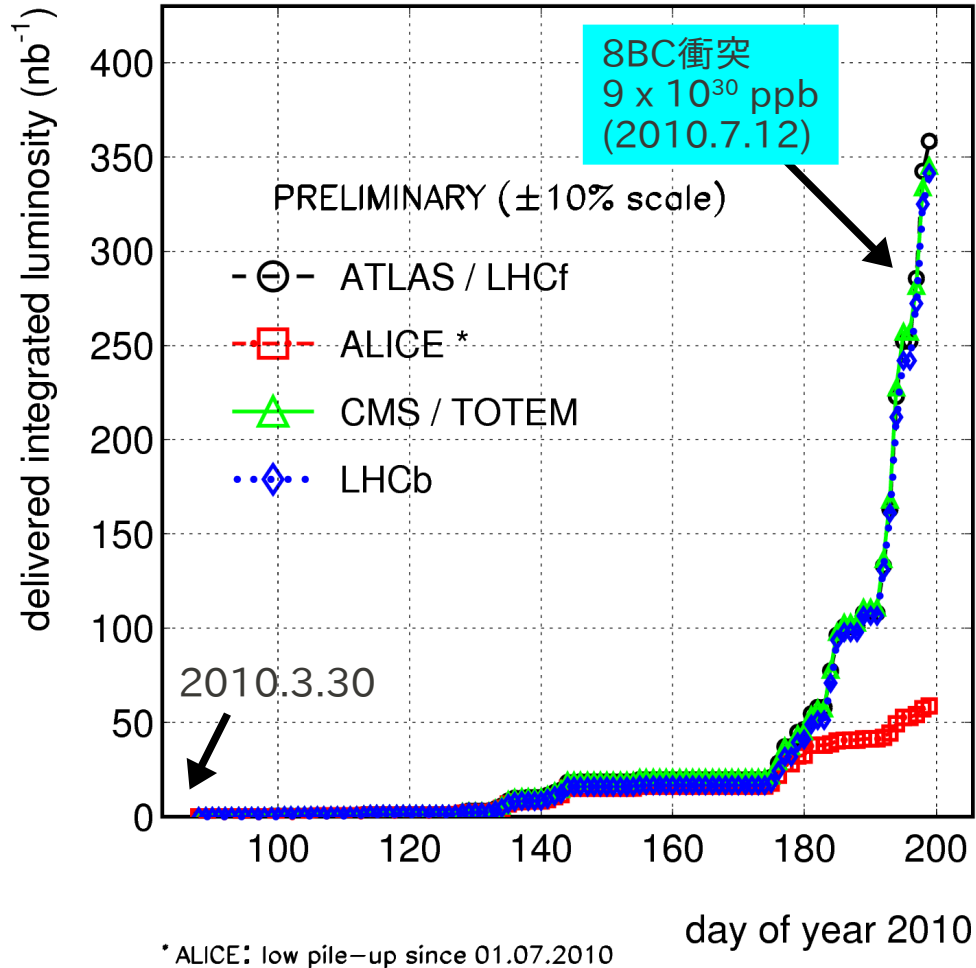


ALICE検出器

Recent LHC Activities

2010/07/19 11.54

LHC 2010 RUN (3.5 TeV/beam)



$$L = F \frac{N_b N_1 N_2 f_{rev}}{4\pi\sigma_x\sigma_y}$$

+ 重心系7TeVでの衝突 (2010/2011)

目標:2011年末までに1fb⁻¹

+ Higher Luminosityを目指して

①衝突するbunch数を増やす

1 → 2 → 3 → 4 → 6 → 8 (→ 12 → 24 ...)

②beamを絞る

11m → 5m → 3.5m → 2m (→ 0.55m)

③bunch当たりの陽子数を増やす

10⁹ → 10¹⁰ → 10¹¹

+ Machine Study

injection, collimator, beam dump

(平日はmachine study、週末にphysics run)

High stored energy
(~MJ級)

Current record (2010.7.18)

+ peak lumi: 1.6 x 10³⁰ cm⁻² s⁻¹

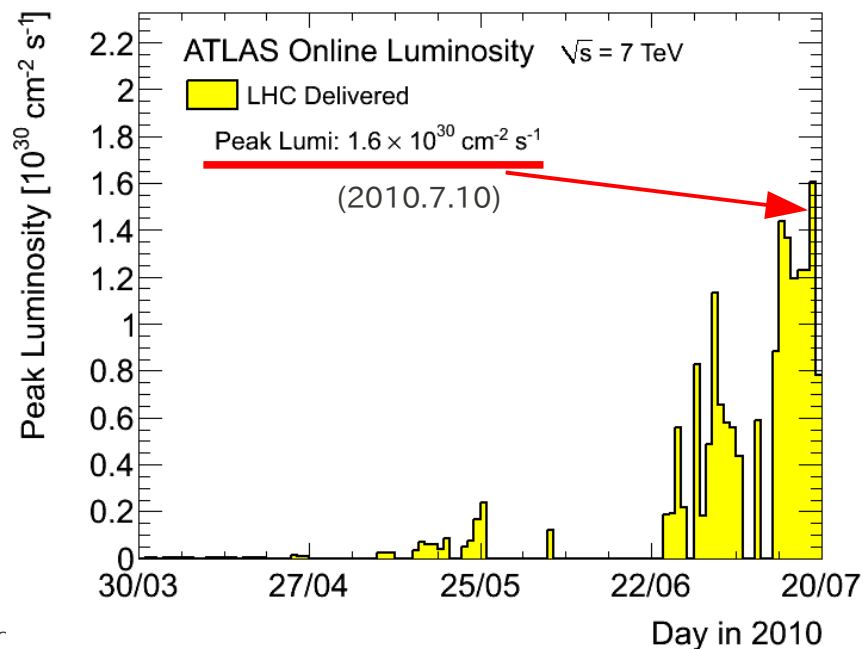
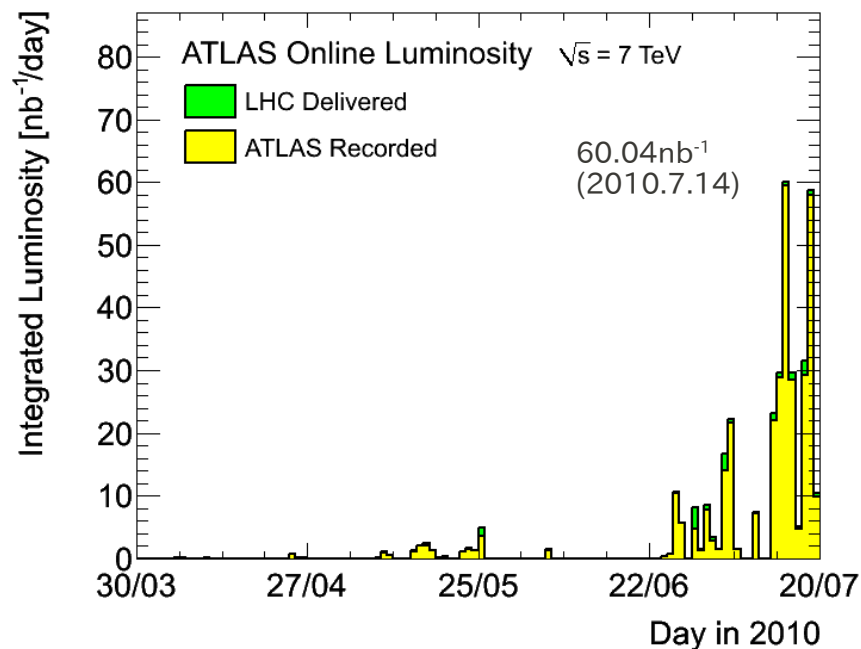
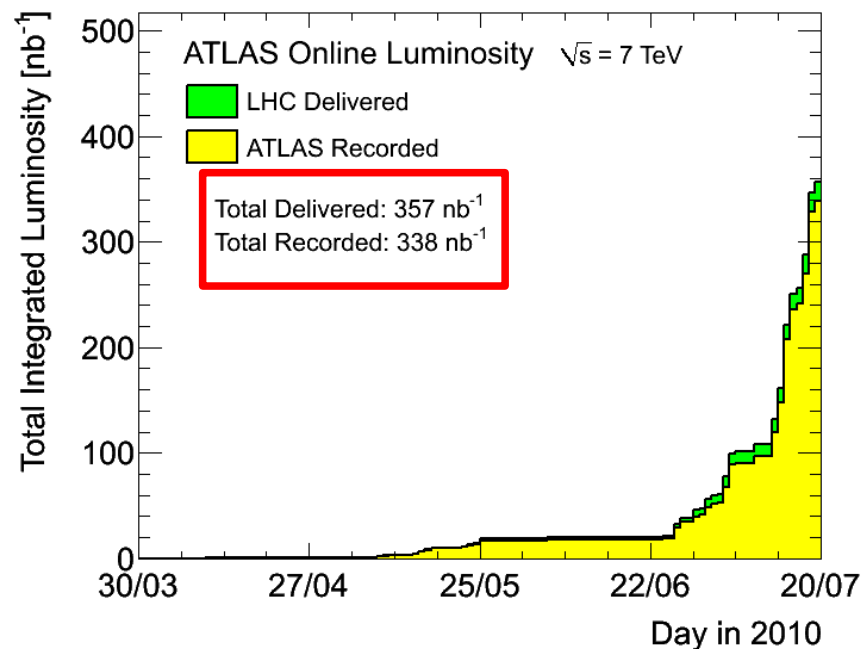
+ # of proton: 1.1 x 10¹² p/beam → 660kJ

+ integ. Lumi per fill: 69.1 nb⁻¹

+ fill period: 19hours

Technical Stop: 7/19 - 22

Luminosity at ATLAS

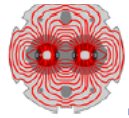


Data Taking Efficiency: 91.6% (2010年)

Subdetector	Number of Channels	Approximate Operational Fraction
Pixels	80 M	97.4%
SCT Silicon Strips	6.3 M	99.2%
TRT Transition Radiation Tracker	350 k	98.0%
LAr EM Calorimeter	170 k	98.5%
Tile calorimeter	9800	97.3%
Hadronic endcap LAr calorimeter	5600	99.9%
Forward LAr calorimeter	3500	100%
LVL1 Calo trigger	7160	99.9%
LVL1 Muon RPC trigger	370 k	99.5%
LVL1 Muon TGC trigger	320 k	100%
MDT Muon Drift Tubes	350 k	99.7%
CSC Cathode Strip Chambers	31 k	98.5%
RPC Barrel Muon Chambers	370 k	97.0%
TGC Endcap Muon Chambers	320 k	98.6%

2010年の計画

(Physics at LHCより引用)



2010 – pushing toward 1 e32 cm⁻²s⁻¹

Mike Lemont

If 1e11 becomes operational...

STEP	Nb	Nc	Ib	Itot	MJ	Increase	Peak lumi	Days	Int. Lumi	Approx date
4	3	1	1.E+11	3.0E+11	0.2	1.2	2.5E+29	5	0.032	W4 June
5	4	2	1.E+11	4.0E+11	0.2	1.3	5.1E+29	5	0.066	W1 July
6	8	4	1.E+11	8.0E+11	0.4	2.0	1.0E+30	5	0.13	W2 July
7	20	10	1.E+11	2.0E+12	1.1	2.5	2.5E+30	10	0.6	W3 & 4 July
8	24	24	1.E+11	2.4E+12	1.3	1.2	6.1E+30	20	3.2	August
9	48	48	1.E+11	4.8E+12	2.7	2.0	1.2E+31	10	3.1	September
10	96	96	1.E+11	9.6E+12	5.4	2.0	2.4E+31	10	6.2	September
11	144	144	1.E+11	1.4E+13	8.1	1.5	3.6E+31	10	9.3	October
12	192	192	1.E+11	1.9E+13	10.8	1.3	4.9E+31	10	12.7	October
13	240	240	1.E+11	2.4E+13	13.4	1.3	6.1E+31	7	11.1	November

now
(13b_8_8_8)

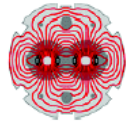
if not a similar table with lower bunch intensity, more bunches.

See 1 MJ as the damage threshold hence the hold over summer (plus some experts will be away)

Also need to gain experience and confidence before moving on

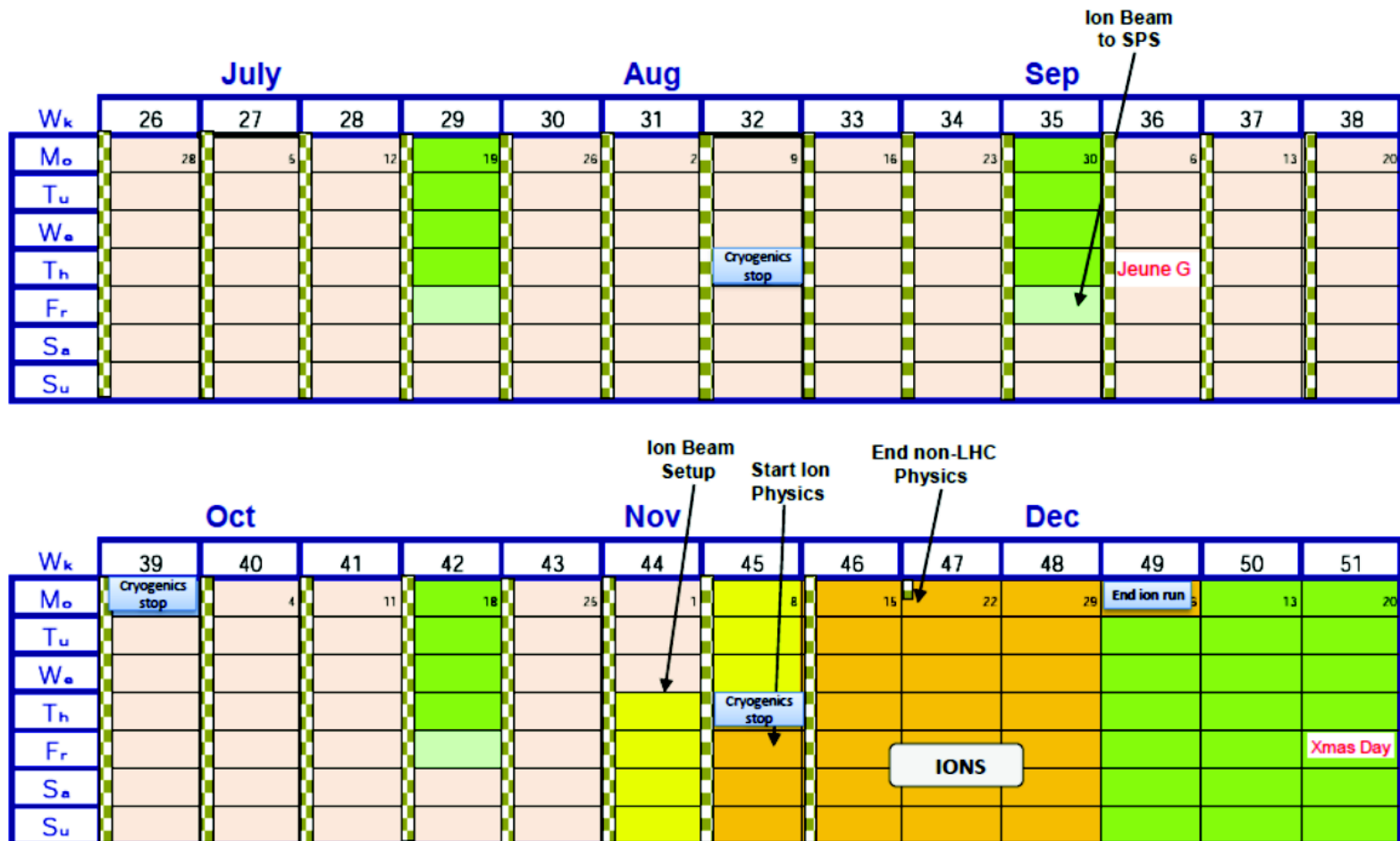
2010年後半

(Physics at LHCより引用)



2010 – second half

Mike Lemont



2011年以降

(Physics at LHCより引用)

Mike Lemont



2011 – 3.5 TeV

- Restart 4th February
- 9 months protons, 4 weeks ions
- Run flat out above $1\text{e}32\text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

	Nb	lb	Total Intensity	MJ	beta* [m]	Peak Lumi [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	Int Lumi/month [pb^{-1}]
50 ns	432	$7\text{ e}10$	$3\text{ e}13$	17	2.5	$7.4\text{e}31$	~59 (34)
Pushing intensity limit	796	$7\text{ e}10$	$5.1\text{e}13$	31	2.5	$1.4\text{e}32$	~109 (63)

↑
17% nominal
↑
HF ~ 0.2

- Certainly need to be delivering $1\text{e}32\text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ at least
- Should be able to deliver a total approaching 1 fb^{-1}



To 2014

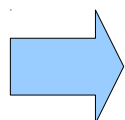
- 2012: splice consolidation etc.
- 2013: 6.5 TeV ~24% nominal intensity
- 2014: 7 TeV ~27% nominal intensity

Limits from phase 1 collimation

Year	Months	Energy	Beta [m]	lb	Nb	Peak lumi [$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	Lumi/month [fb^{-1}]	Int Lumi/Year [fb^{-1}]
2010	8	3.5	5	$10\text{e}10$	240	$4.3\text{e}31$	-	0.1
2011	9	3.5	2.5	$7\text{e}10$	796	$1.4\text{e}32$	0.1	0.9
2012								
2013	7	6.5	1	$1.1\text{e}11$	720	$1.3\text{e}33$	1	7
2014	8	7	0.55	$1.1\text{e}11$	796	$2.9\text{e}33$	2	16

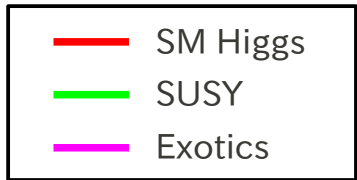
NB Illustrative numbers: beta*, bunch intensity, number of bunches will be negotiable

最新の物理結果
今後の展望

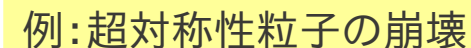


計42のトーク

ATLAS実験用ミュー粒子トリガーシステム



(5-100GeV)

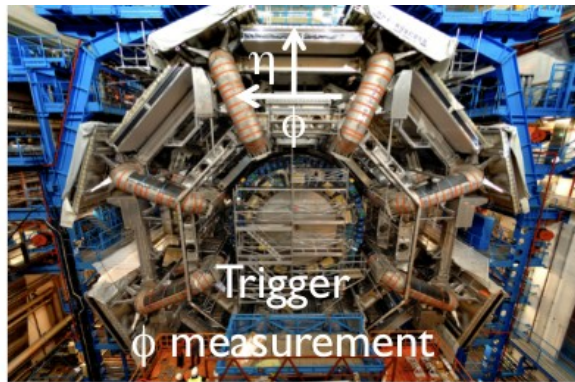


- B-Physics & onia
 - $J/\psi \rightarrow \mu\mu$, $Y \rightarrow \mu\mu$
- Electroweak
 - $W \rightarrow \mu\nu$, $Z \rightarrow \mu\mu$
- Top-Physics
 - $t\bar{t} \rightarrow WbWb$ (μ from W , μ from b)
- Higgs
 - $H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu\mu\mu\mu$, $H \rightarrow WW \rightarrow \mu\nu\mu\nu$
- SUSY, Exotics
 - MSSM $h/H/A \rightarrow \mu\mu$
 - $W' \rightarrow \mu\nu$, $Z' \rightarrow \mu\mu$

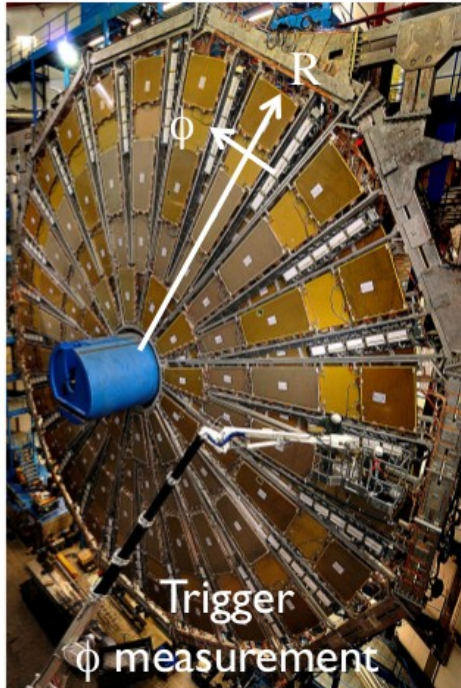
奥村、高橋、長谷川

→ muon is very important!

ミュー粒子検出器

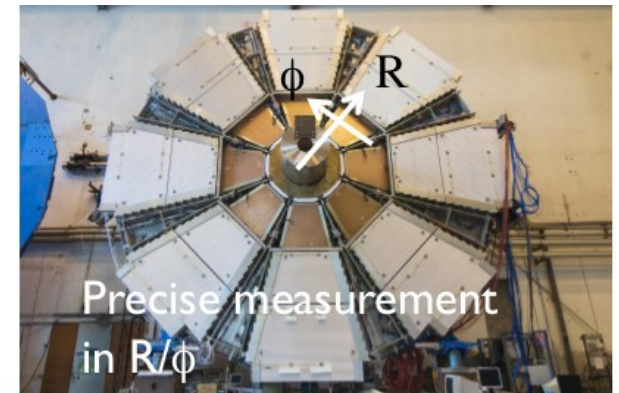
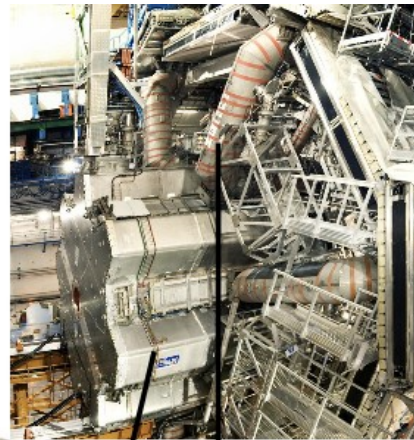


Resistive Plate Chamber
 $|\eta| < 1.1$
360k ch, 6 layers

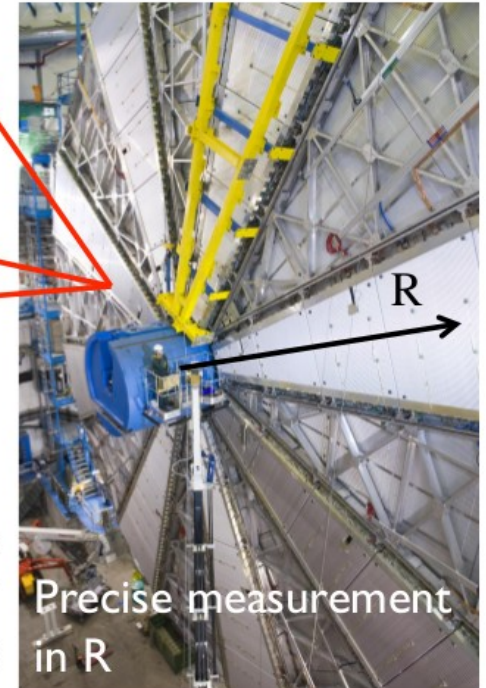


Thin Gap Chamber
 $1.1 < |\eta| < 2.4$
320k ch, 7 layers

Toroidal Magnet
(2~6 T·m)



Cathode Strip Chamber
 $2.0 < |\eta| < 2.7$
31k ch, 4 layers



Monitored Drift Tube
 $|\eta| < 2.7$
340k ch, 6 multi layers

Trigger in ATLAS

Lv1: 40MHz $\rightarrow$ 100kHz (hardware)

$e/\gamma/\text{jet}/E_T$: Calorimeter

μ : Muon Chamber

Endcap: Thin Gap Chamber

Barrel: Resistive Plate Chamber

Trigger decision : $< 2.5 \mu\text{s}$

collision data

Lv2: 100kHz $\rightarrow$ $\sim$ kHz (software)

Track reconstruction and matching

More refined measurement of energy

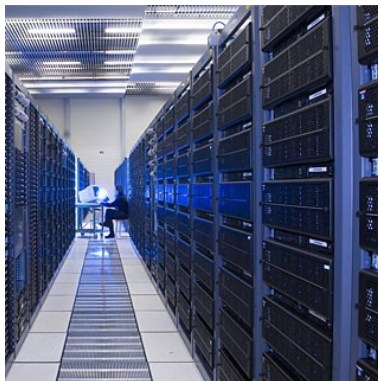
Trigger decision : $< 40 \text{ ms}$

EF: $\sim$ kHz $\rightarrow$ 200Hz (software)

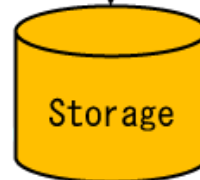
Full Reconstruction

Trigger decision : $< 4 \text{ s}$

(EF=EventFilter)

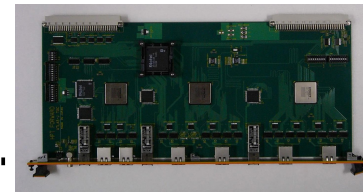
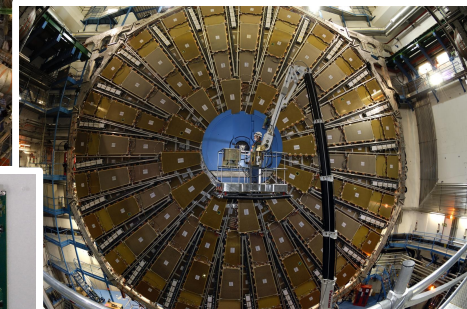
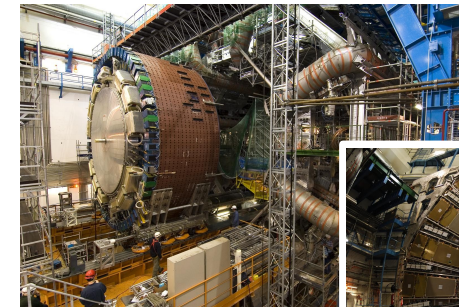


$\sim 300 \text{ MB/s}$

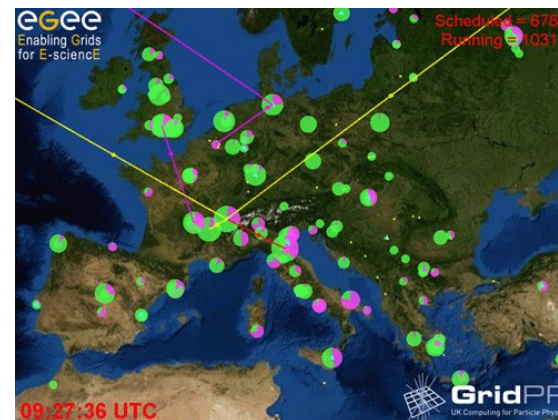


2010/7/21

杉本拓也 (名古屋大学)



PC farm for Lv2(500台)/EF(1800台)

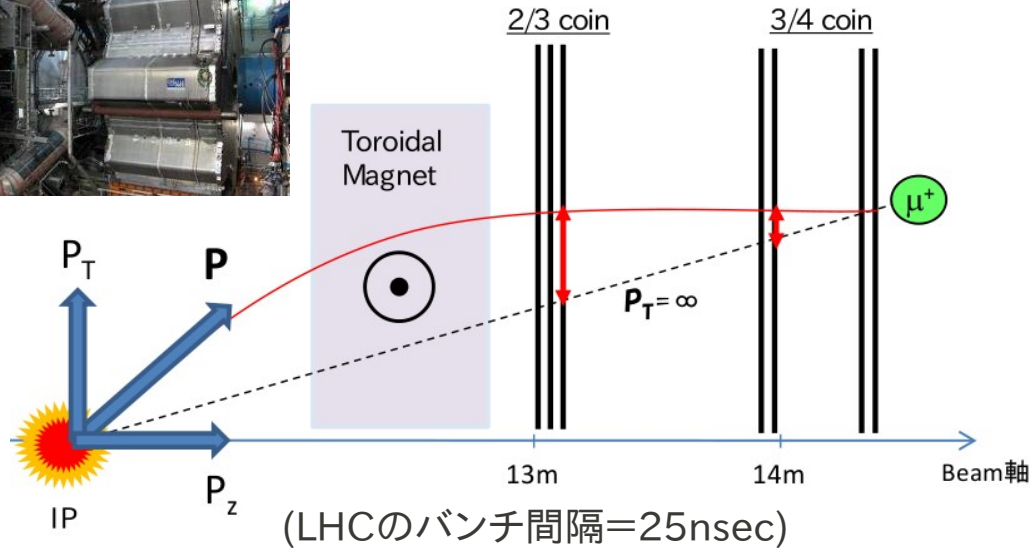


13/43

Level1 Endcap Muon Trigger

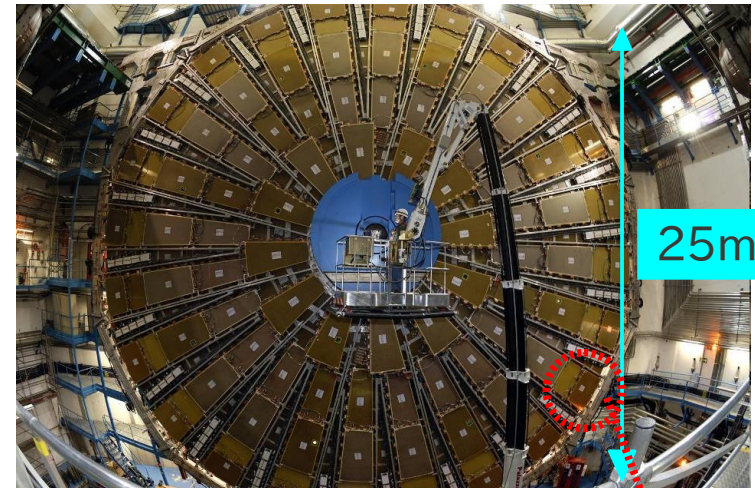
- ①計7層のコインシデンス
- ②無限大 P_T との差より P_T を概算

→ $P_T > 6\text{GeV}$ に感度をもつトリガーロジック



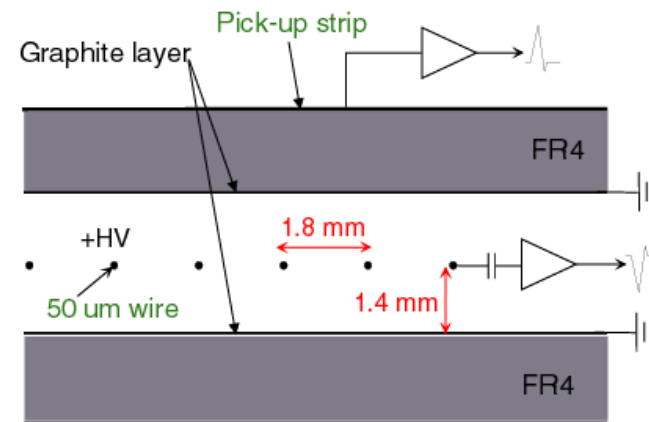
- ①98%以上の検出効率 (トリガー)
- ②25nsec以下の時間分解能 (バンチ識別)
- ③耐放射線性 ($\sim 0.6\text{C/cm}$)
- ④high rate耐性 ($\sim \text{kHz/cm}^2$)

ガス: $\text{CO}_2 + \text{n-Pentane} = 55:45$
HV: 3.0kV (gain= 10^6)



Thin Gap Chamber (11種類、3588枚)

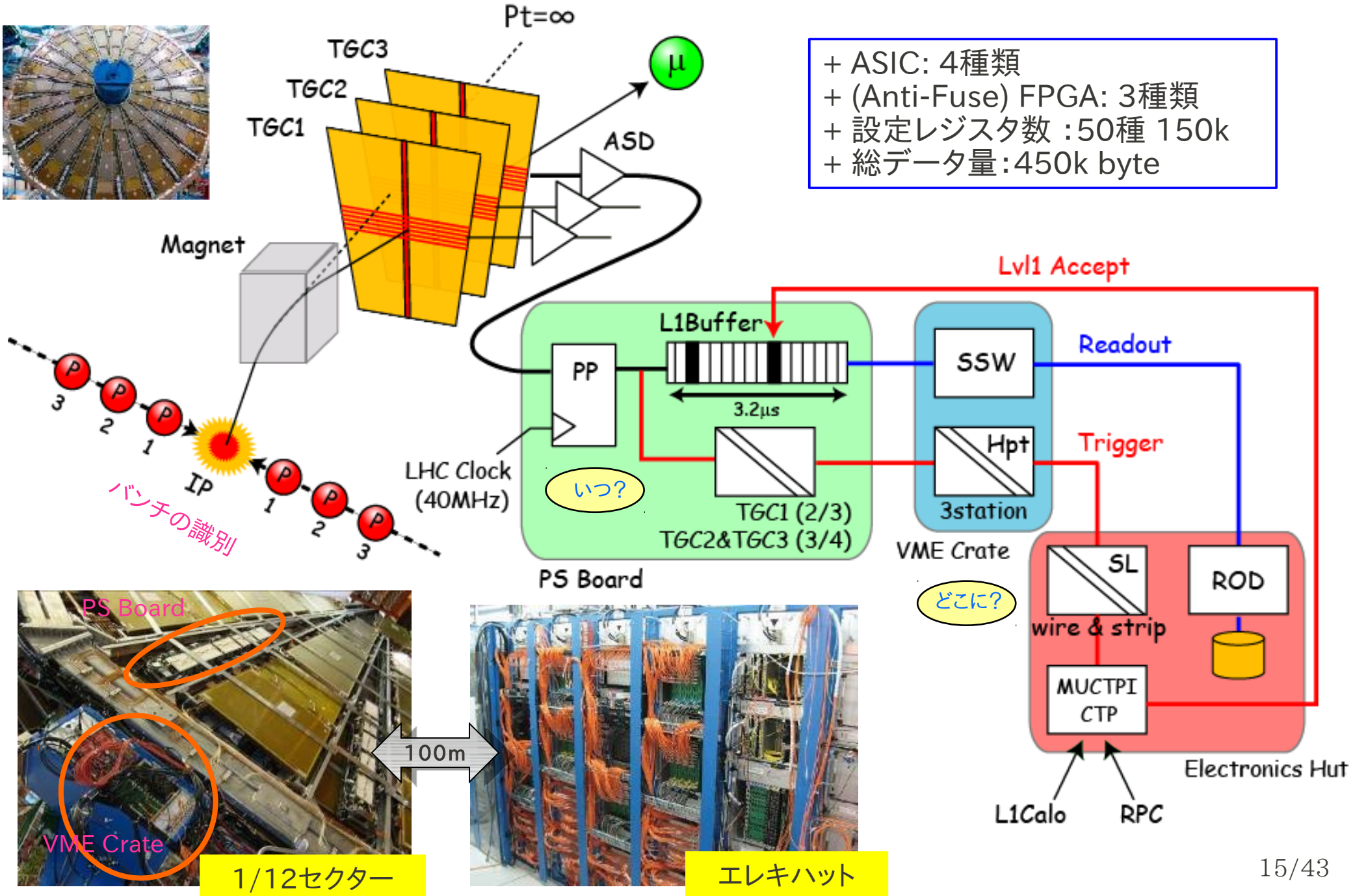
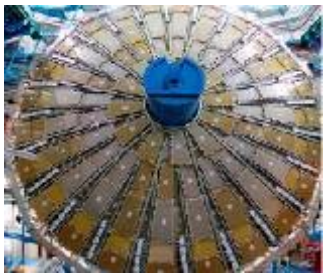
1224枚@KEK (残りはイスラエルと中国)



(1.4m x 1.3m)

→ Very challenging!

Trigger Electronics



History of TGC

1996 1997 1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009

TGC エレクトロニクスの開発と量産

TGC の試作

TGC の量産

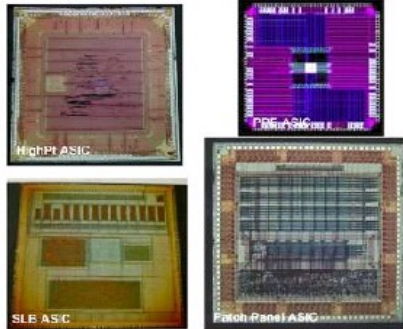
TGC の検査

セクター組み立て

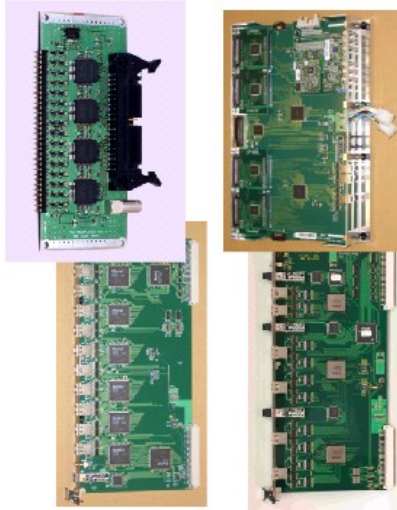
commissioning



(1995年6月)



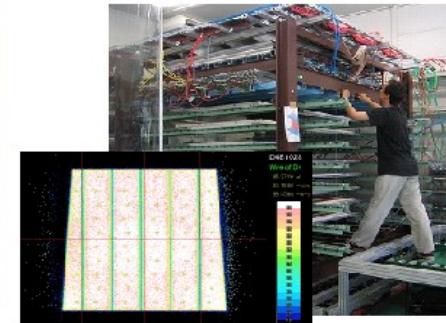
4 種類の ASIC を開発



7 種類のボードを製作



TGC 量産@KEK



宇宙線検査@神戸大



1/12 セクター組み立て@CERN



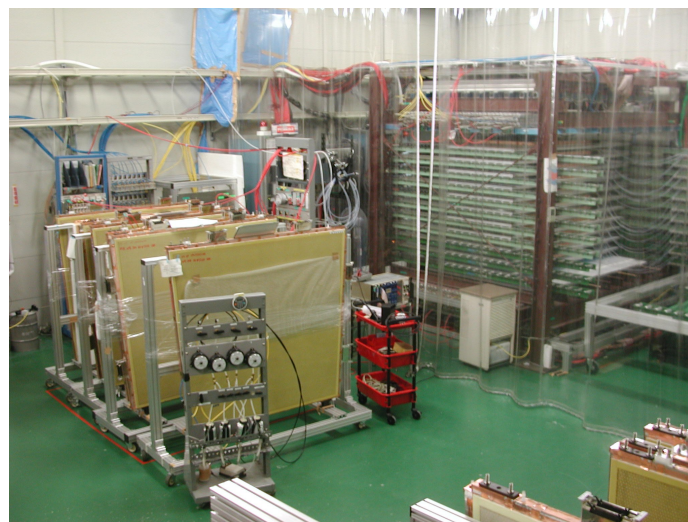
Big Wheel

TGCの量産と性能評価

研究対象: 1224枚の日本製TGC

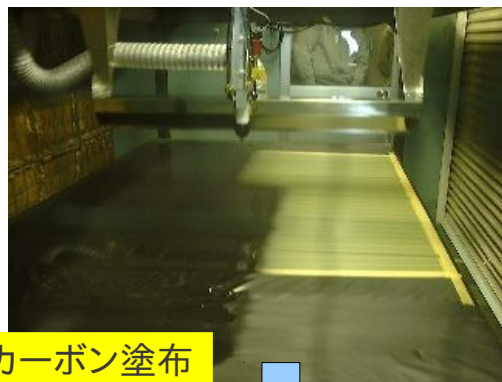


宇宙線検査小屋(外観)

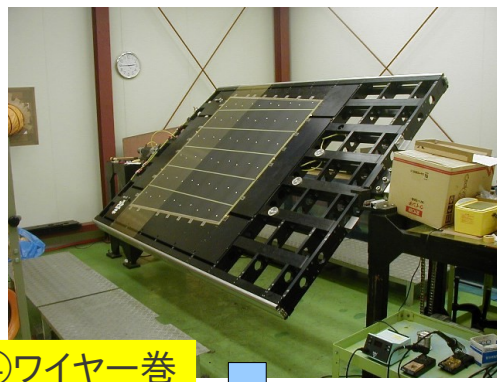


宇宙線検査小屋(内部)

TGCの量産



①カーボン塗布



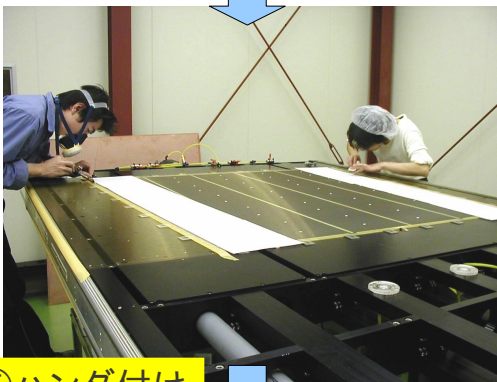
④ワイヤー巻



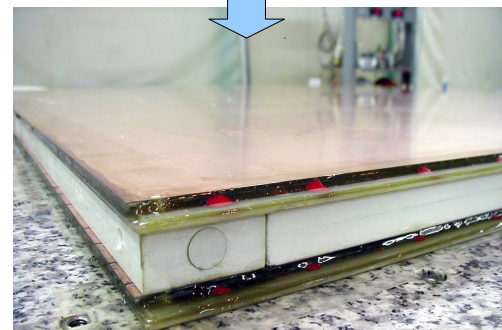
⑦HV試験



②パーツ接着準備



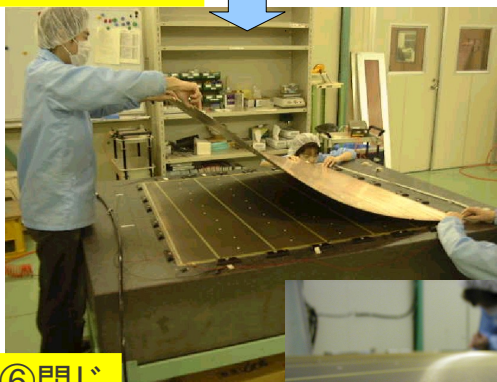
⑤ハンダ付け



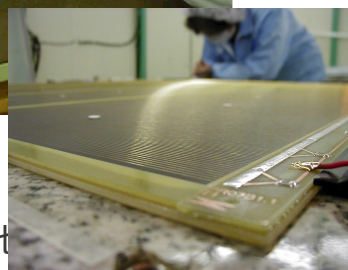
⑧モジュール接着



③パーツ接着



⑥閉じ



神戸大へ

枚数:1224枚
期間:2000年～2005年
場所:KEK富士実験室B4

宇宙線を用いた動作検査

(2002.5 ~ 2005.8)

シンチレーター+PMT (44枚)

ドリフトチューブ (φ5mm, 428本)

検出効率マップ

サポート構造体 (7mm)

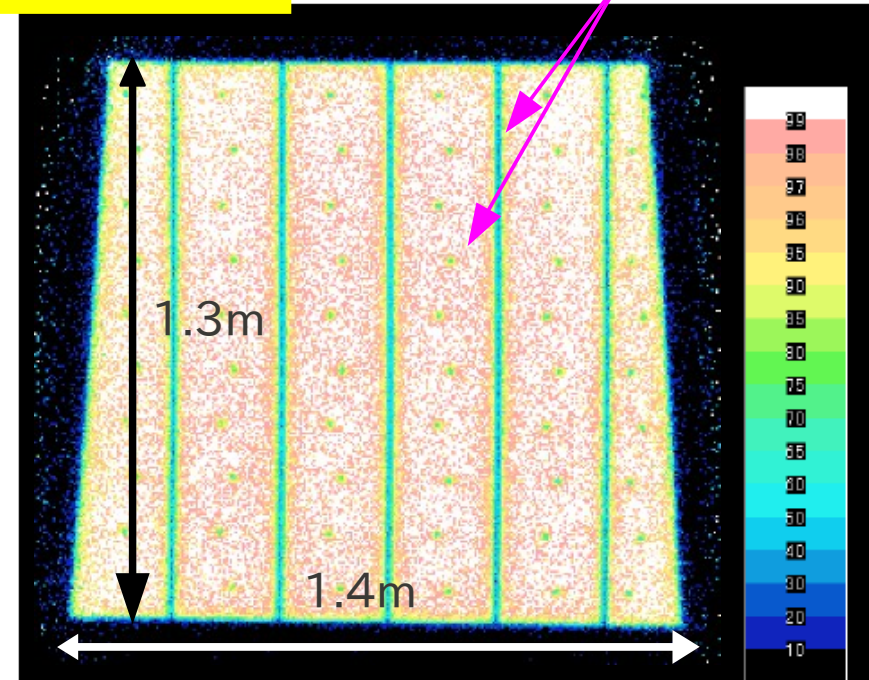
2.6m

TGC検査ステージ(最大24枚)

除湿機

TGC移動用ステージ

宇宙線検査架台



1pixel: 5mm x 5mm → 60k pixels

100tracks/pixel → 6M tracks required

Trigger rate: 20Hz

Tracking Efficiency: 80% → 8 days

Gas replacement: +2days ∴ **10days/set**

①98%以上の検出効率 (トリガー)

②25nsec以下の時間分解能 (バンチ識別)

1224枚 ÷ 24枚/10days = 510days

検査の準備 (1)

(2002.5 ~ 2005.8)

①運搬・受け取り・取り出し

KEK



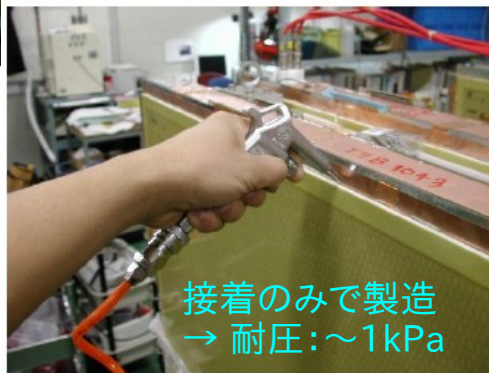
検査の準備 (2)

(2002.5 ~ 2005.8)

②気密性検査



1cc/min以下との闘い

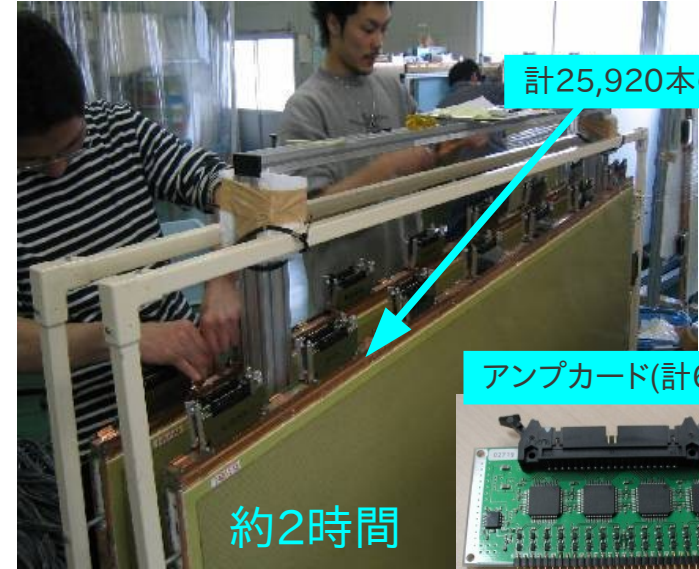


接着のみで製造
→ 耐圧: ~1kPa



加圧して
5分密閉

③アンプカードの取り付け



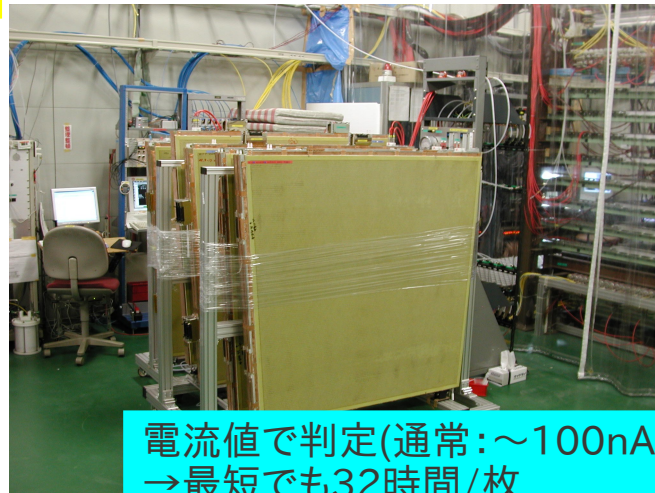
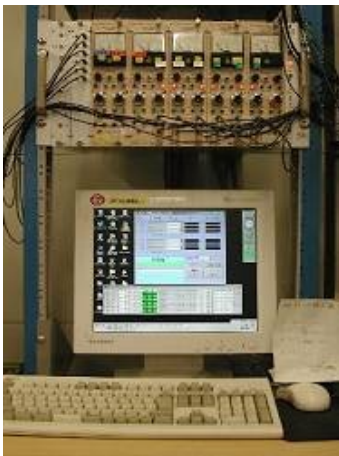
計25,920本のM3ネジ

アンプカード(計6,480枚)

約2時間

+ シールド(錫メッキ銅板)

④高電圧印加試験

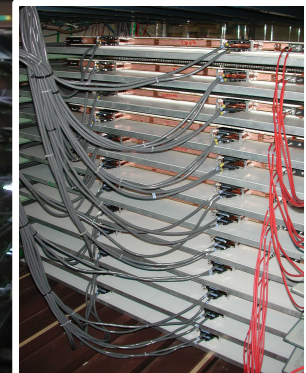


電流値で判定(通常: ~100nA)
→ 最短でも32時間/枚

⑤検査架台への挿入



振動厳禁



シグナルケーブル(144本)

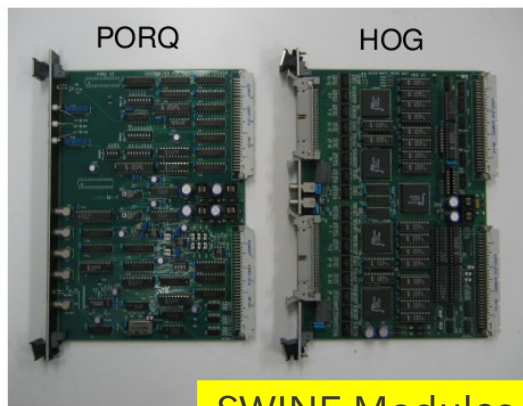
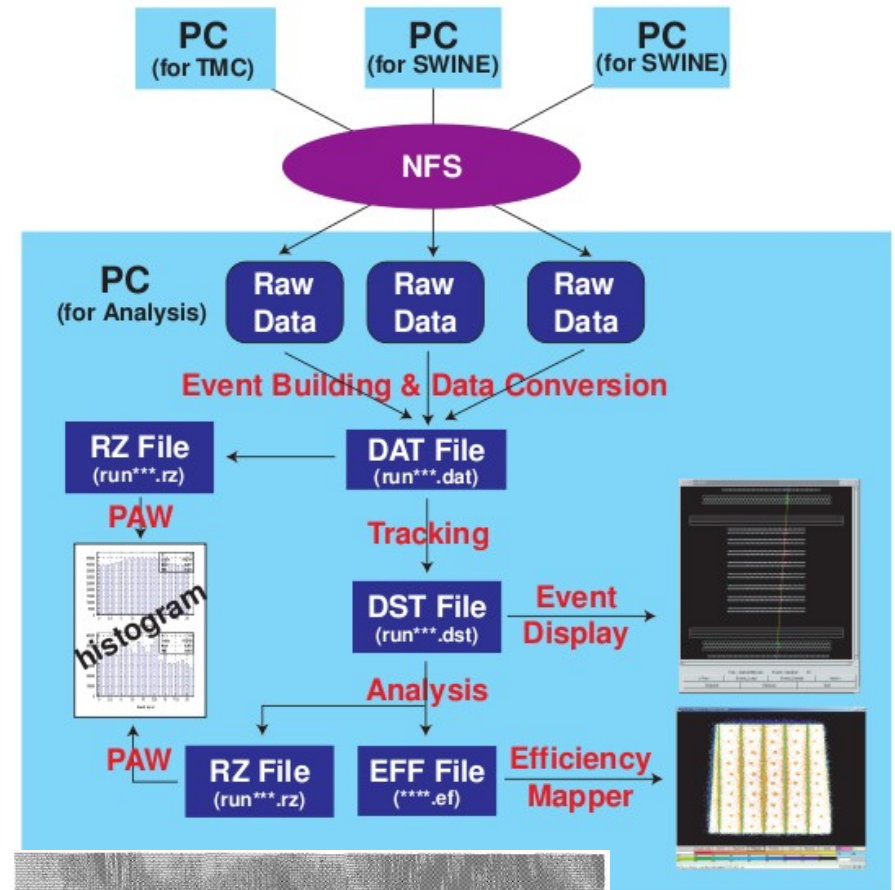
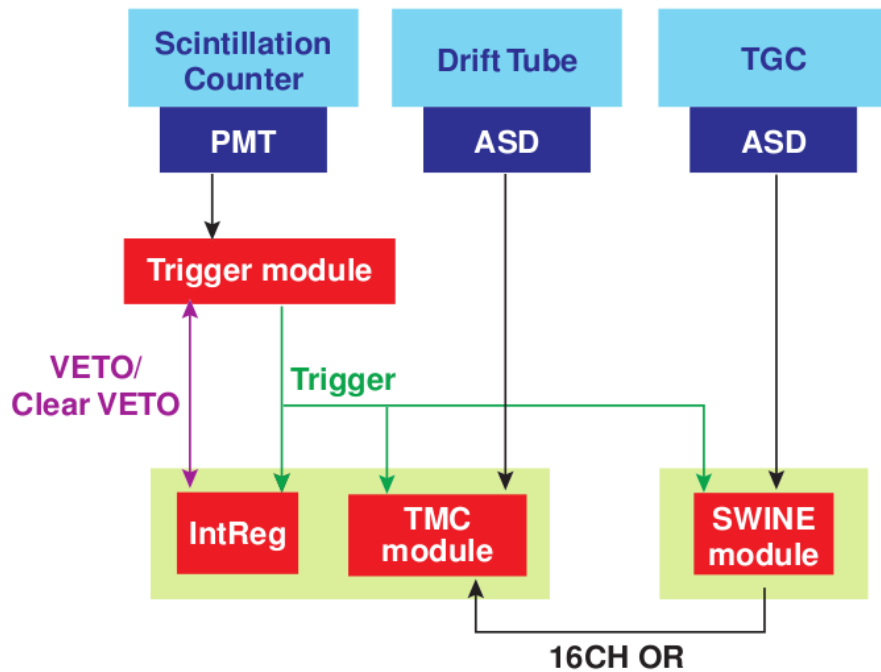
n-Pentane
→ framable!

2010/7/21

1週間に20枚以上を準備 → シフト体制 (最大8人)

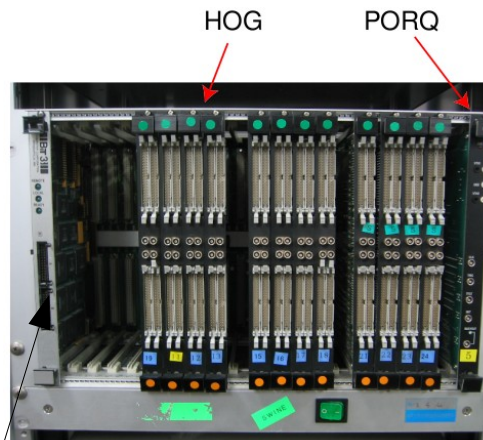
21/43

DAQ for cosmic test

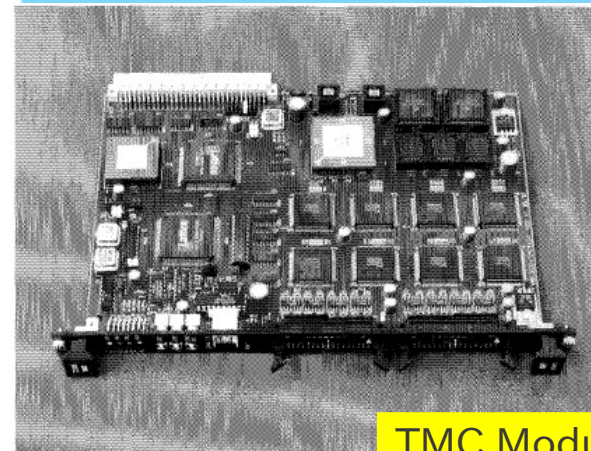


SWINE Modules

- + SWINE = Super Wire Net Encoder
- + PORQ = Pulse On ReQuest
- + HOG = Hold On Go



SBS Bit3



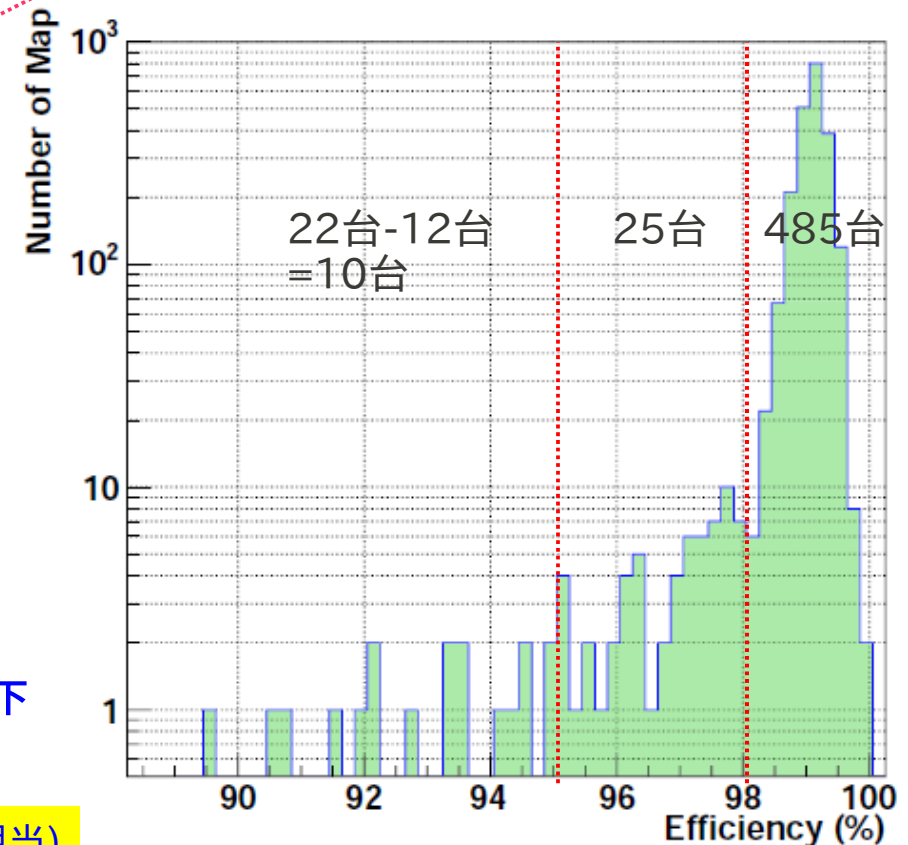
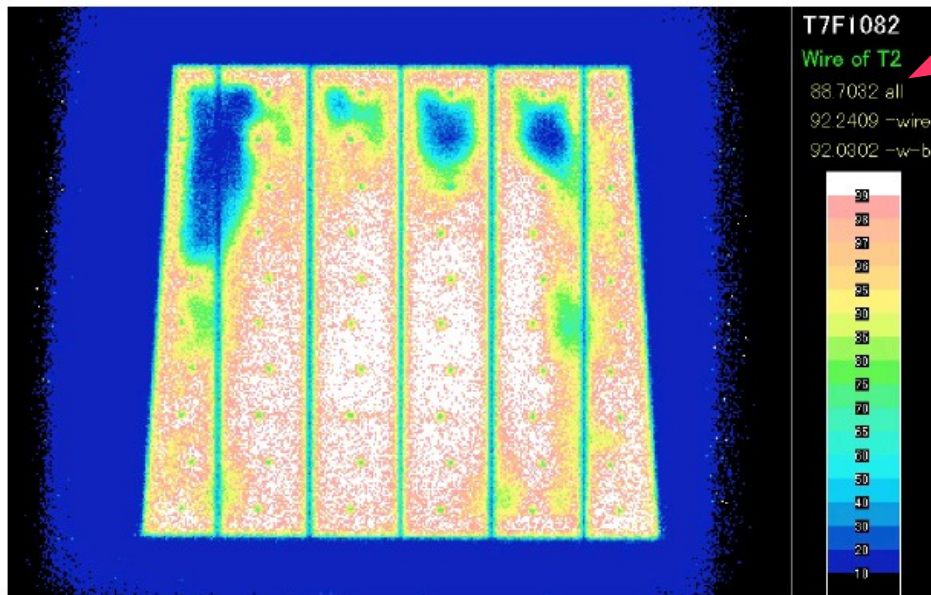
TMC Module

0.78ns/count

日本製TGCの品質評価

(2002.5 ~ 2005.8)

Type	Production	Gas Tightness	Leakage	HV	HV Short	Cosmic OK	low eff
T7T	113	112	1	111	1	99	12
T7D4	106	106	0	106	0	106	0
T7D6	109	109	0	106	3	106	0
T4	107	105	2	104	1	104	0
T5	107	106	1	105	1	105	0
Total	542	538	4	532	6	520	12



生産初期の動作不良チェンバー

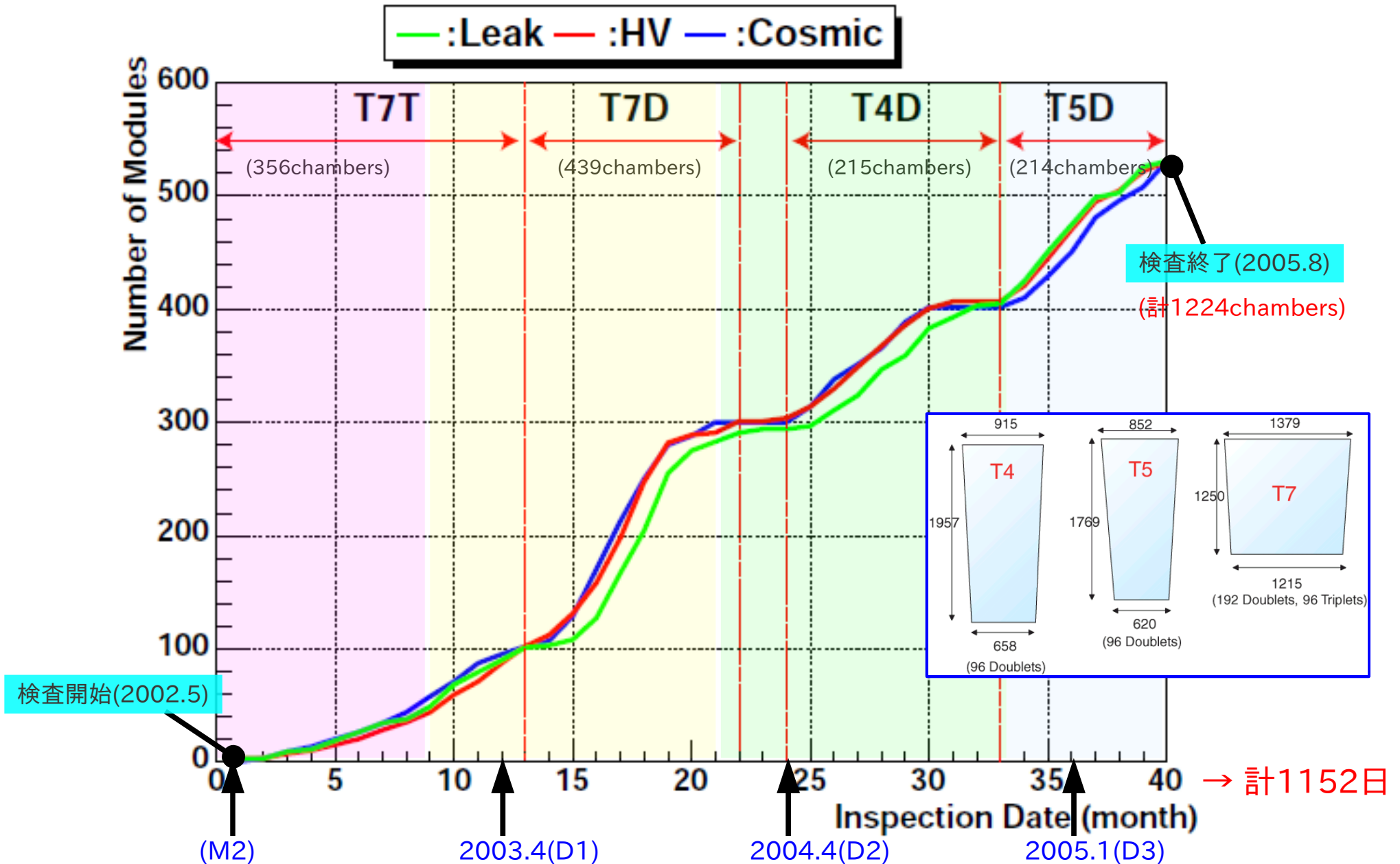
平面性の不良($\sim 400\mu\text{m}$)により、局所的に電場が低下

→ ガスゲインが低下し、検出効率が低下した。

接着剤の剥離

($100\mu\text{m} \sim 100\text{V}$ に相当)

検査の進捗



CERNへの運搬

(2002.5 ~ 2005.8)

⑥運搬準備



⑦運搬業者への引き渡し



⑧神戸港より輸送



⑨CERNにて受け取り検査



合計4回にわたり輸送 → 断線・破損なし

実機運用に向けて

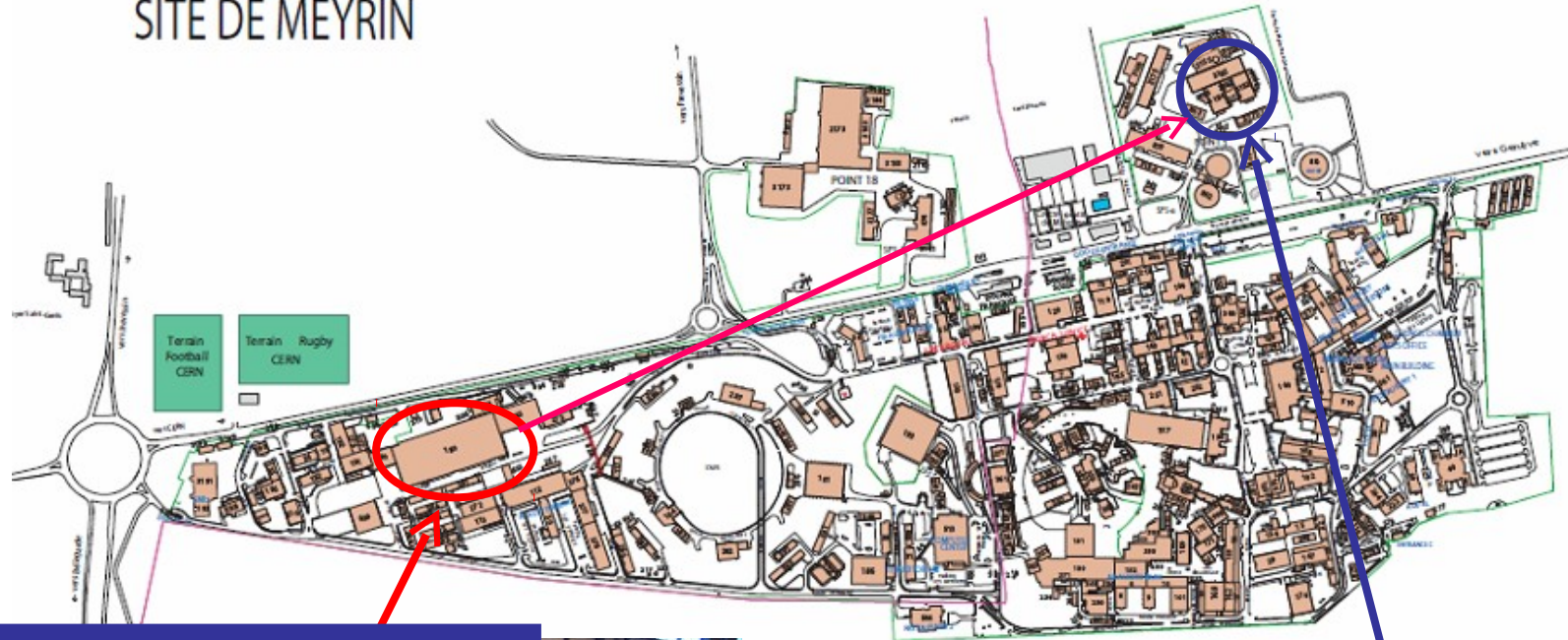
研究対象：直径25mのミュオントリガーシステム



高所作業用車両 免許取得(日本人では3人だけ)

Working area @ CERN

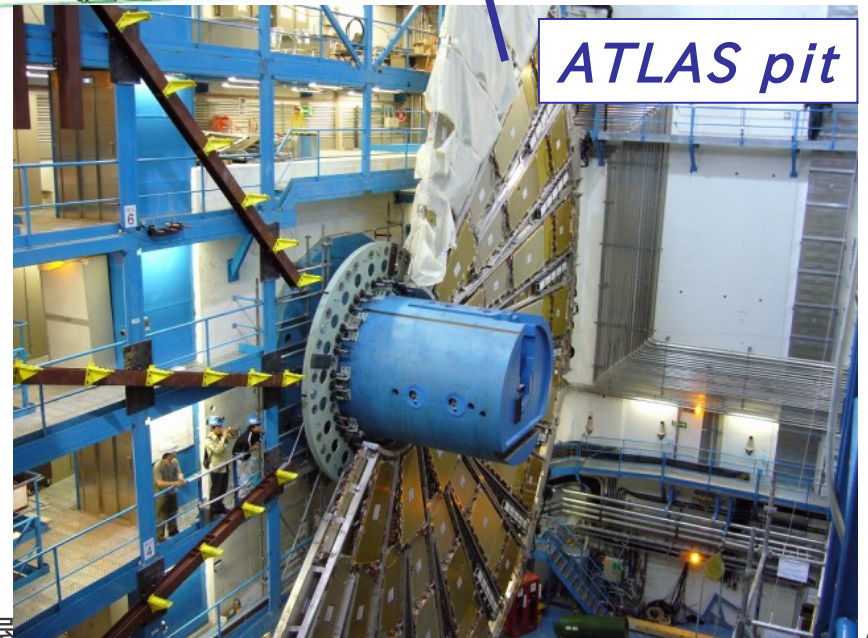
SITE DE MEYRIN



Storage of 1/12 sector



ATLAS pit



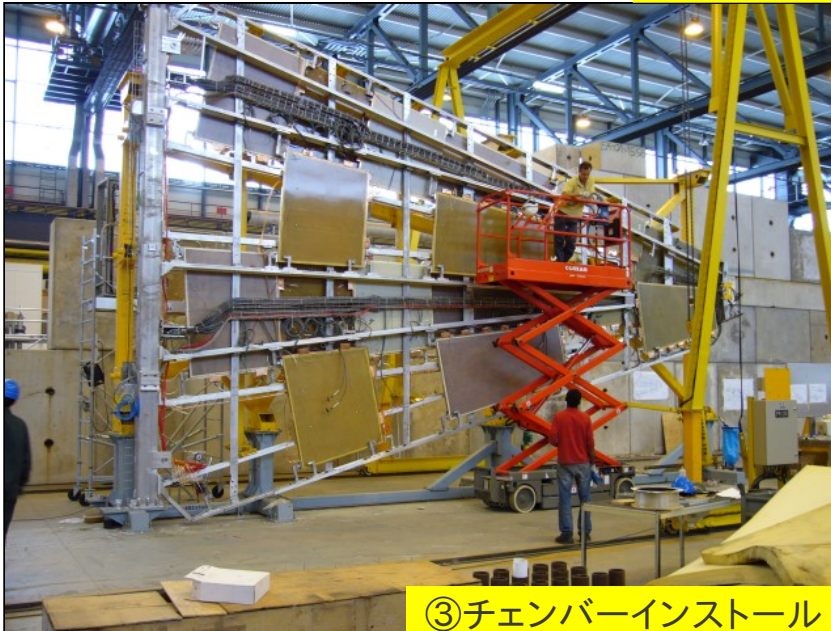
1/12セクターの組み立て作業



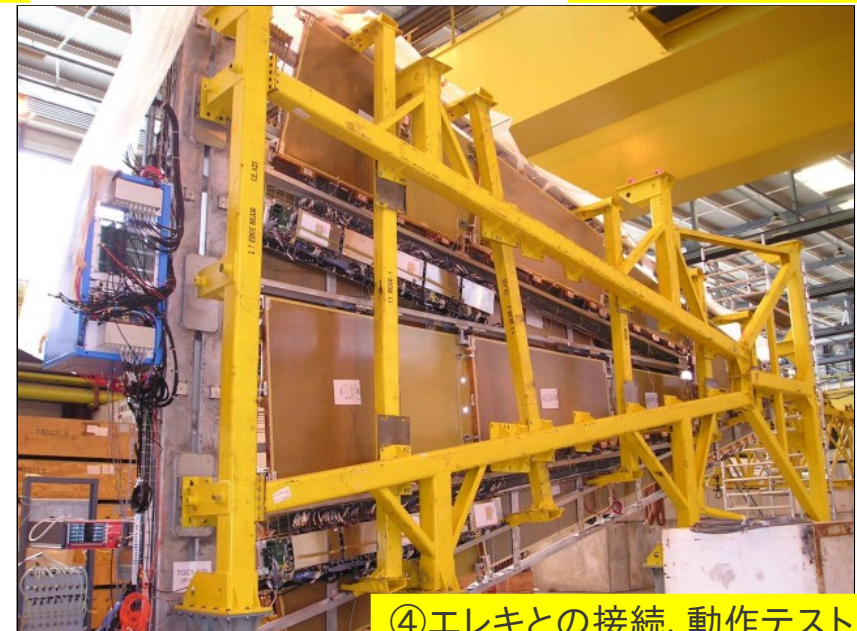
①気密性試験



②アルミフレーム作り



③チェンバーインストール

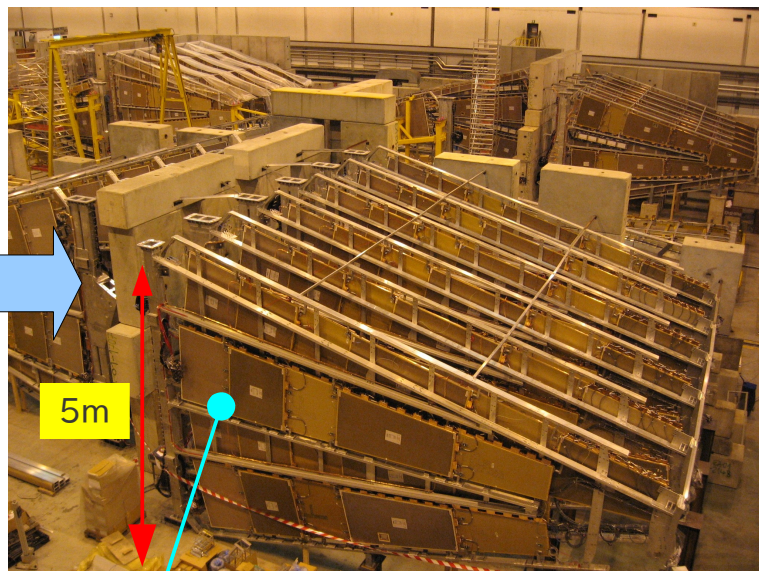


④エレキとの接続、動作テスト

地上動作試験 & 地下実験ホールへの設置

(2006.7 ~ 2007.9)

神戸、イスラエル、中国



TGC

1/12セクター (計72枚)

フロントエンド回路ボックス(計672箱)
CAT6ケーブル (約3500本)
96pinツイストケーブル(約1万本)

①擬似信号(テストパルス)

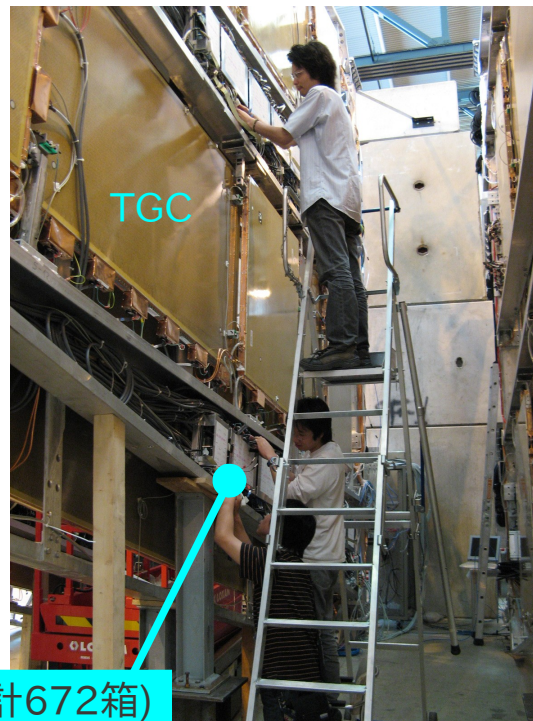
+ 回路系、ケーブルリングのチェック

②宇宙線

+ 検出器の応答、HV線のスワップチェック

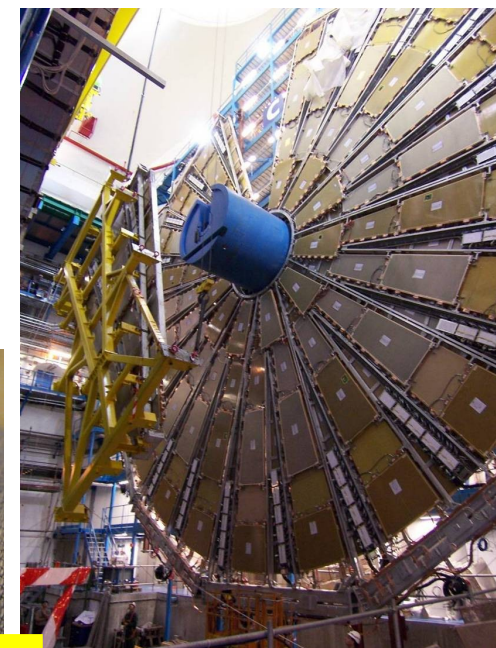
100個近くのICが故障する事故

→ ビニール袋との摩擦により、CAT6ケーブルが
静電気帯電し、静電破壊(数百Vになることも)

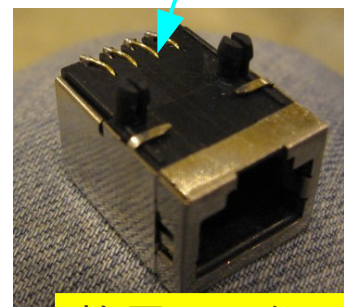


TGC

実働:4~5人
14ヶ月で48枚を検査

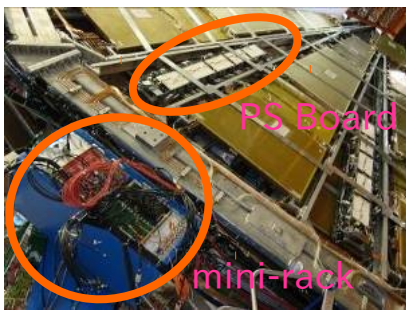


シールド(GND)と短絡



放電用コネクタ

もう一度エレキのおさらい

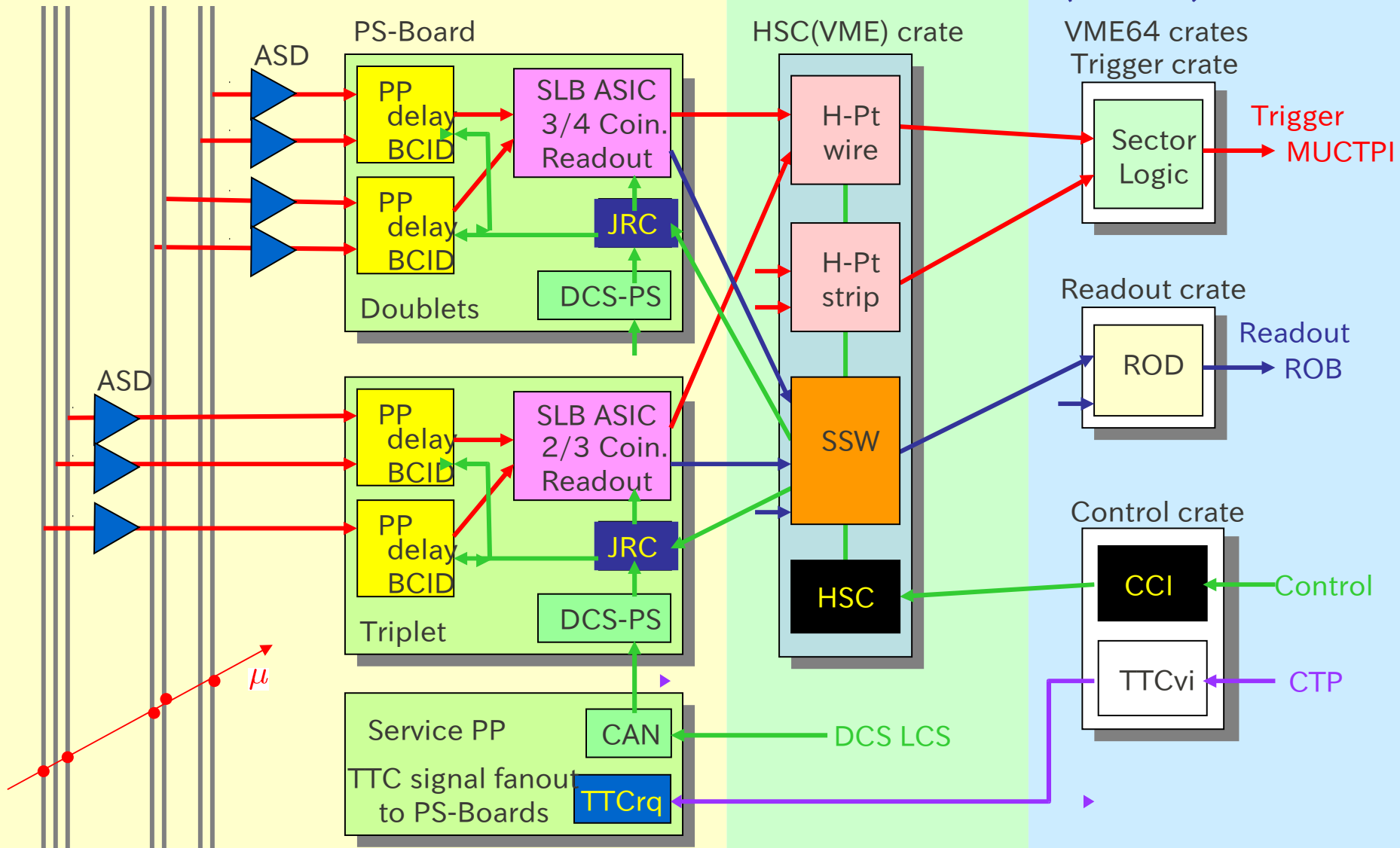


TGC1 TGC2 TGC3

*On TGC chambers
(PS Pack)*

*Big Wheel edge
(mini-rack)*

*Counting Room
(USA15)*



回路モジュールの設置

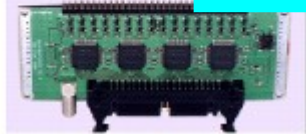
(2006.11 ~ 2009.10)

単品を機能としてまとめ上げ、動作させる研究

On Detector Electronics



総読み出しチャンネル: 320k



ASD: 20704枚



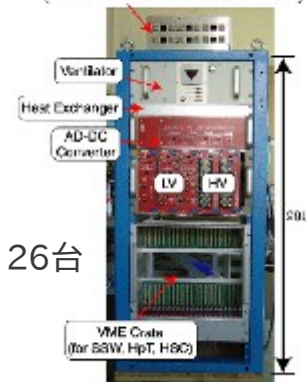
PSpack: 672パック

計17種類

CAT6ケーブル: 3500本

VME Crate on Detector

(LV Distributor Box for PS boards and ASD)



HSC: 30枚



SSW: 224枚



HPT: 192枚

内部配線 光ファイバー: 1220本

光ファイバー(100m): 1220本

Electronics Hut



VMEクレート: 13台



SBC: 21枚



LTP: 2枚



CCI: 30枚



TTC: 2枚



ROD: 24枚



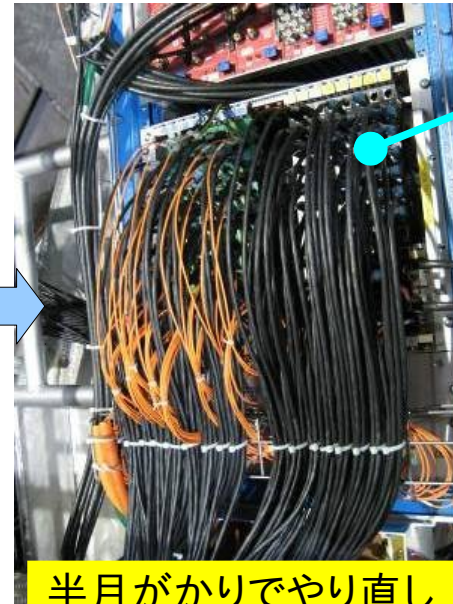
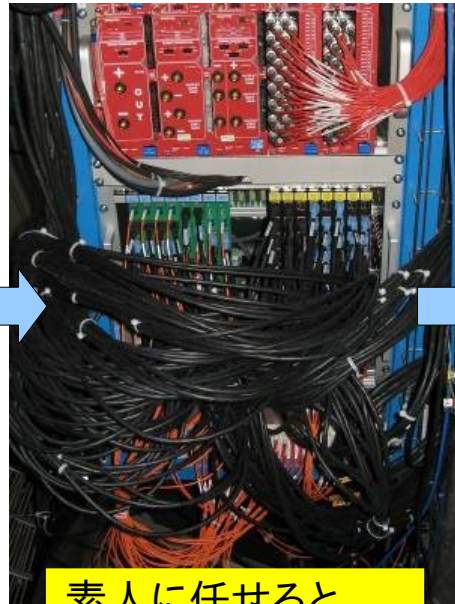
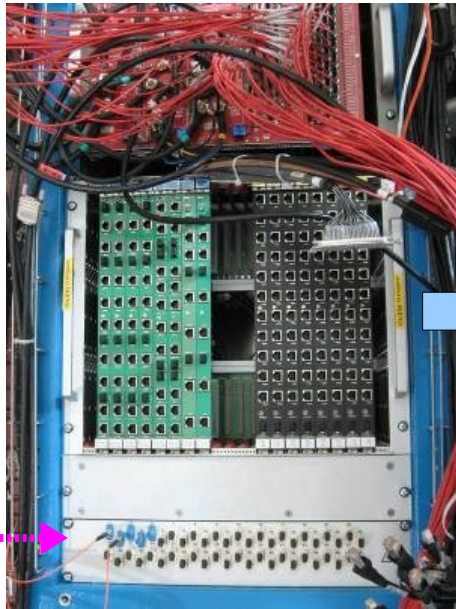
Sector Logic: 72枚

内部接続 光ファイバー: 1220本

583枚のVMEモジュールの動作を確認(20枚以上の故障品を交換)

インフラ整備

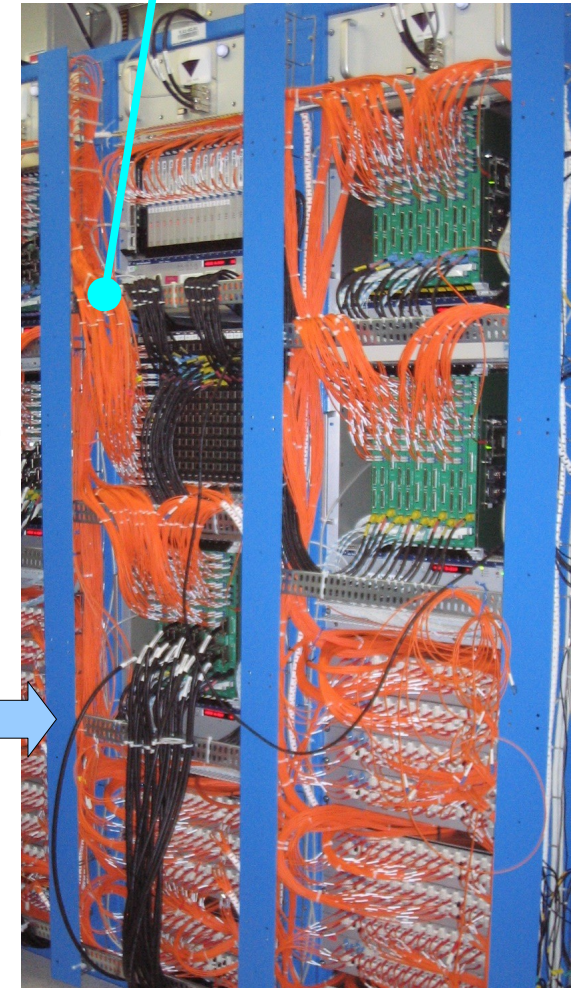
(2006.11 ~ 2009.10)



(4時間 x 24ラック)

ラッチの確認
ケーブルの色分け
ラベルの見易さ(bとd)

東ね方、遊ばせ方に一苦勞



100m光ファイバー

CAT6ケーブル(3,500本)

+ Trigger : ~160ch/本

+ Readout : ~160ch/本

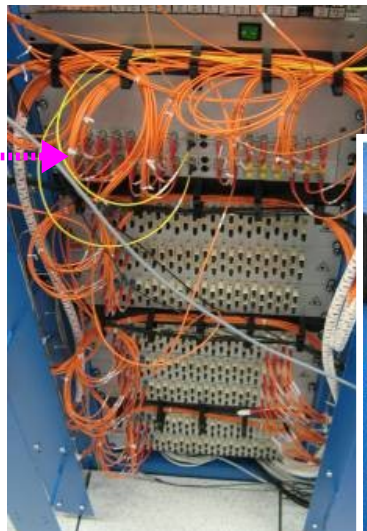
光ファイバー (3,900本)

+ Trigger : ~ 600ch/本

+ Readout : ~1,200ch/本

①信頼性

②メンテナンス性

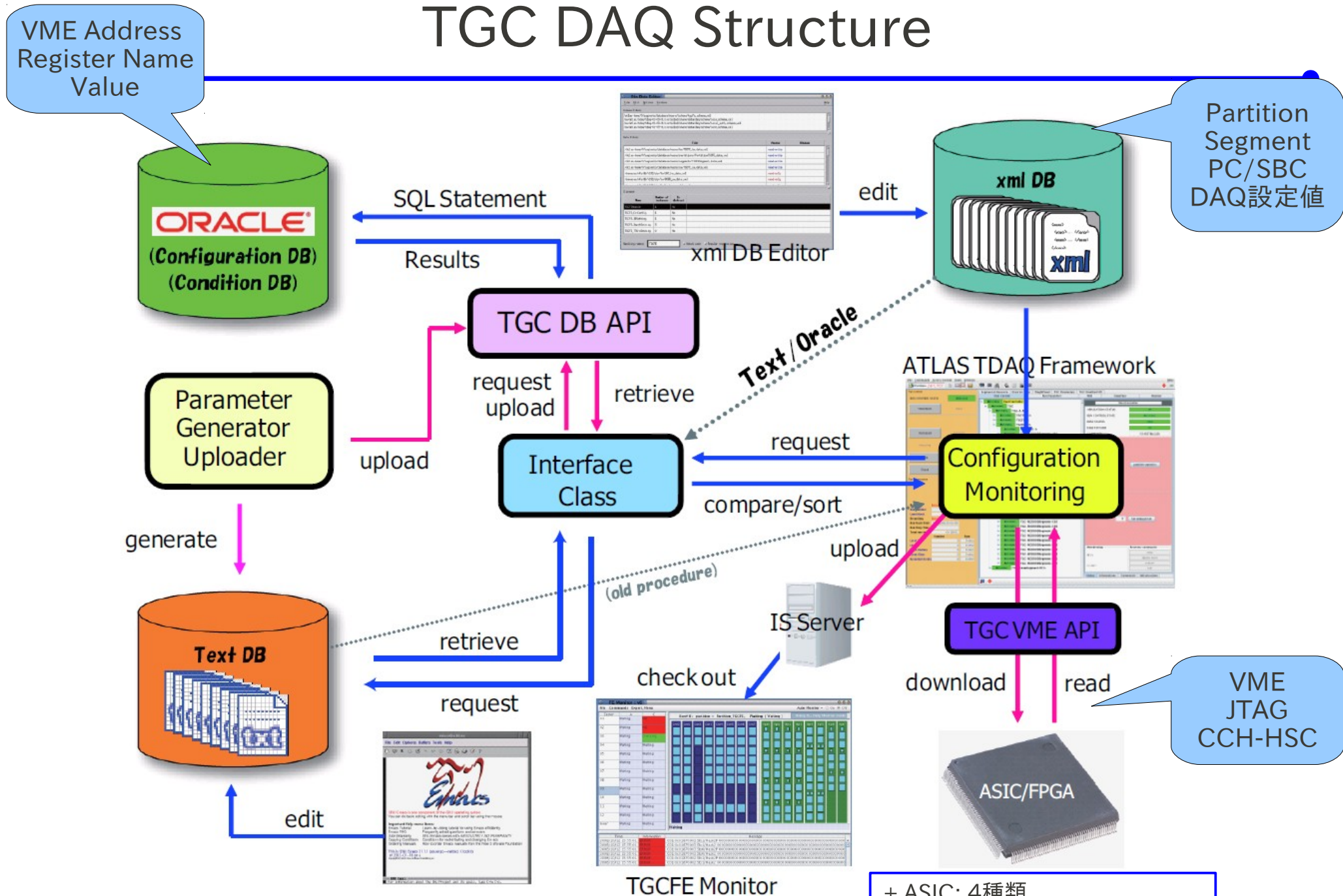


3回張り直して最終形に
杉本拓也 (名古屋大学)

100本以上のスワップを修正
ファイバーの破損はなし!

2010/7/21

TGC DAQ Structure



実働:6人(日本+イスラエル)

2010/7/21

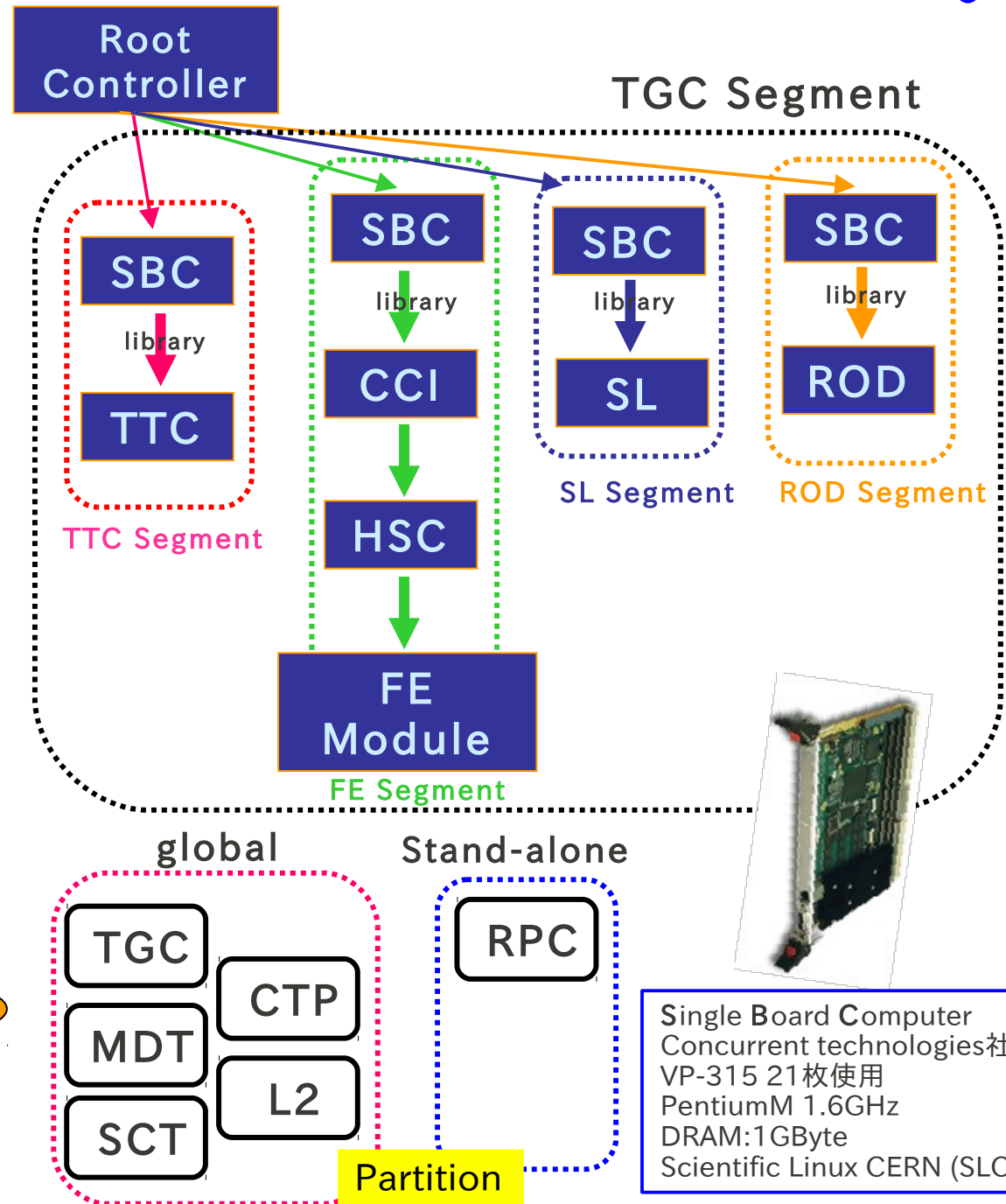
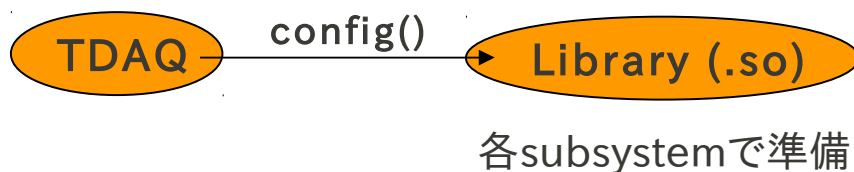
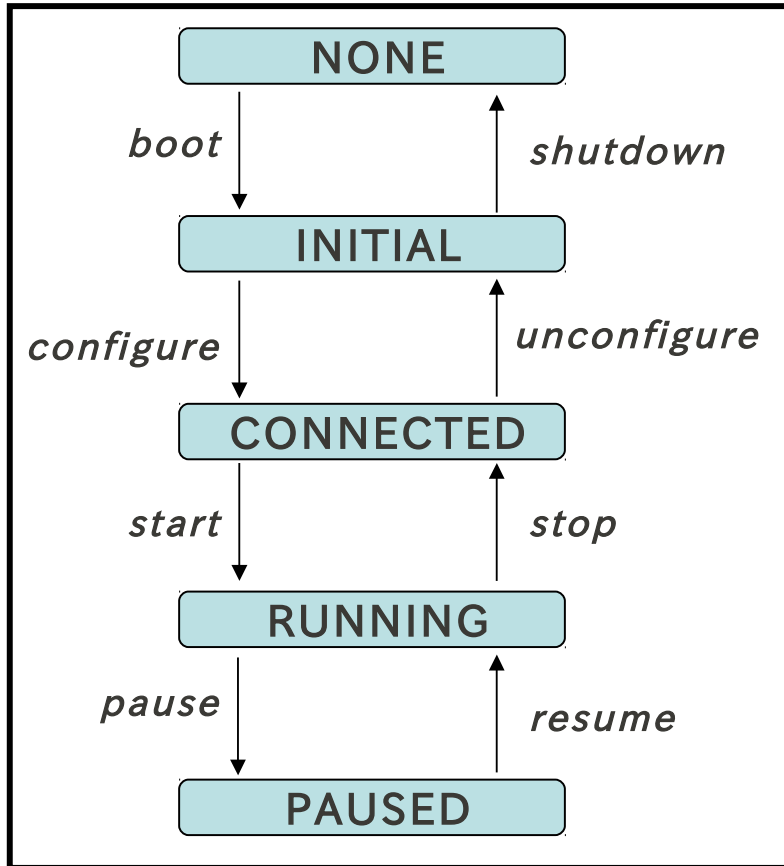
杉本拓也 (名古屋大学)

- + ASIC: 4種類
- + FPGA: 3種類
- + 設定レジスタ数 : 50種 150k
- + 総データ量: 450k byte

33/43

ATLAS DAQ Framework (1)

ATLAS TDAQ State Machine



ATLAS TDAQ Framework (2)

ATLAS TDAQ Software Graphical User Interface - Expert Control

File Commands Access Control Tools Settings Help

Partition part_TGCFE

使用中の partition

Run Control STATE: RUNNING

Shutdown Boot

Unconfig Config

Stop Start

Pause Continue

Run Parameters

Run type: TestPulse

Run number: 10029

Event number: 0

Event rate: 0

Recording: Enable

Run Start Time: 25/05/07 19:00:54

Run Stop Time:

Integrated active run time: 00:03:51

Stateのコントロール

各Segmentの状態

Monitor Segment & Resource Data Set Tags Infrastructure

Run Control Run Parameter MRS PMG DataFlow

RootController

APPLICATION STATUS: UP

RUN CONTROL STATE: RUNNING

BUSY STATUS: FREE

FAULT STATUS: OK

COMMAND: PUBLISH

Operational Monitoring

publish state publish statistics

Debug Level Control

0 Set debug level

Membership

IN OUT

Recovery commands

retry ignore error clear error kill

Status Informations Commands

Runの情報

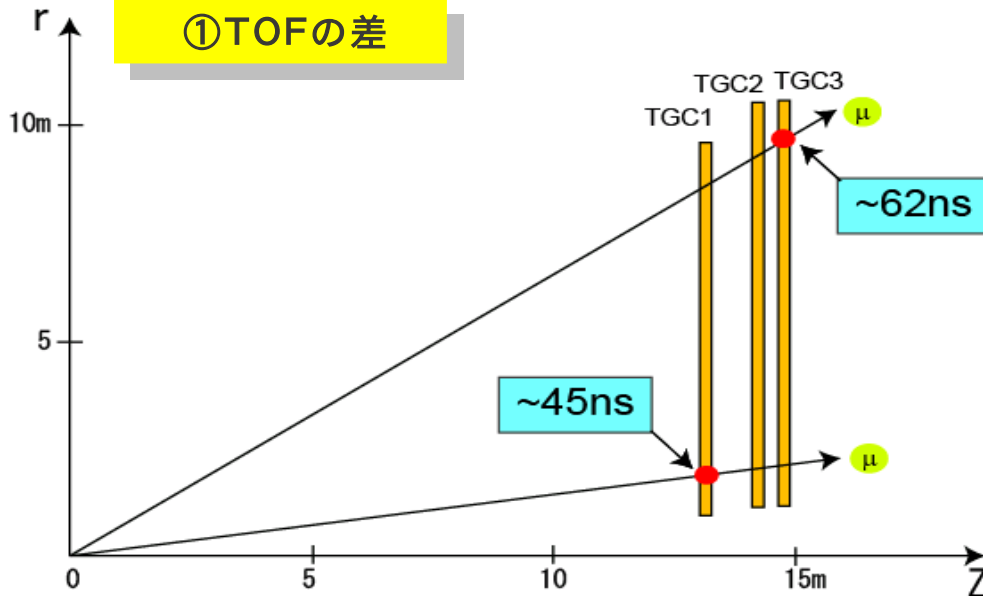
エラーなどの情報

18:37:36	INFORMATION	INTERNAL	No RunTags List Found in DB or list is empty. Nothing to Display in DSPanel
18:37:35	INFORMATION	INTERNAL	Partition infrastructure set up successfully. Main IGUI is starting...
18:37:24	INFORMATION	INTERNAL	Partition h/w verification successfull, continue with infrastructure setup
18:37:22	INFORMATION	INTERNAL	Continue with H/W verification
18:37:22	INFORMATION	INTERNAL	PMG setup successfull
18:37:20	INFORMATION	INTERNAL	Infrastructure not initialized yet. Setting up PMG agents for partition
18:37:20	INFORMATION	INTERNAL	Connected to Setup Manager. Getting status of infrastructure...
18:37:20	INFORMATION	INTERNAL	Connecting to Setup Manager in partition part_TGCFE

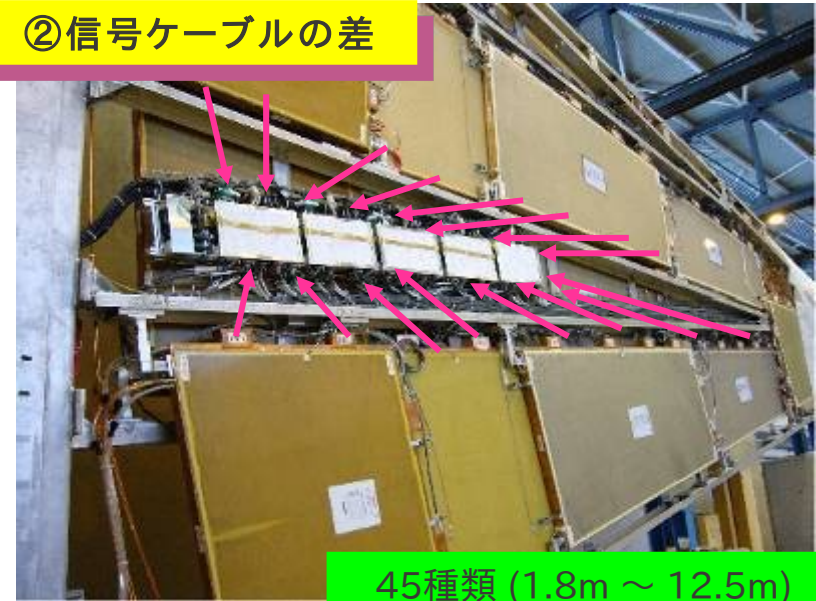
07:04:52 PM

Timing合わせ (1)

① TOFの差

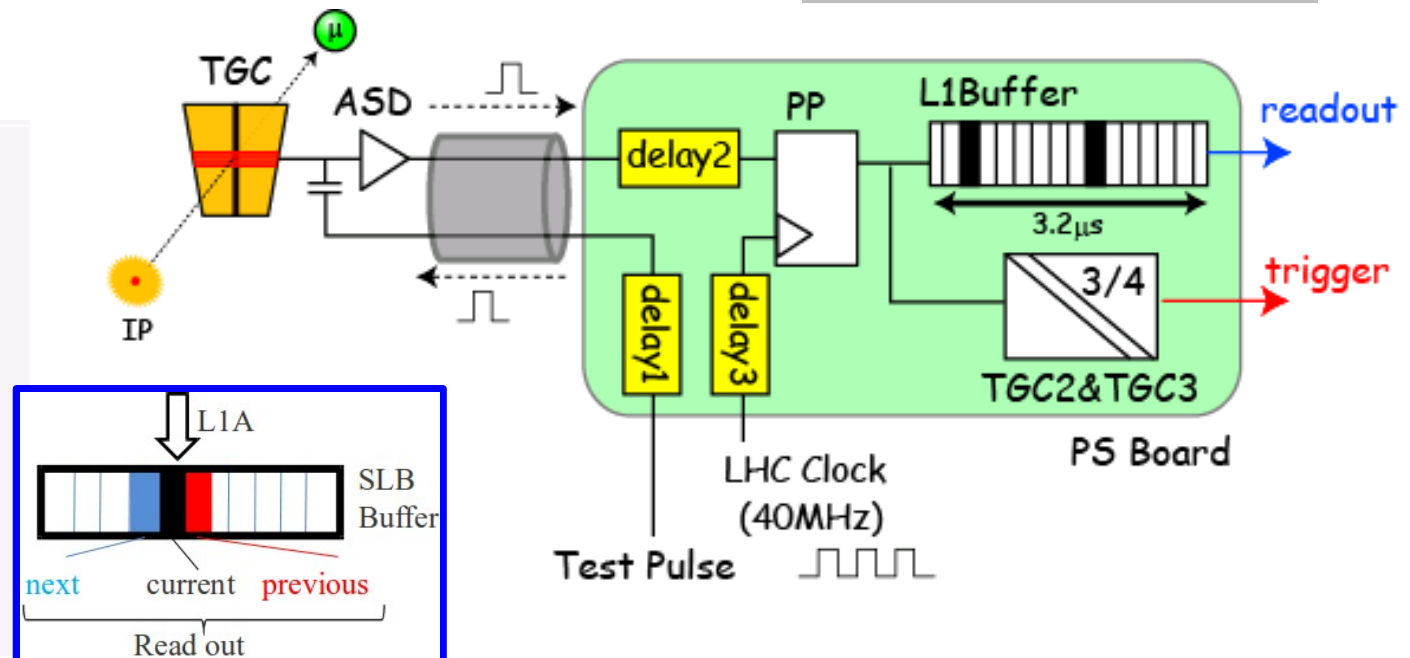
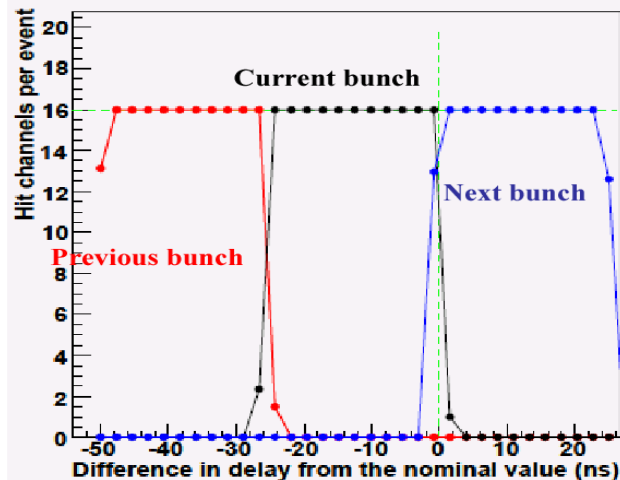


② 信号ケーブルの差



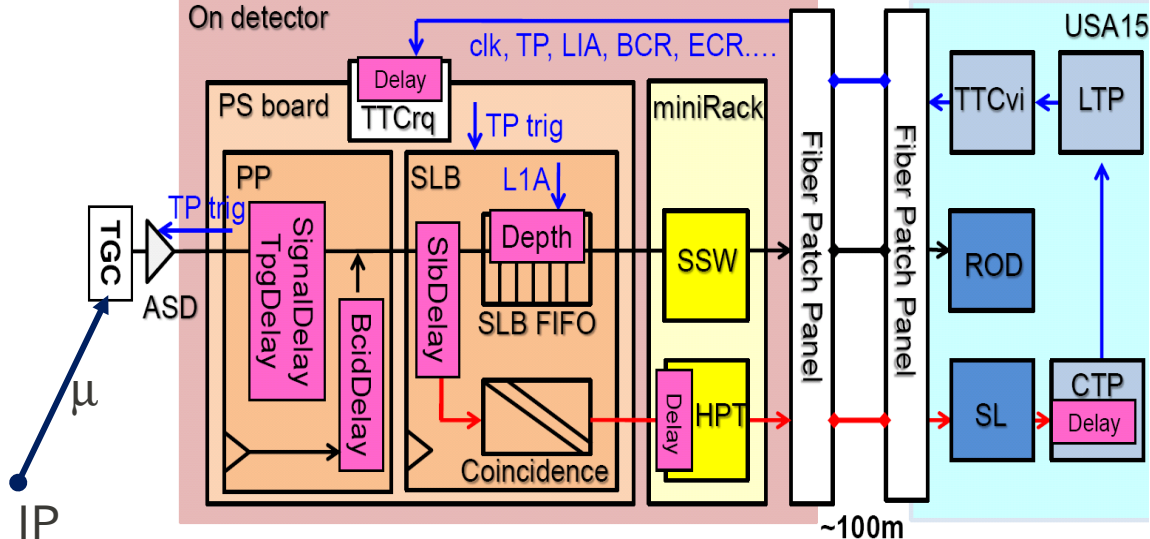
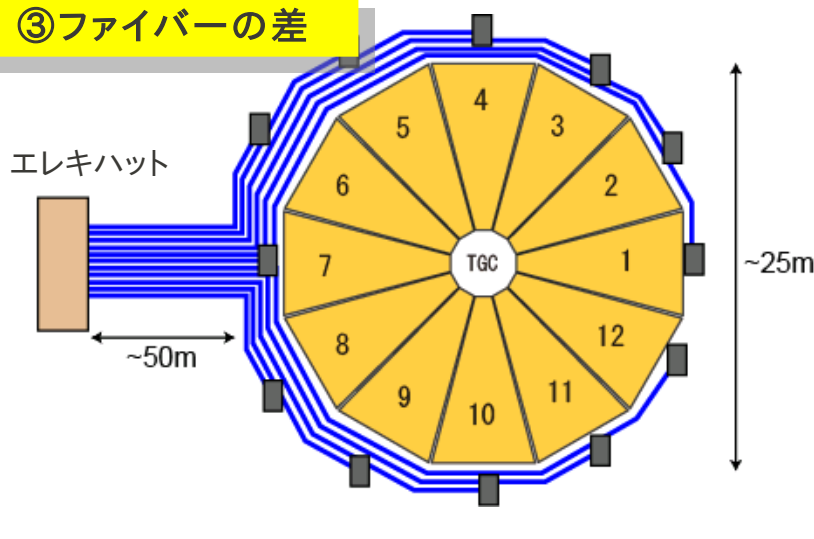
$$65.3 < \textcircled{1} + \textcircled{2} < 116.0\text{nsec}$$

Delay scan using Test Pulse

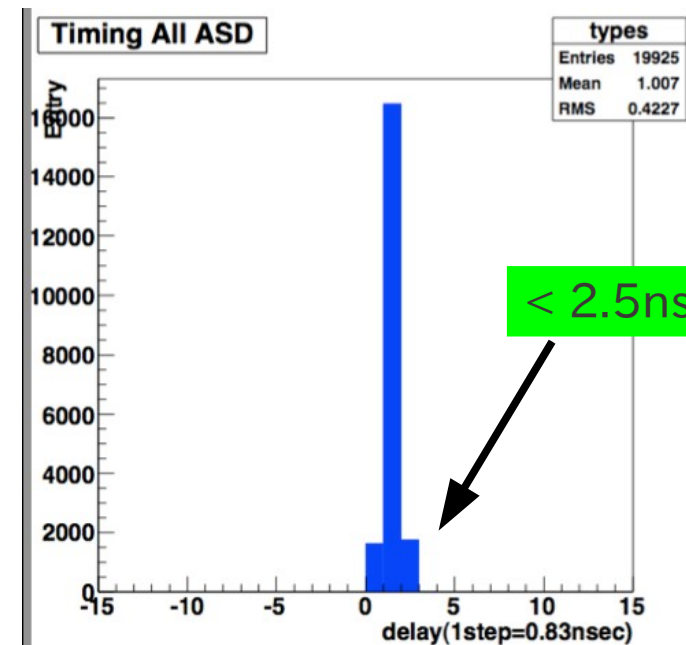
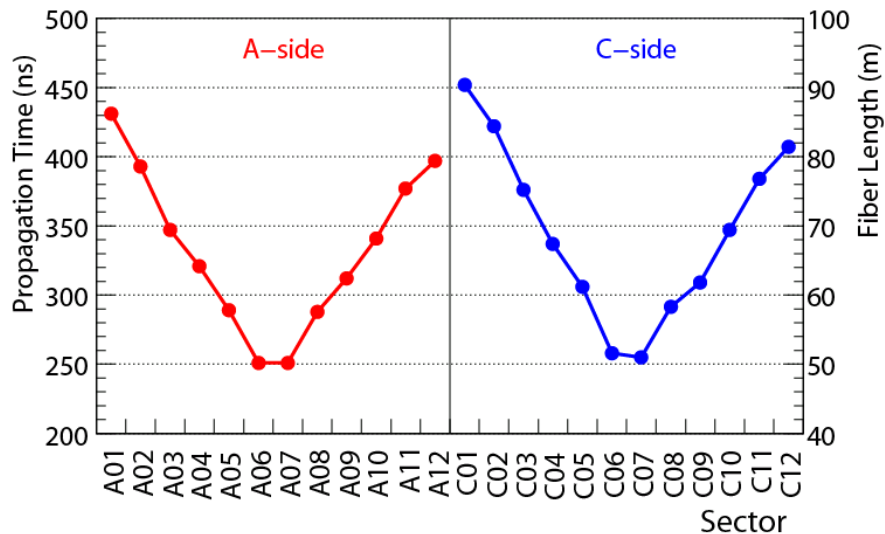


Timing合わせ (2)

③ファイバーの差



パルスの往復時間で測定



実験開始に向けて (1)

(2007.6 ~ 2009.10)

ATLAS統合試運転キャンペーン

宇宙線を使ったコミッショニング

	期間	TGCセクター数
2007		
1	6/4~6/18	1
2	8/23~9/3	1
3	10/1~10/7	3
4	10/22~11/5	6
5	12/3~12/10	6
2008		
6	3/3~3/9	6
7	4/11~4/16	6
8	5/19~5/25	7
9	5/29~6/3	13
10	7/11~7/20	19

2008.8.24
フルシステム(12x2=24セクター)での
読み出し/トリガーに成功

2008.9.10 陽子初周回

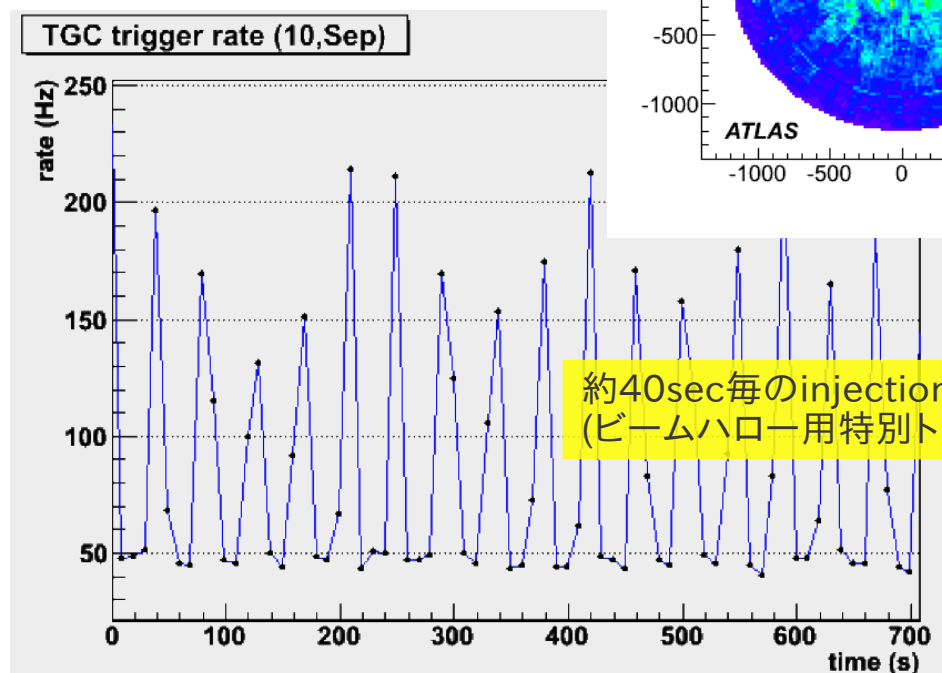
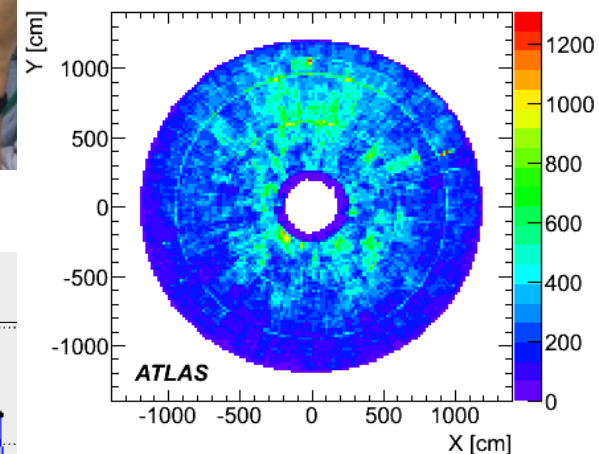
2010/7/21 → その後ヘリウム漏れ事故。。。orz

Commissioning中のATLAS Control Room



前ATLAS Muon Project Leader

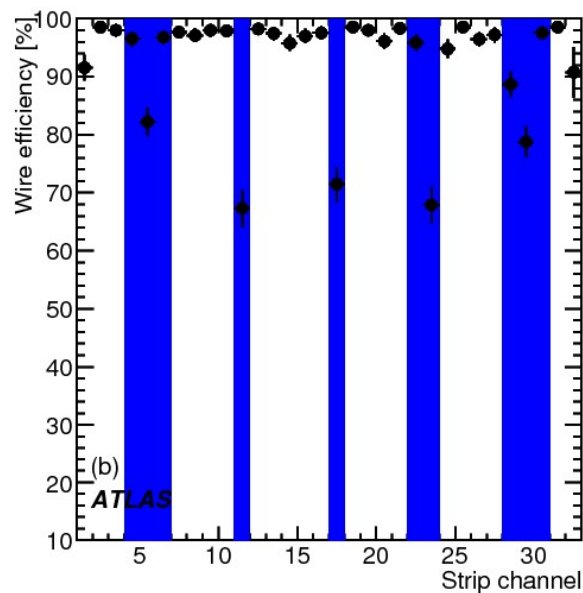
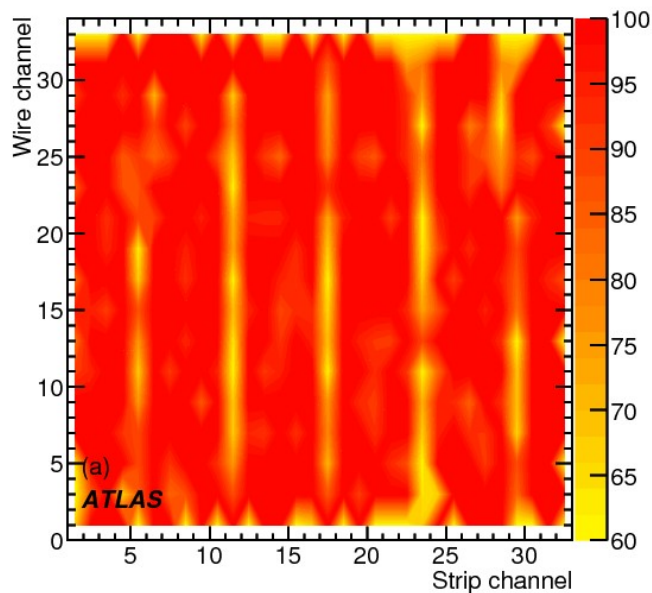
宇宙線によるヒットマップ



約40sec毎のinjectionに同期
(ビームハロー用特別トリガー設定)

実験開始に向けて(2)

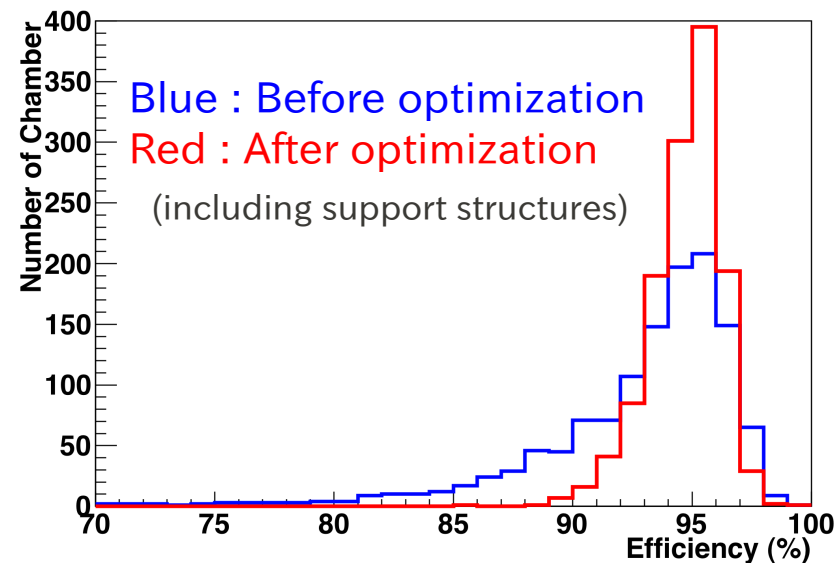
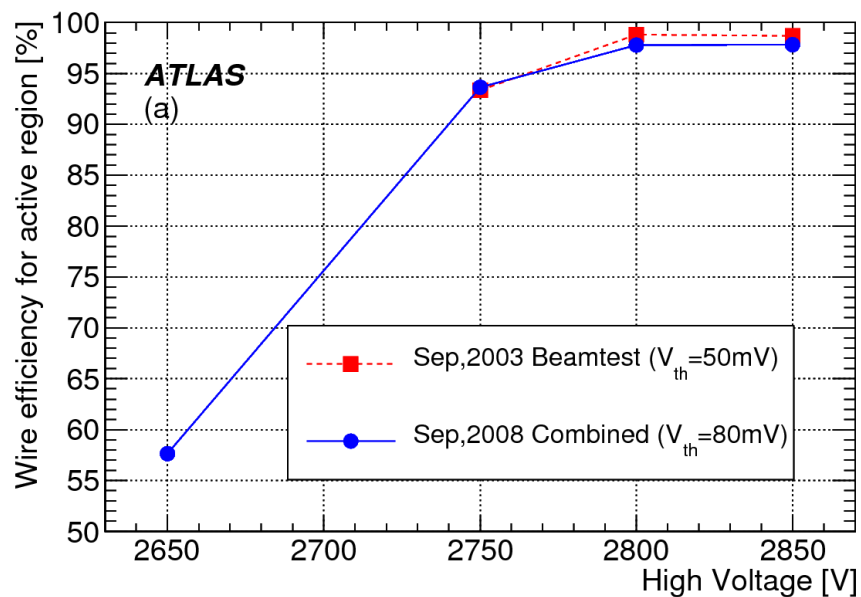
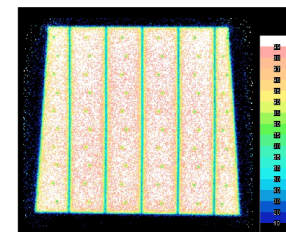
(2006.11 ~ 2009.10)



宇宙線を用いた
動作環境の最適化

HV (2.8kV, 2.85kV, 2.9kV)
Vth (60mV ~ 120mV)

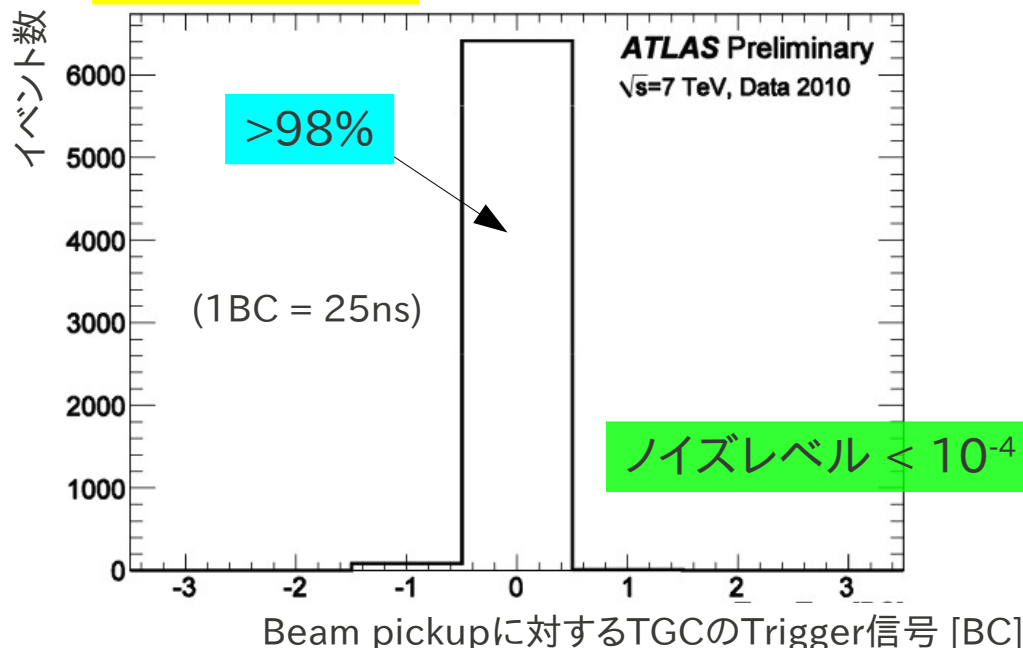
ノイズレベル < 10^{-4}



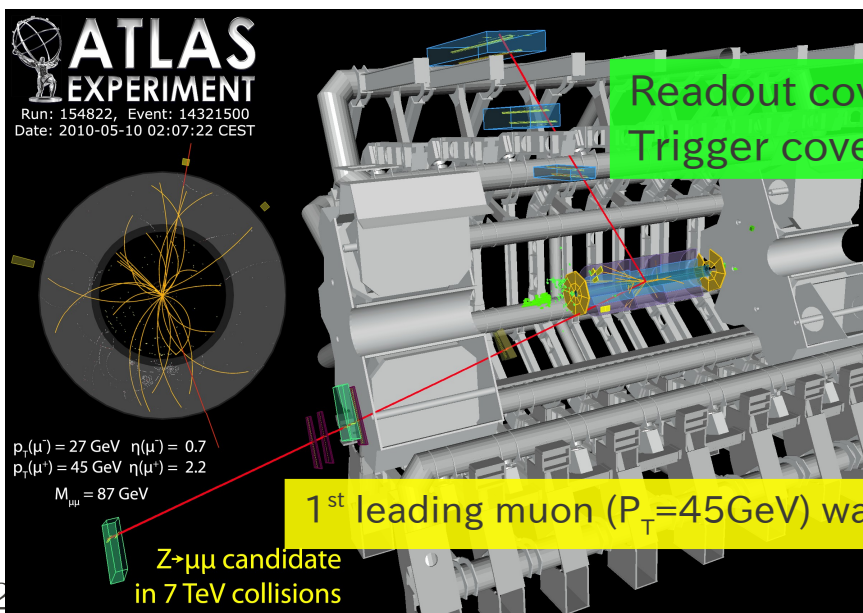
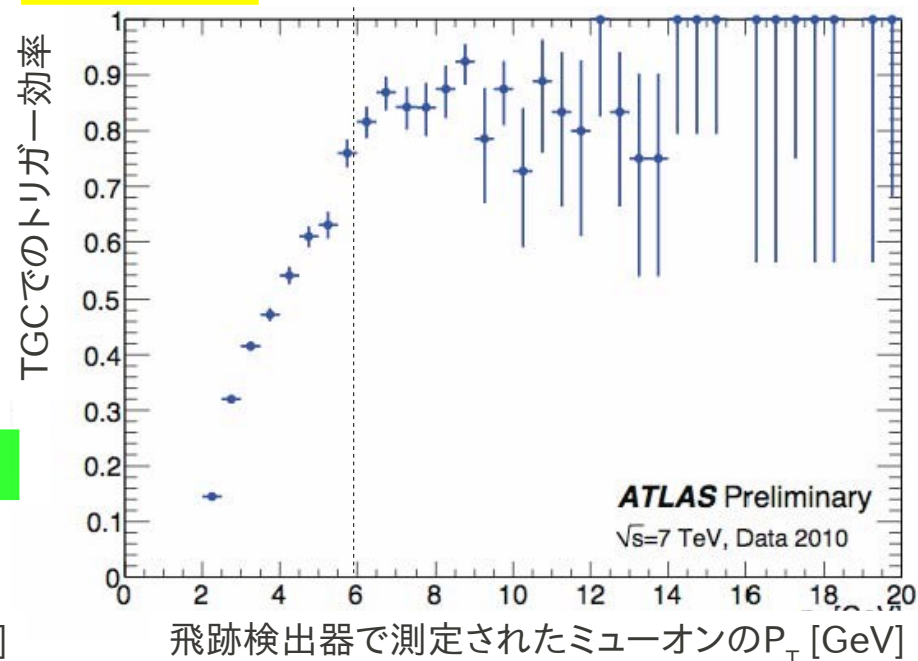
陽子衝突事象を用いたシステム評価

(2010.3 ~)

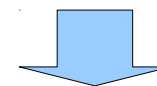
トリガータイミング



トリガー効率



- ①高い検出効率 (トリガー)
- ②早い時間応答 (バンチ識別)

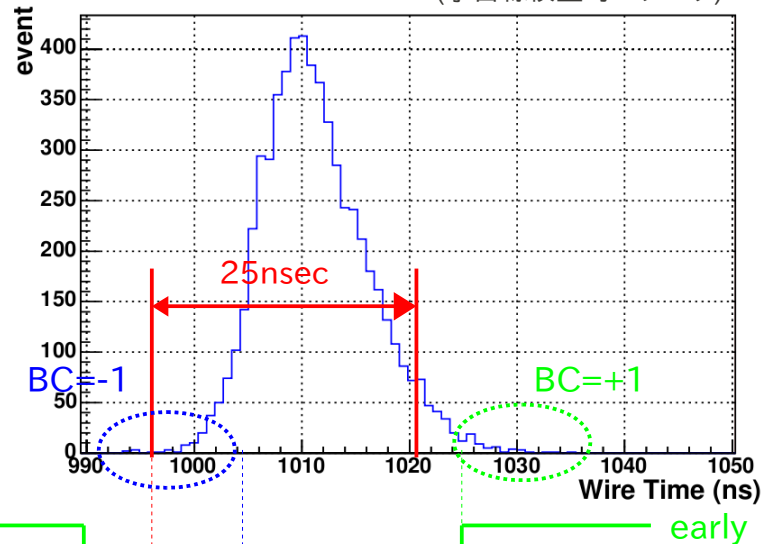


設計性能を満たす
システムを構築した

ナノ秒の精度を目指して

TGCのTDC分布(wire)

(宇宙線検査時のデータ)



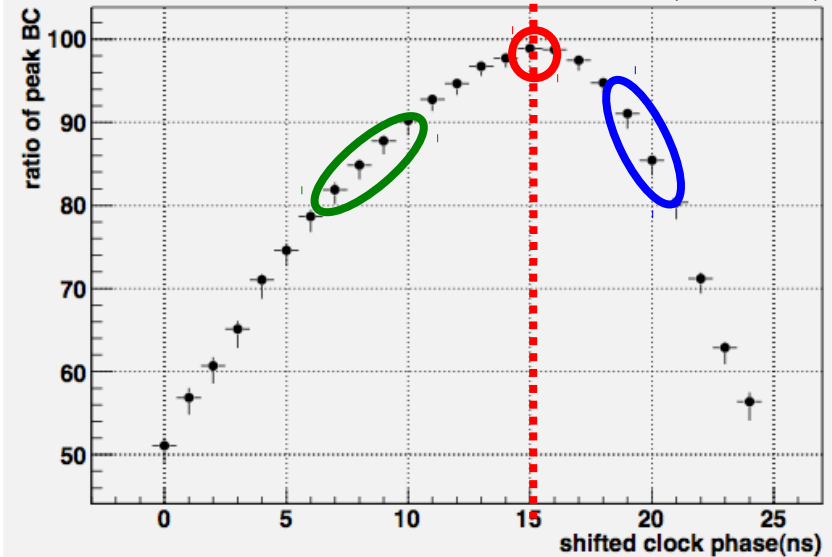
Gate信号のタイミング = LHC RF Clockのタイミング

(40.079MHz)

Clockのタイミングを変えてスキャン!

ratio of # hits in BC=0

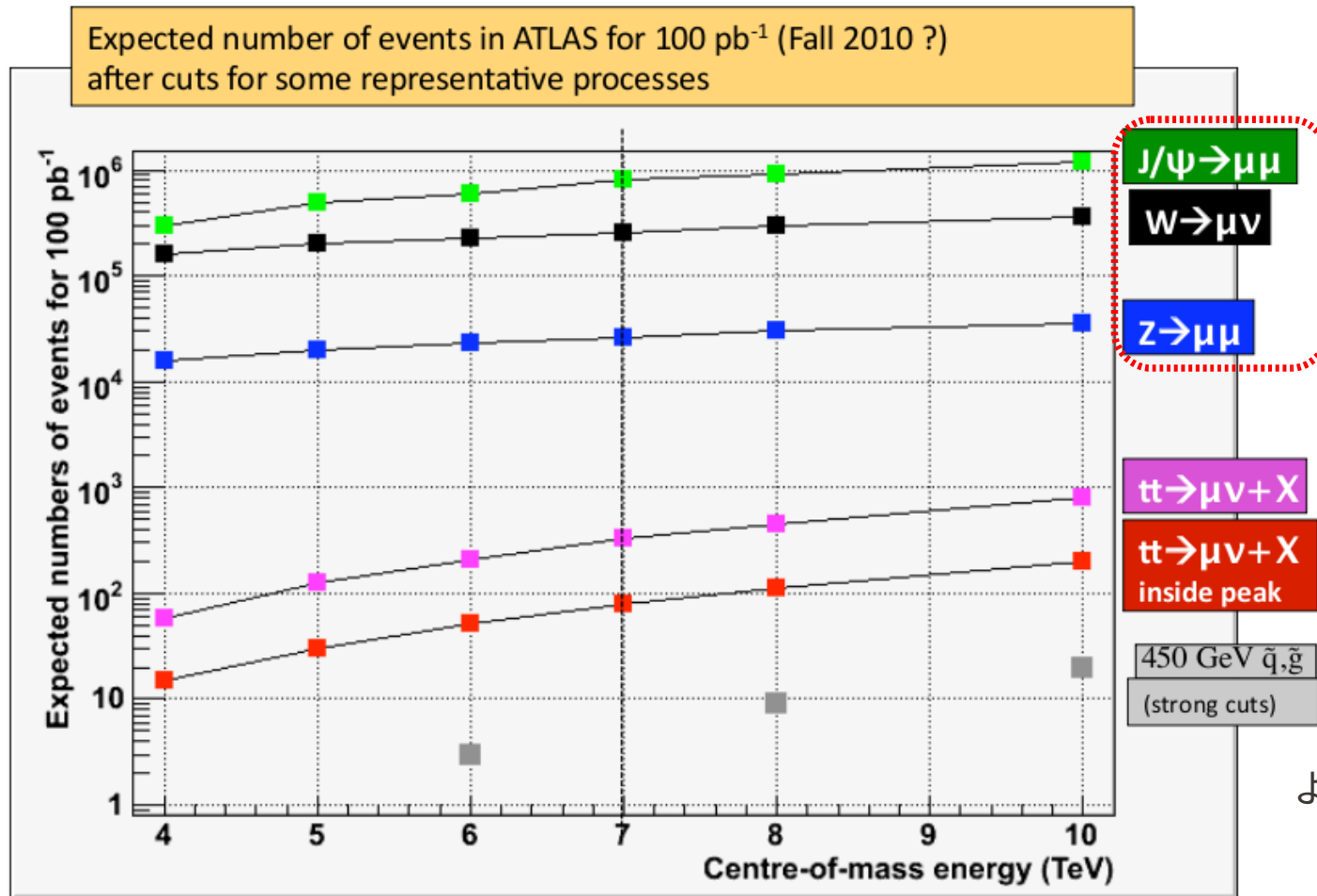
(simulation)



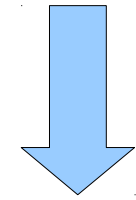
戦略

- (1) まずは円盤を単位として評価する
- (2) 必要な統計量: 1,000 events
- (3) ミュー粒子のレート: $O(10)\text{Hz}$ ($L=10^{30}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
→ 10nb^{-1} ($=10^{32}\text{cm}^{-2}$)
- (4) 現在位置から±5nsecともう一点の計4点測定
- (5) 徐々に評価する単位を小さくしていく
→ 最終的にはchamber単位で位相を決定する

さらに今後は、..



物理事象を用いた評価
+ トリガー効率(tag&prove)
+ 設置位置の校正
+ トリガーマトリックスの最適化



より高いトリガー効率を目指して!

Super LHC ($L=10^{35}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)へのアップグレードも計画中

+ phase1: 2015年? (四極電磁石の交換)

+ phase2: 2020年?? (LINAC4を用いたinjectionの開始)

まとめ

①LHC加速器が稼働開始

- + 重心系7TeVでの衝突が始まった
- + 2011年末までに 1fb^{-1} が目標

②ATLAS実験用ミュー粒子検出器の構築

- + 13年に渡る建設期間
- + 要求を満たすシステムの構築に成功
 - 高いトリガー効率
 - 25nsecのバンチ識別能力
- + 現在、衝突データを用いた性能評価、改善中

TeVスケールの物理の本格探索が、いよいよスタート!