

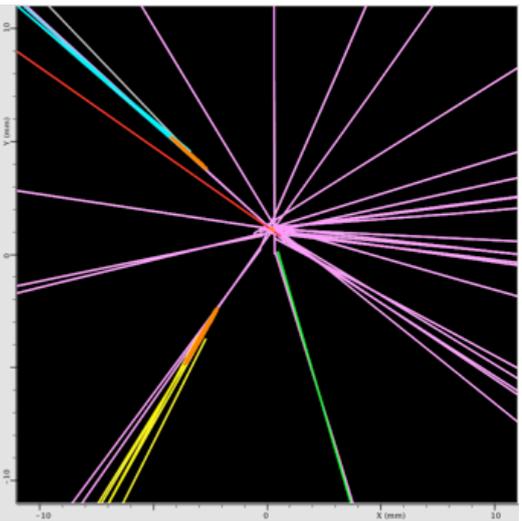
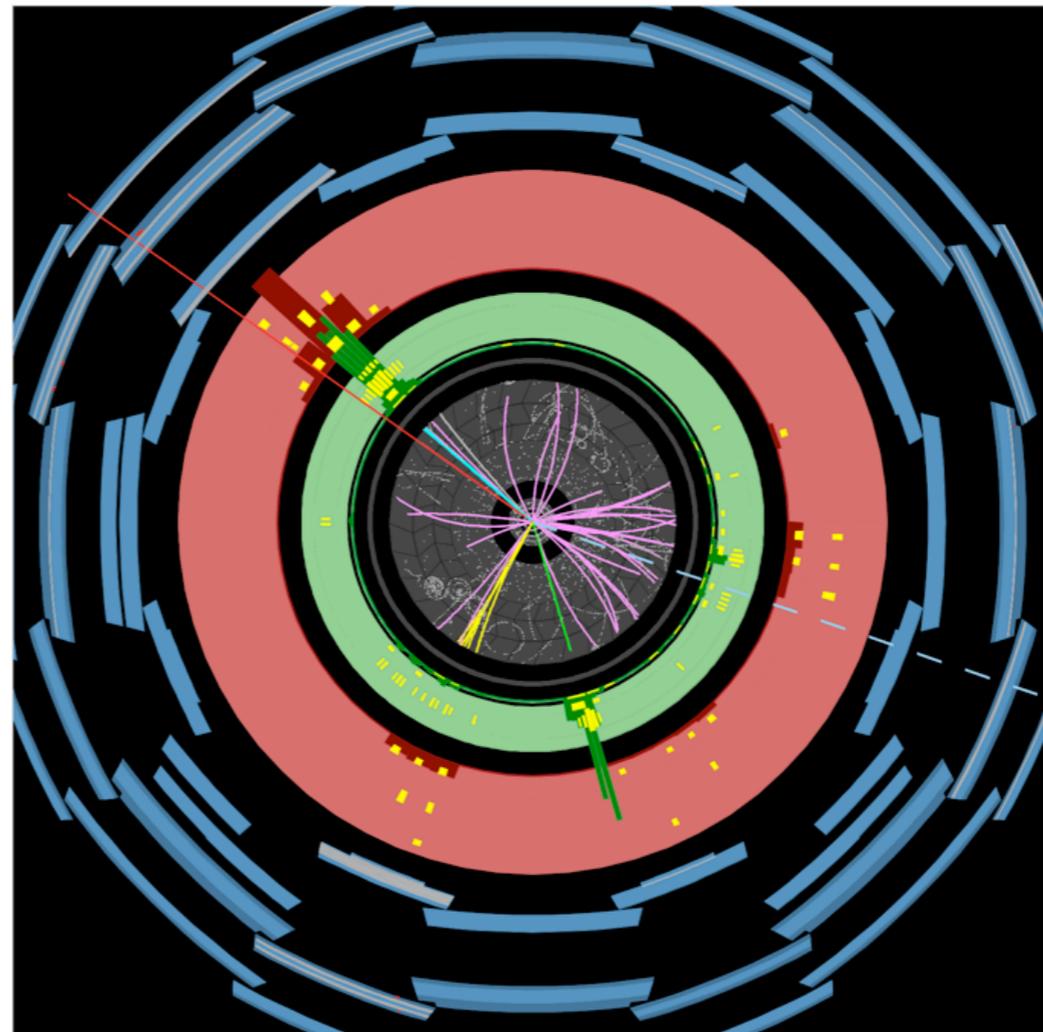
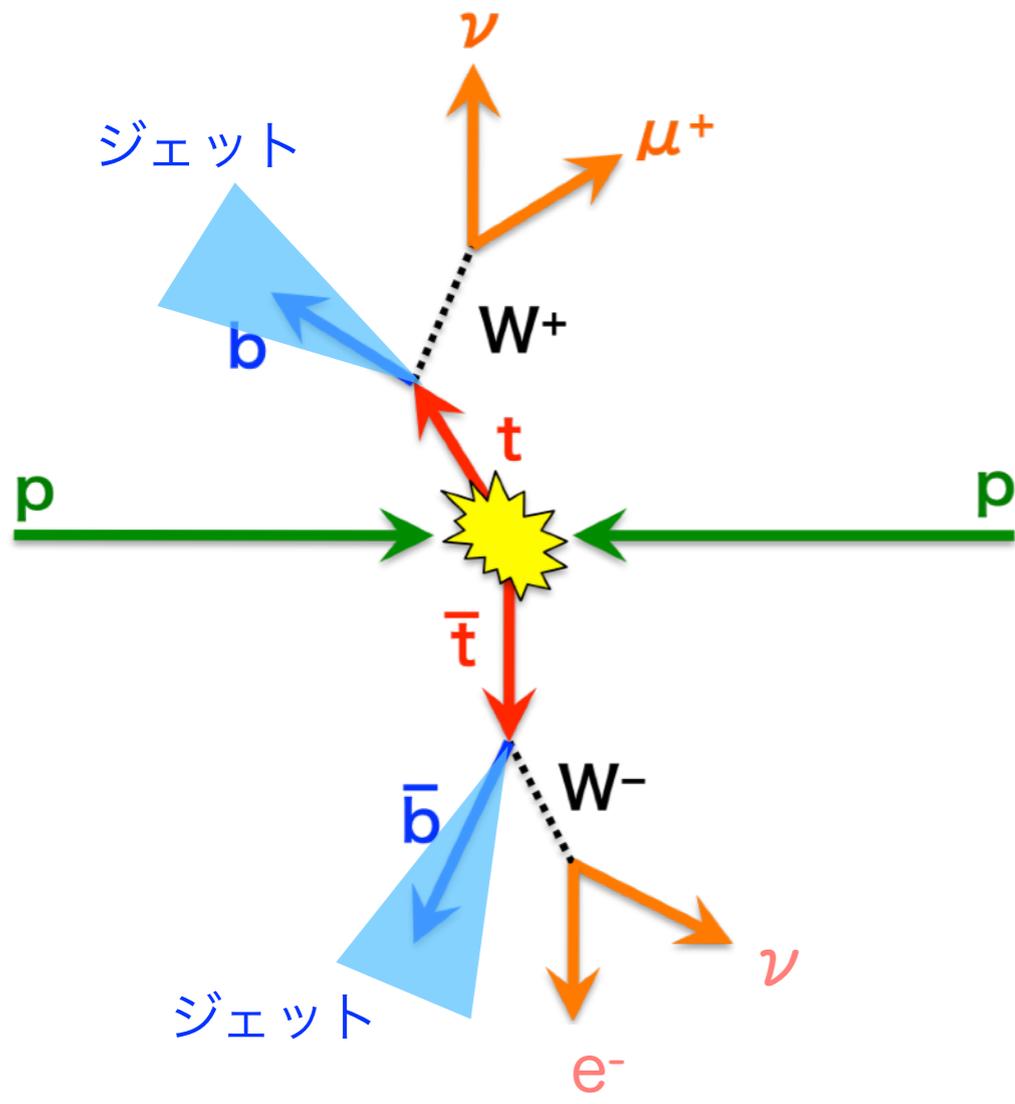


# 将来コライダー実験に向けた測定器開発技術

戸本 誠

高エネルギー加速器研究機構  
素粒子原子核研究所

# コライダー実験で何を測るか？

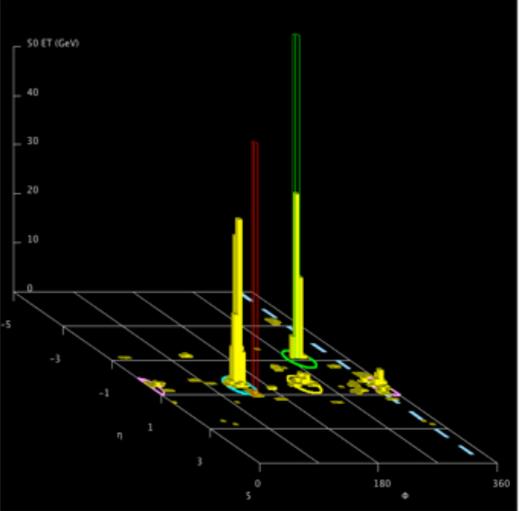
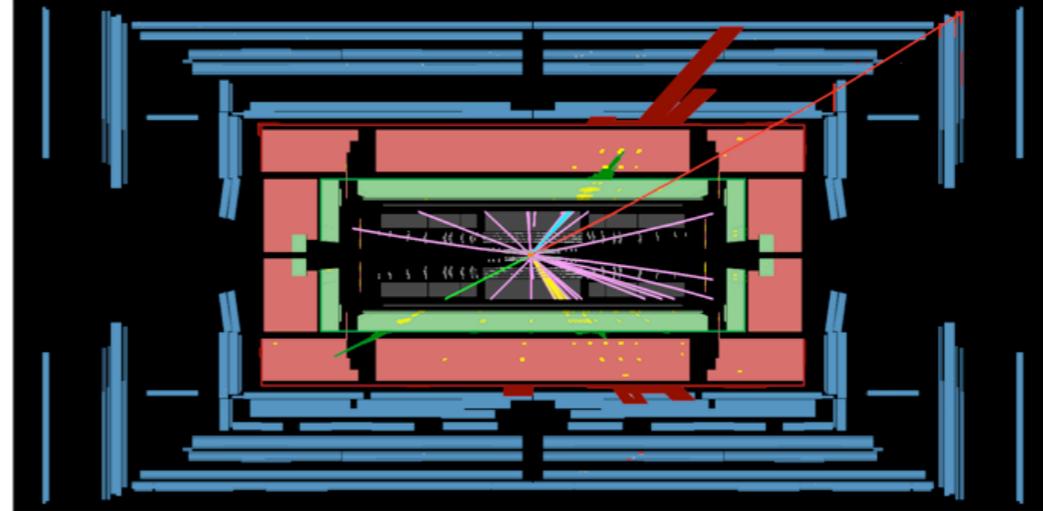


**ATLAS EXPERIMENT**

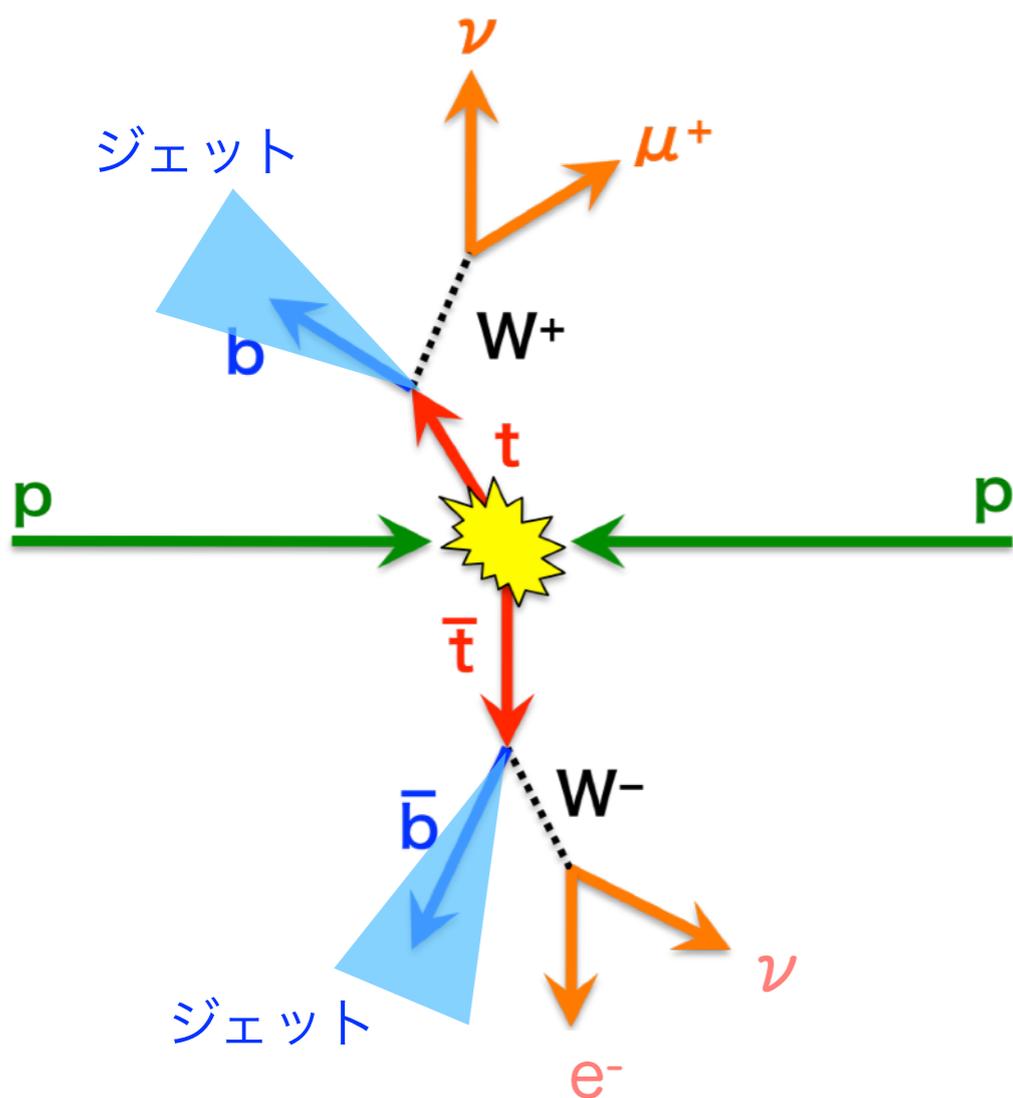
Run Number: 160958, Event Number: 9038972

Date: 2010-08-08 11:01:12 BST

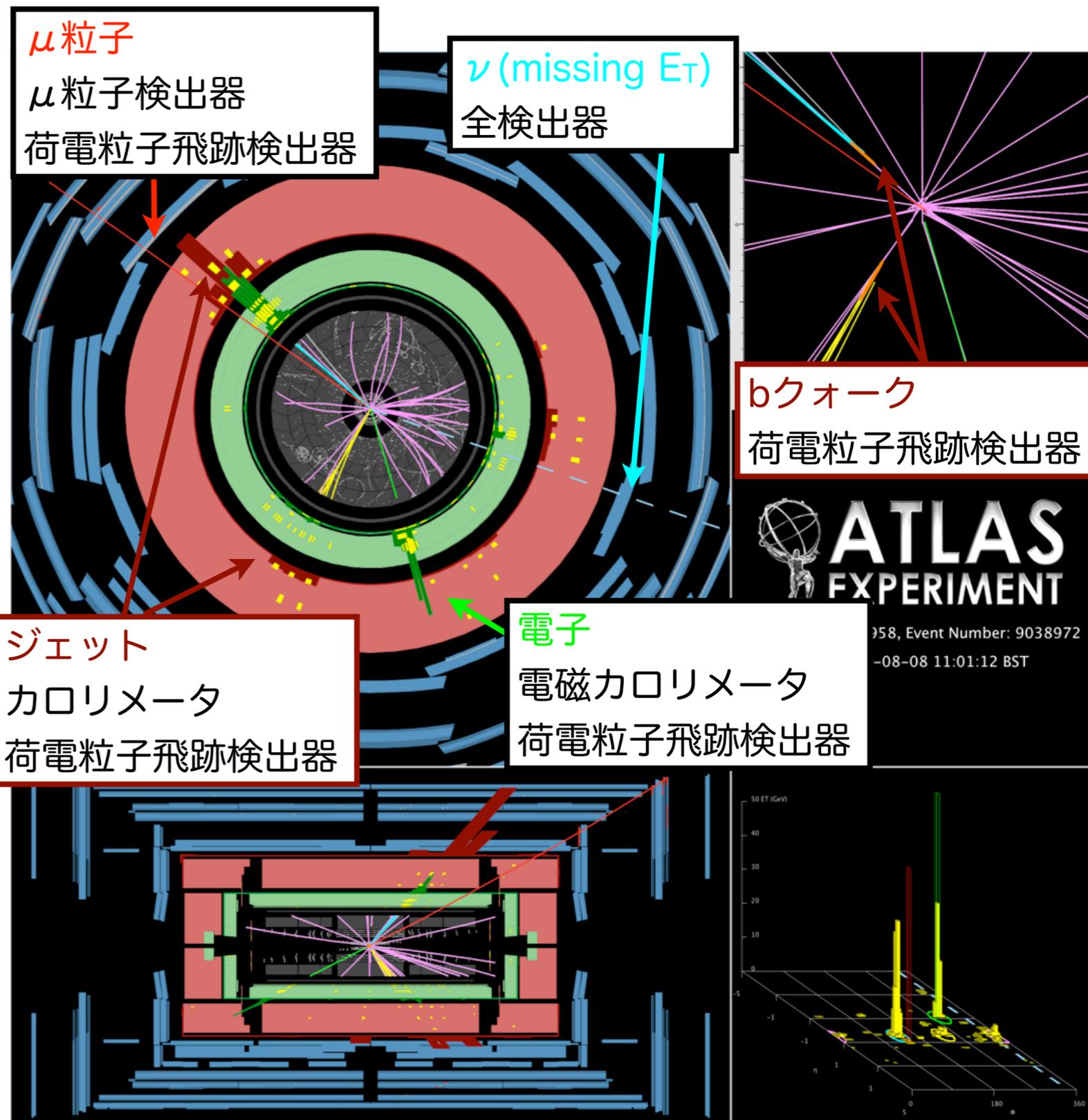
- 衝突反応による全終状態粒子の荷電粒子、中性粒子、光子
  - 種類
  - エネルギー・運動量
  - 飛跡 (生成・崩壊点、電荷)
- 全立体角を穴なく測定したい



# コライダー実験で何を測るか？



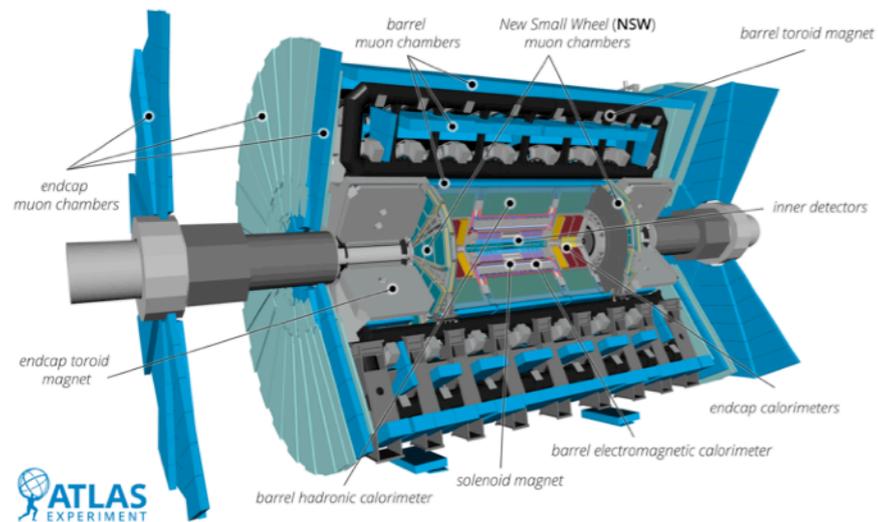
- 衝突反応による全終状態粒子の荷電粒子、中性粒子、光子
  - 種類
  - エネルギー・運動量
  - 飛跡 (生成・崩壊点、電荷)
- 全立体角を穴なく測定したい



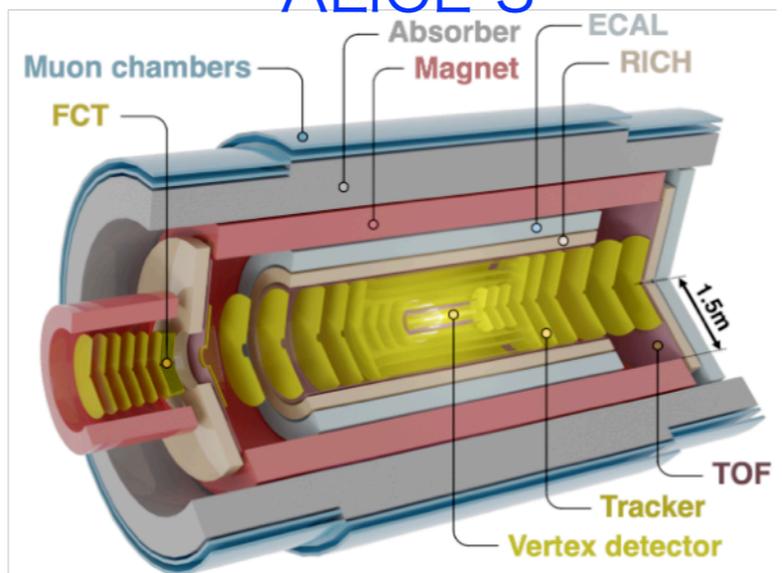
私たちのやりたい物理をするためには一種類の測定器では実現不可能  
→ 複数の測定器による測定器システムが必要

# 測定器のコンセプト

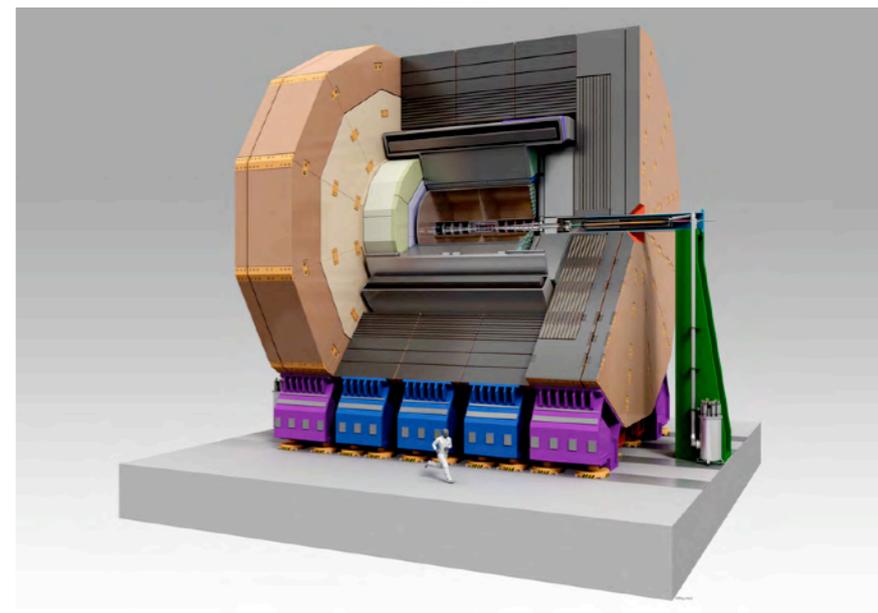
## ATLAS



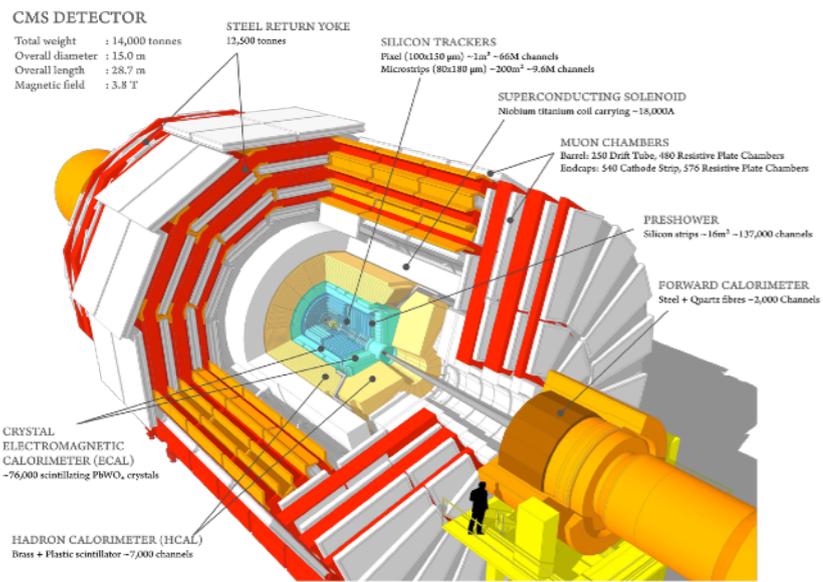
## ALICE 3



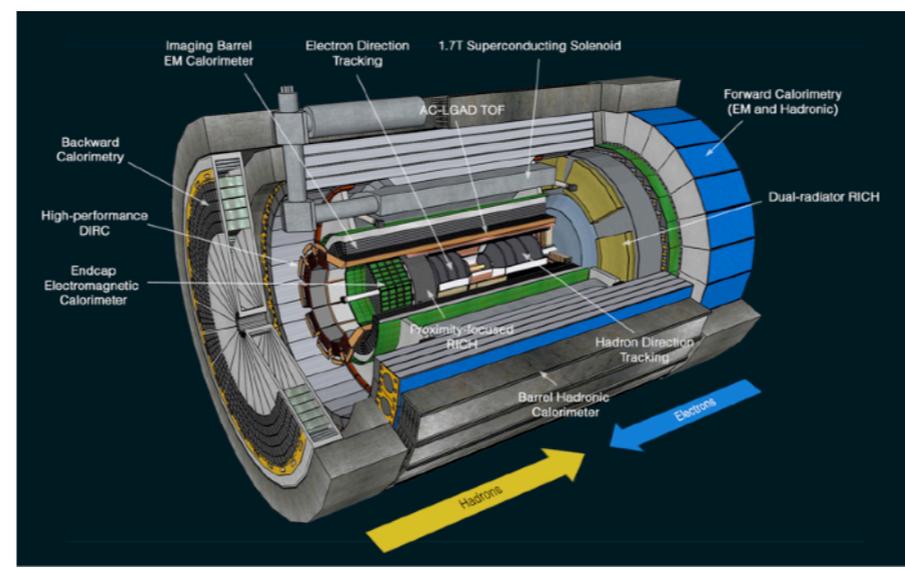
## ILD



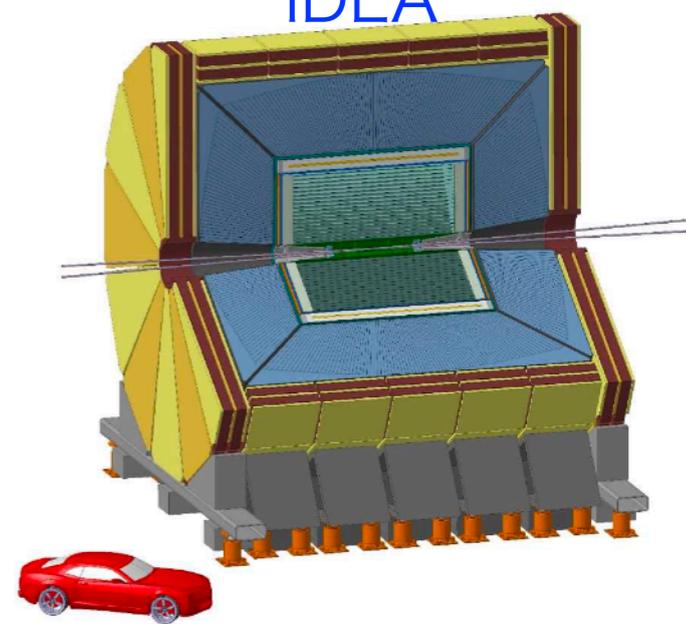
## CMS



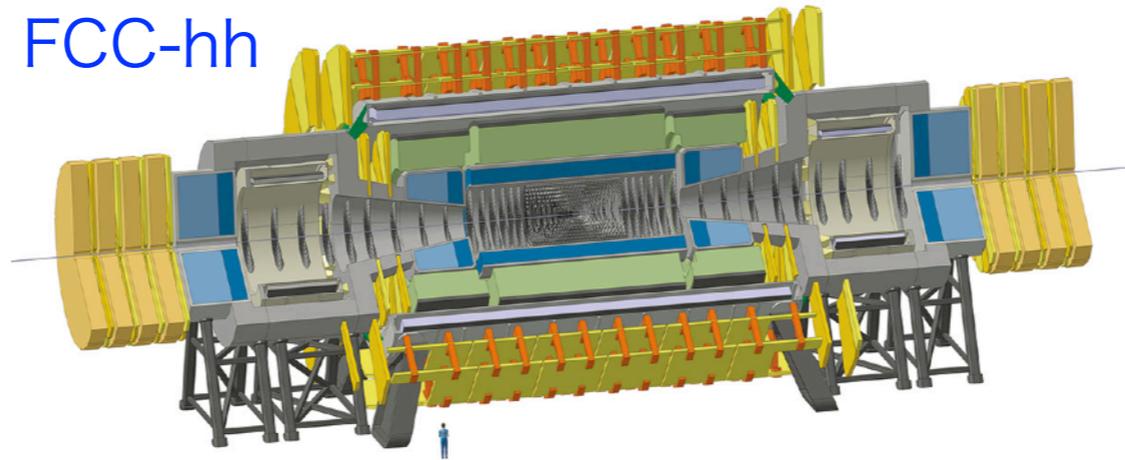
## EIC



## IDEA



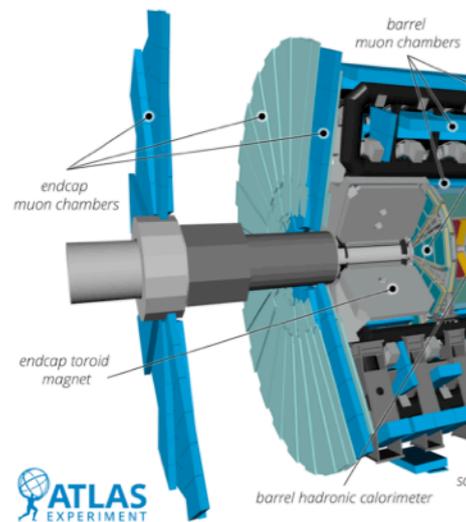
## FCC-hh



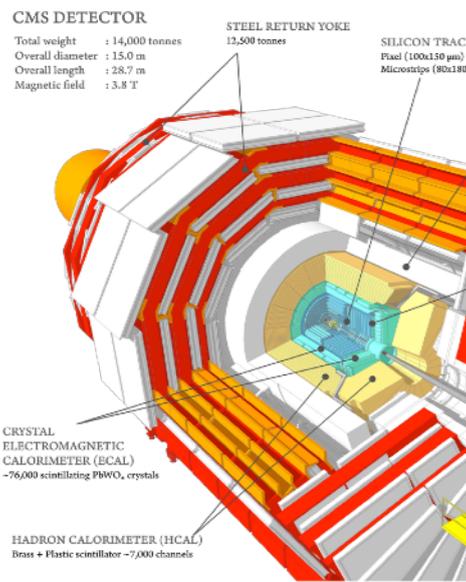
# 測定器のコンセプト

基本コンセプトはどれも同じ：測定器の大型化

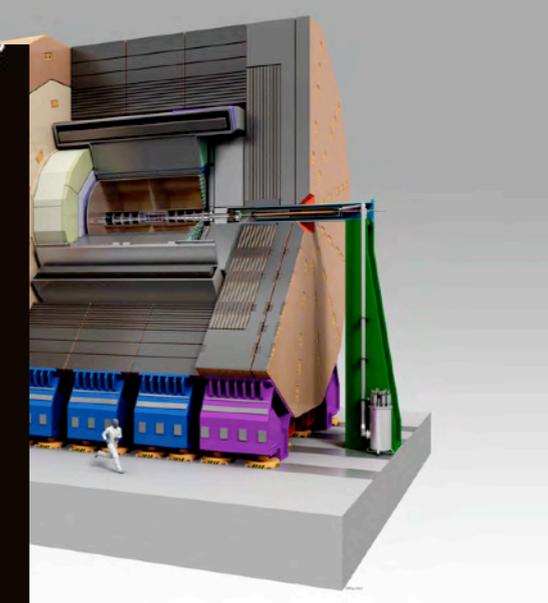
ATLAS



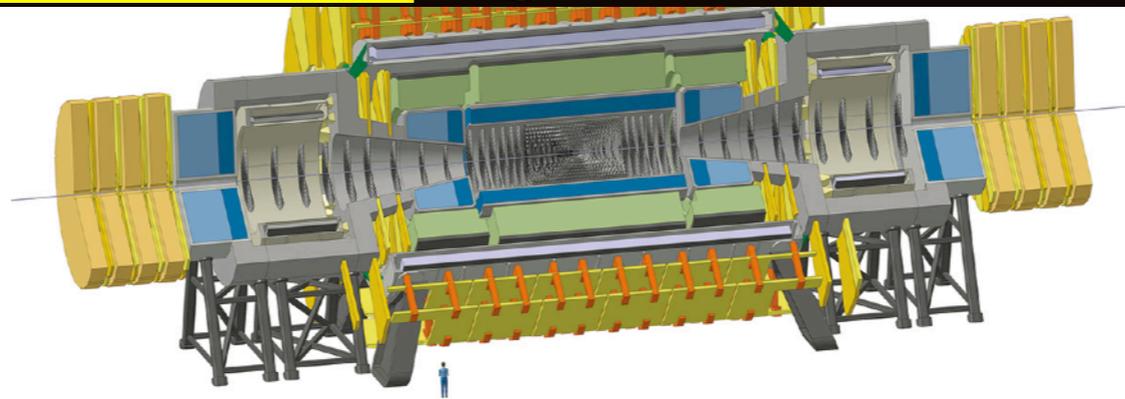
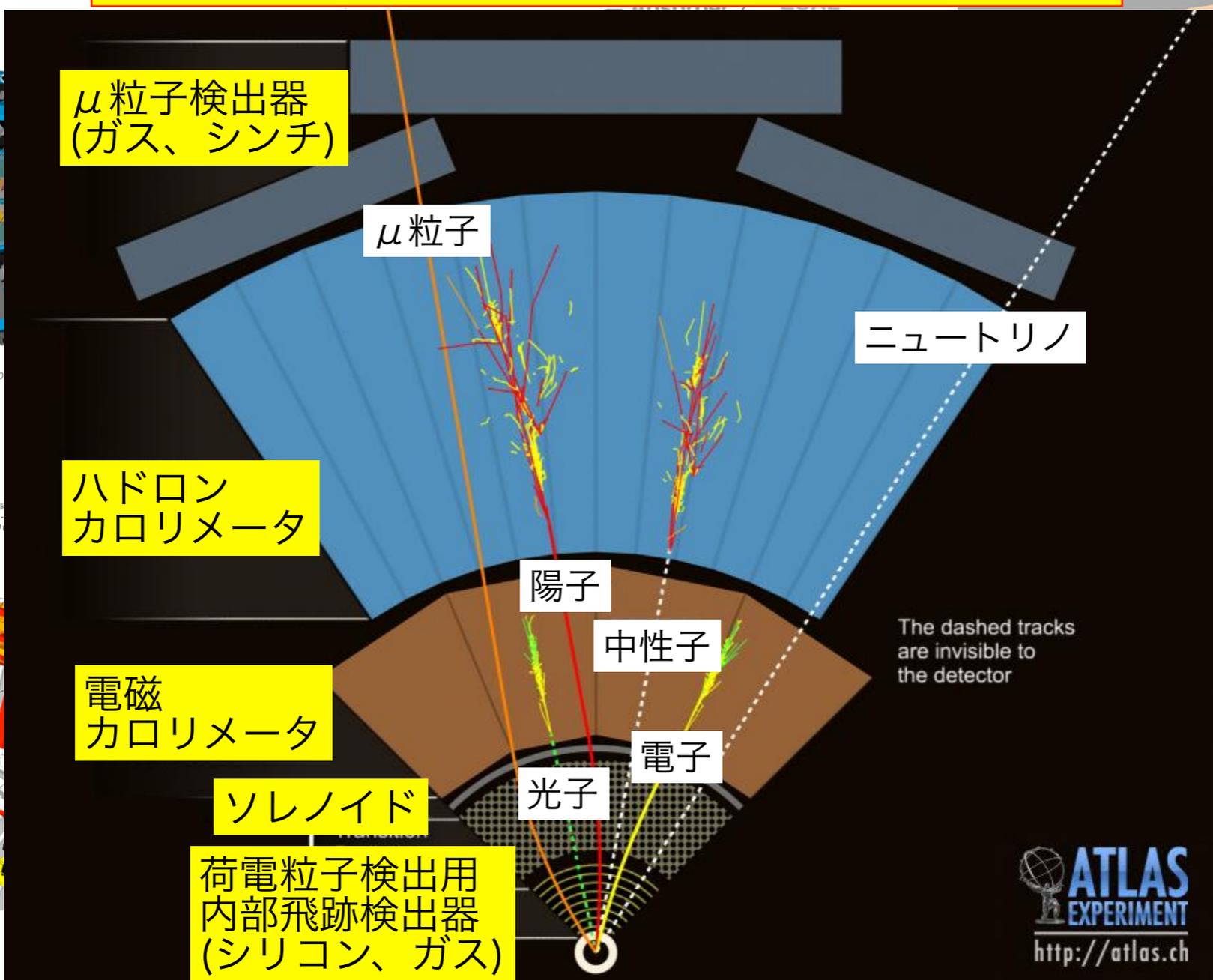
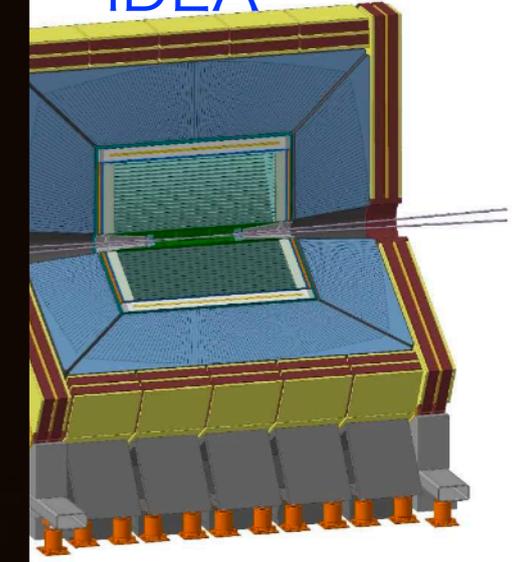
CMS



ILD



IDEA

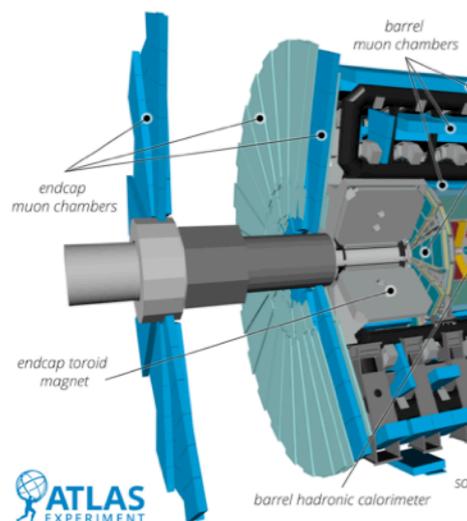


# 測定器のコンセプト

ATLAS

基本コンセプトはどれも同じ：測定器の大型化

ILD



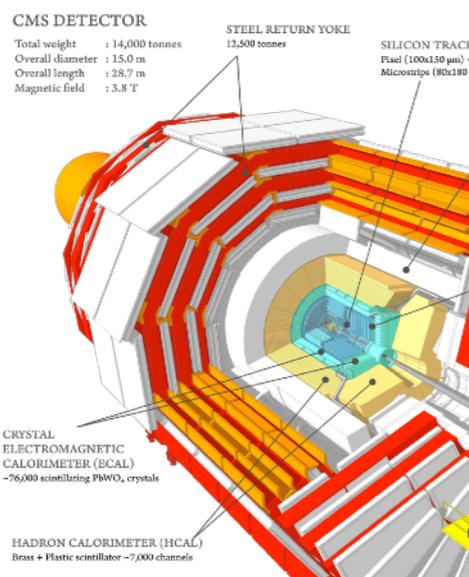
$\mu$ 粒子検出器  
(ガス、シンチ)

$\mu$ 粒子

ニュートリノ



CMS



ハドロン  
カロリメータ

陽子

中性子

The dashed tracks  
are invisible to  
the detector

電磁  
カロリメータ

電子

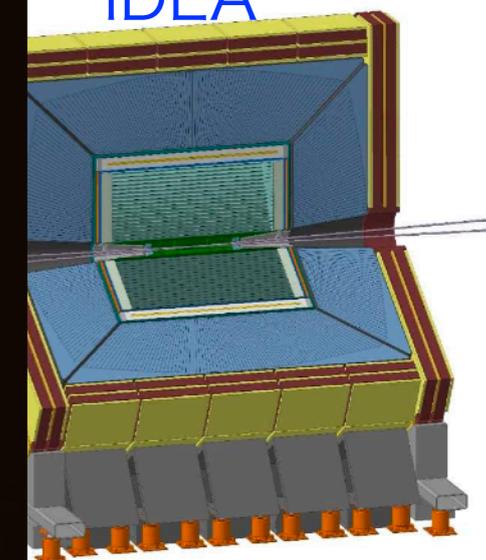
ソレノイド

光子

荷電粒子検出用  
内部飛跡検出器  
(シリコン、ガス)

ATLAS  
EXPERIMENT  
<http://atlas.ch>

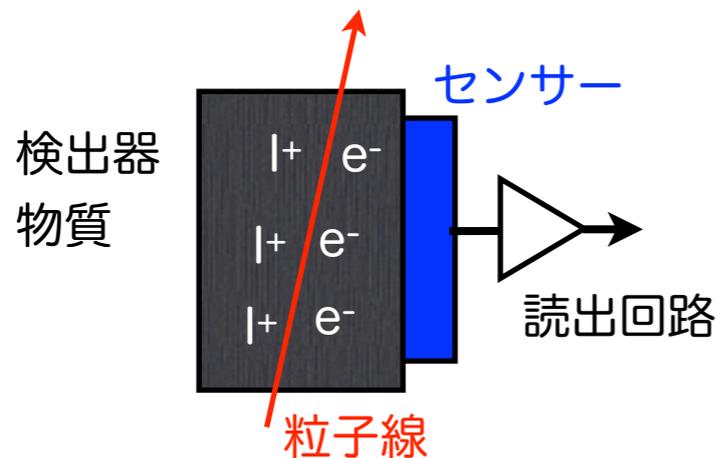
IDEA



- ・ 国際競争で検出器コンセプトを決定
- ・ 国際協力で担当検出器の建設
- リソースや専門性を考慮して戦略的な検出器開発
- R&Dから大型検出器建設までを進めるインフラも必要不可欠

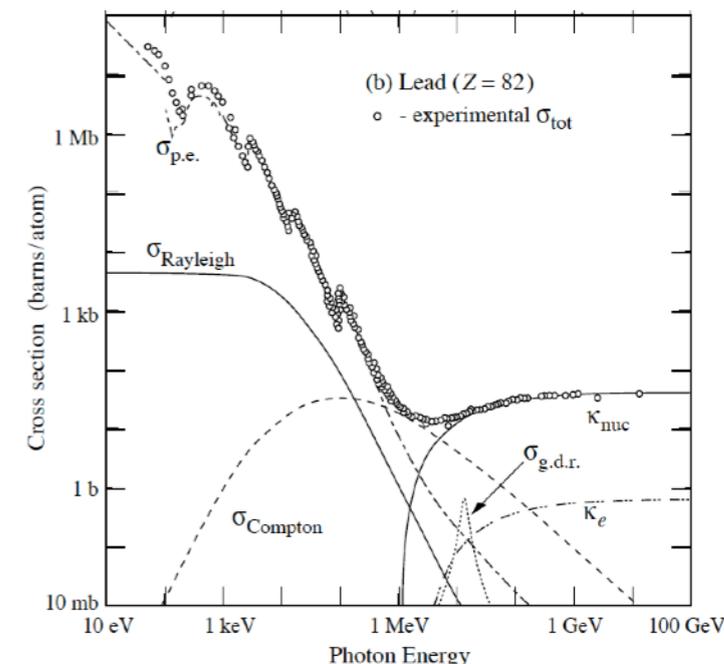
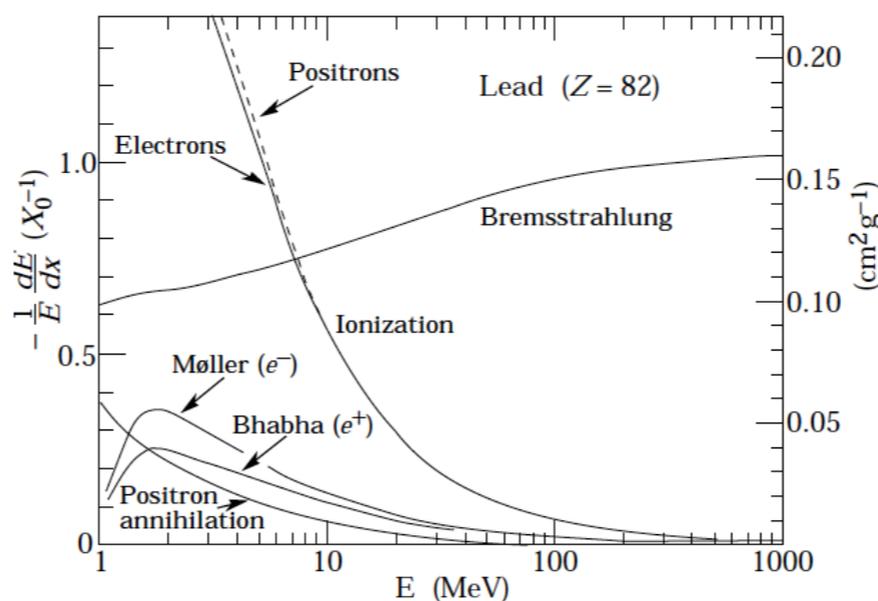
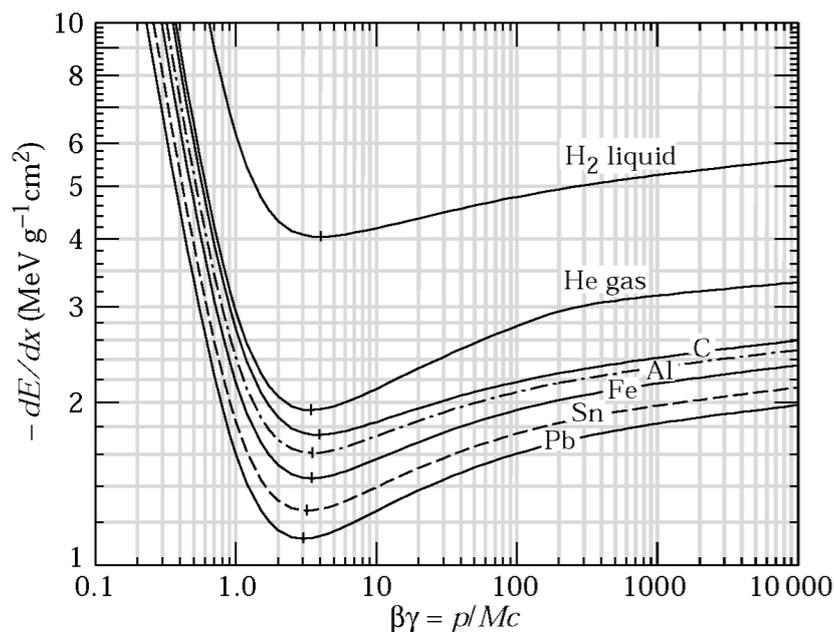
# 測定器開発

- 粒子は検出器の物質との相互作用（イオン化，励起，制動放射，…）によって検出



	荷電粒子		中性粒子	
電磁シャワーする	e <sup>±</sup>		γ (π <sup>0</sup> )	
電磁シャワーしない	ハドロン	レプトン	ハドロン	レプトン
	π <sup>±</sup> , K <sup>±</sup> , p	μ <sup>±</sup>	n	ν

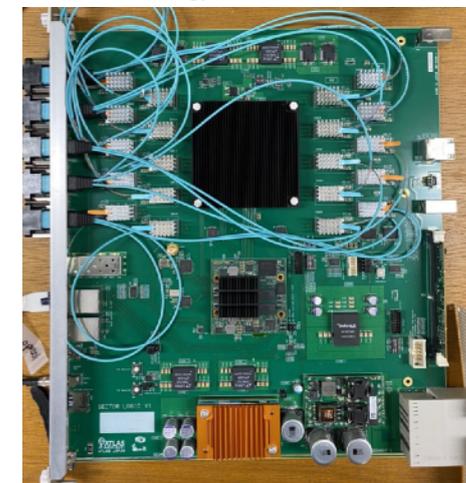
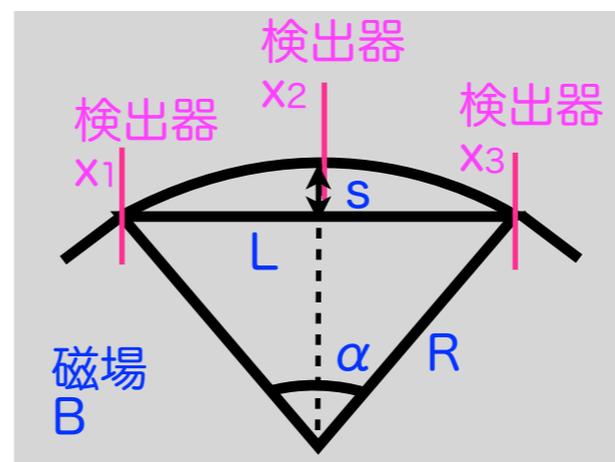
- 背景となる物理や仕様(物質質量など)は、検出粒子の種類やエネルギーなどによって異なる



- 磁石や読み出し/トリガー回路なども重要

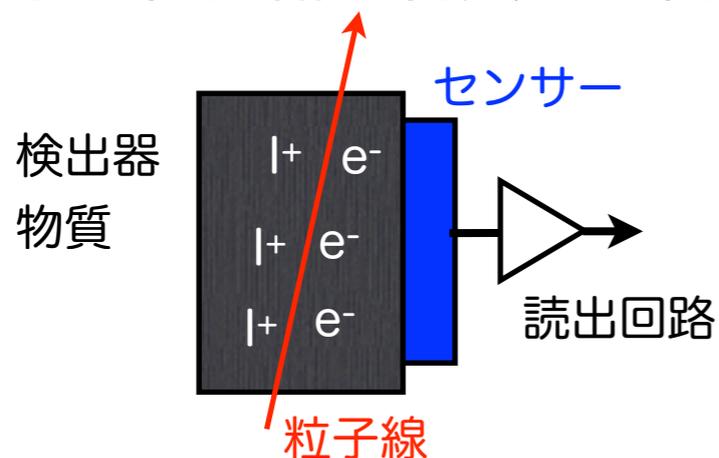
$$p_T (\text{GeV}/c) = 0.3 \times B \times R \quad (\text{T} \cdot \text{m})$$

$$\left( \frac{\sigma(p_T)}{p_T} \right)^{meas} = \frac{\sigma(s)}{s} = \frac{\sqrt{\frac{3}{2}} \sigma(x)}{s} = \frac{\sqrt{\frac{3}{2}} \sigma(x) \cdot 8p_T}{0.3BL^2}$$



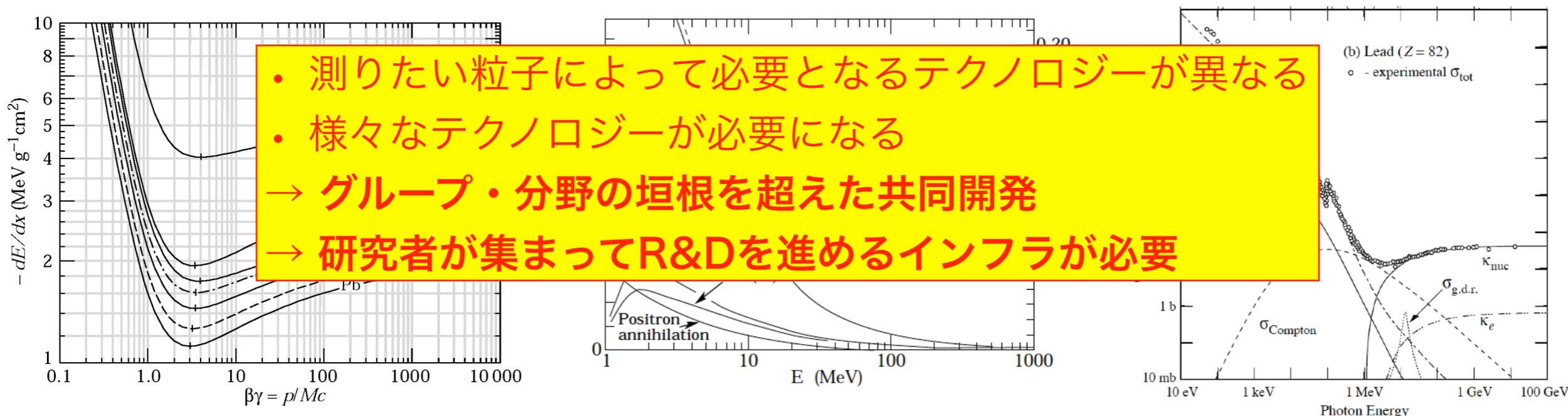
# 測定器開発

- 粒子は検出器の物質との相互作用（イオン化，励起，制動放射，…）によって検出



	荷電粒子		中性粒子	
電磁シャワーする	e <sup>±</sup>		γ (π <sup>0</sup> )	
電磁シャワーしない	ハドロン	レプトン	ハドロン	レプトン
	π <sup>±</sup> , K <sup>±</sup> , p	μ <sup>±</sup>	n	ν

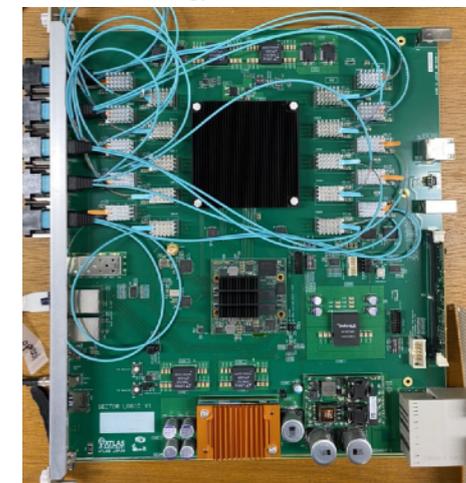
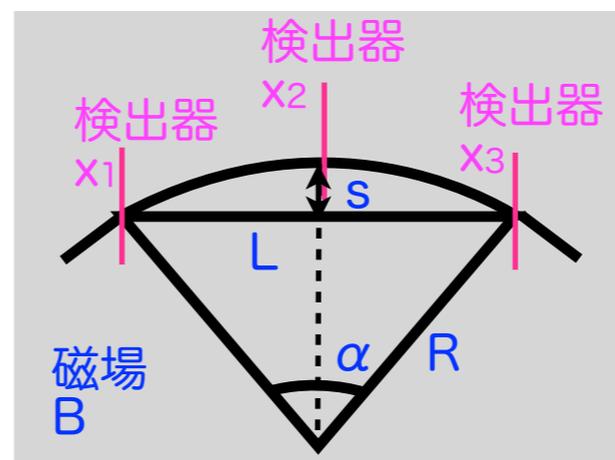
- 検出粒子の種類やエネルギーなどによって、背景となる物理や仕様(物質質量など)が異なる



- 磁石や読み出し/トリガー回路なども重要

$$p_T (\text{GeV}/c) = 0.3 \times B \times R \quad (\text{T} \cdot \text{m})$$

$$\left( \frac{\sigma(p_T)}{p_T} \right)^{\text{meas}} = \frac{\sigma(s)}{s} = \frac{\sqrt{\frac{3}{2}} \sigma(x)}{s} = \frac{\sqrt{\frac{3}{2}} \sigma(x) \cdot 8p_T}{0.3BL^2}$$



# KEK素核研における将来コライダーに向けた検出器開発<sup>9</sup>



## 素粒子原子核研究所

実験

エネルギーフロンティア(LHC+ILC)

Belle

ニュートリノ

ハドロン

実験的宇宙物理

ミュオン中性子

連携

活用

物質構造科学研究研

加速器研究施設

共通基盤研究施設

J-PARC

QUP

サポート

安全

コンピューティング

センター

測定器開発センター

低温 メカ エレキ

理論センター

和光原子核科学センター

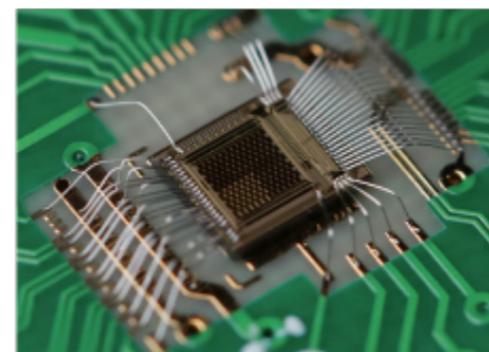
# エネルギーフロンティアグループ

- (HL-) LHCを主導しながら、次世代コライダー実験のためのR&Dを推進
- グループの専門性を考慮して以下の開発を主導
  - 半導体検出器
  - エレクトロニクス
  - AI/機械学習
  - 高磁場磁石(検出器・加速器)開発  
→ 低温工学センターに協力

**SiGe BiCMOS**

- timing res. : < 20 ps (without gain layer)
- Radiation tolerance :  $1 \times 10^{16}$

<https://arxiv.org/abs/2310.19398>

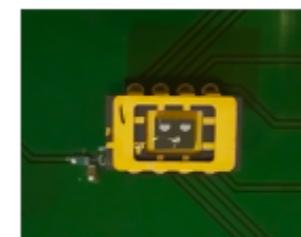


In collaboration with U. Geneve



**CIGS:**  
Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub>

- Recovery from radiation damage



**Future**

**New material**

radhard?

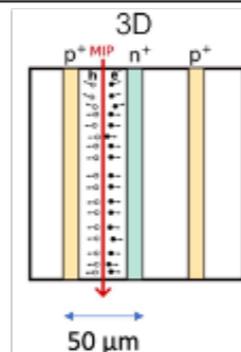
**LGAD**

- timing res. : < 30 ps



**3D**

- timing res. : < 50 ps
- Radiation tolerance :  $2 \times 10^{16}$



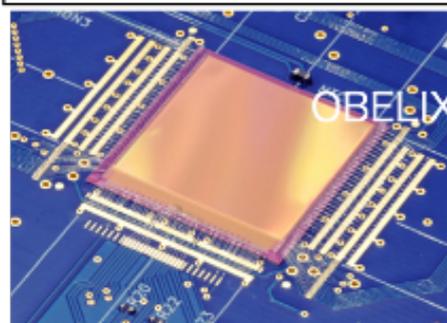
**Picosecond**  
ps timing resolution



Electronics AI/機械学習

**MAPS**

- Cheap
- Radiation tolerance :  $2 \times 10^{15}$



In collaboration with Belle

**Monolithic CMOS**  
 $\mu m$  spatial resolution

# 測定器開発センター (ITDC)

測定器開発センター **ITDC**

大学共同利用部門

## 大学共同利用の強化

- 測定器テストビームライン
- 測定器開発環境の整備
  - 大規模クリーンルーム
  - ヘリウム回収装置



## コミュニティ

### 素核研内連携

- つくばキャンパス
- 東海キャンパス

### 機構内連携

- 加速器研究施設
- 共通基盤施設
- 物構造研
- QUP

### 研究者

- 大学
- Hecforum
- 原子核談話会
- 宇宙線研究者会議
- 世界中の研究者

### 産学連携

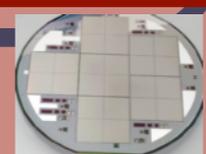
- 物性物理学
- 医療・生命科学
- 工学
- 低温、新素材、通信
- 加速器科学

## 測定器開発プラットフォーム

光センサ+シンチ



半導体センサ



ガス&アクティブ媒質



コライダー  
エレクトロニクス  
フォーラム



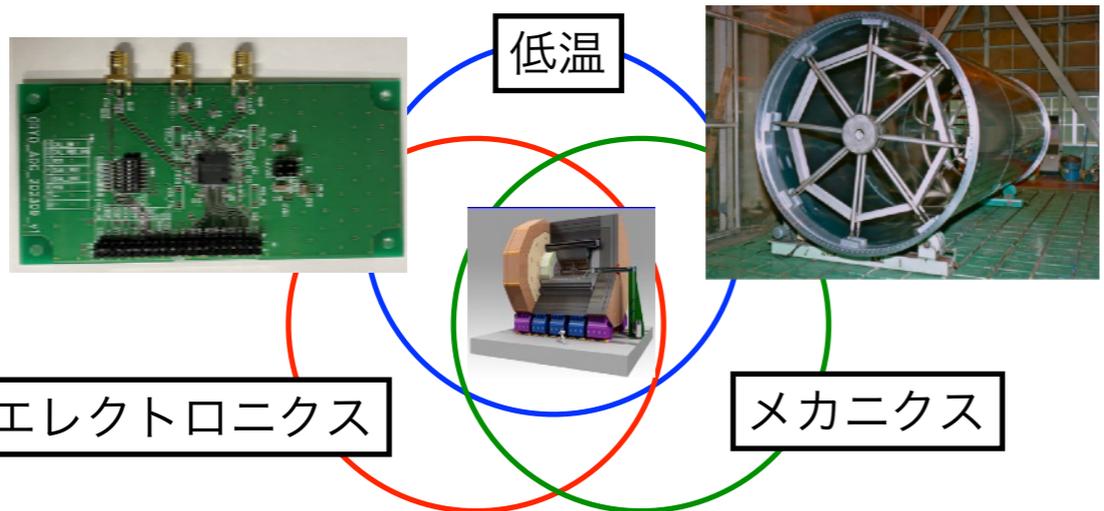
.....

.....

## 次世代共通基盤技術開発を推進

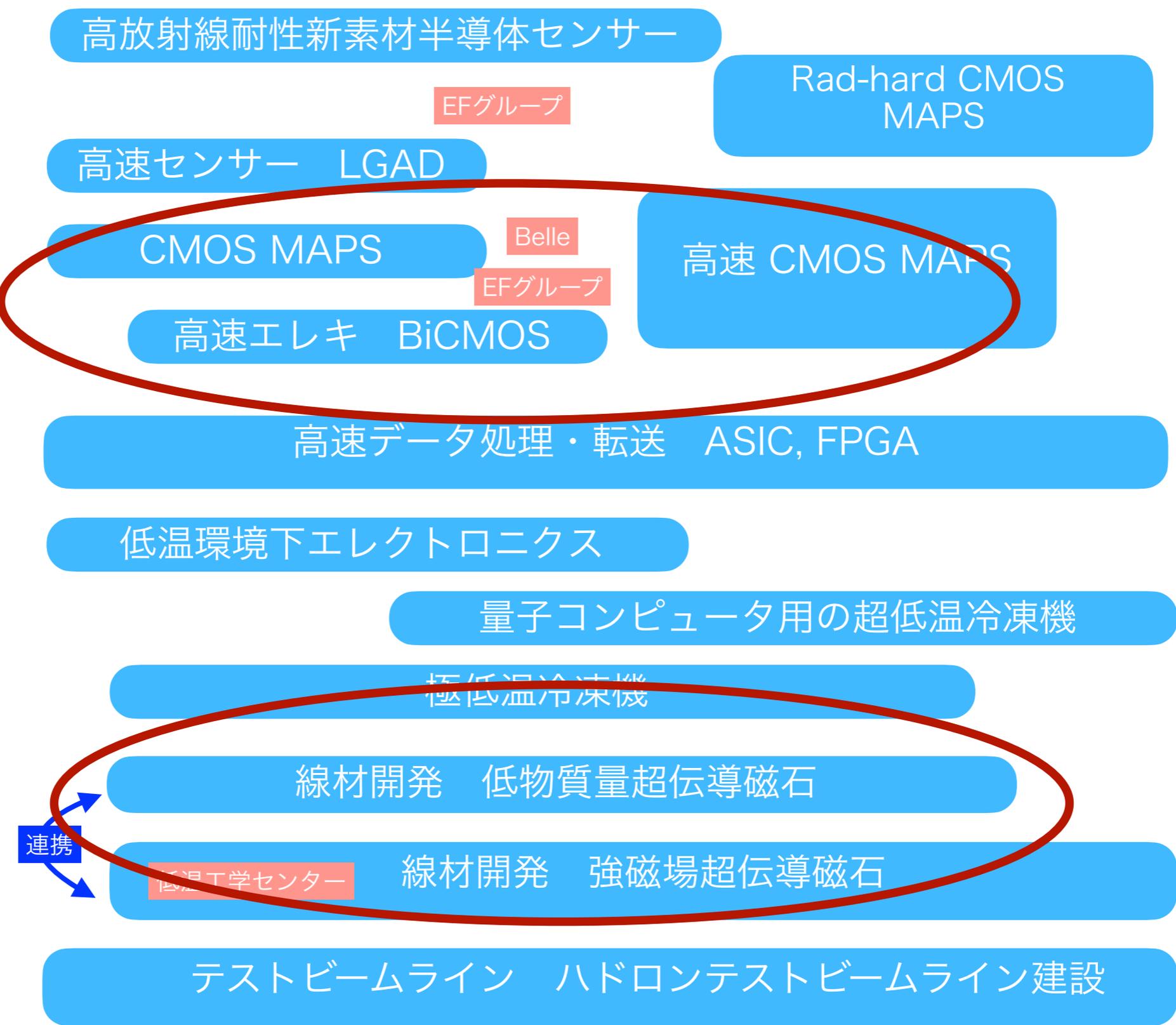
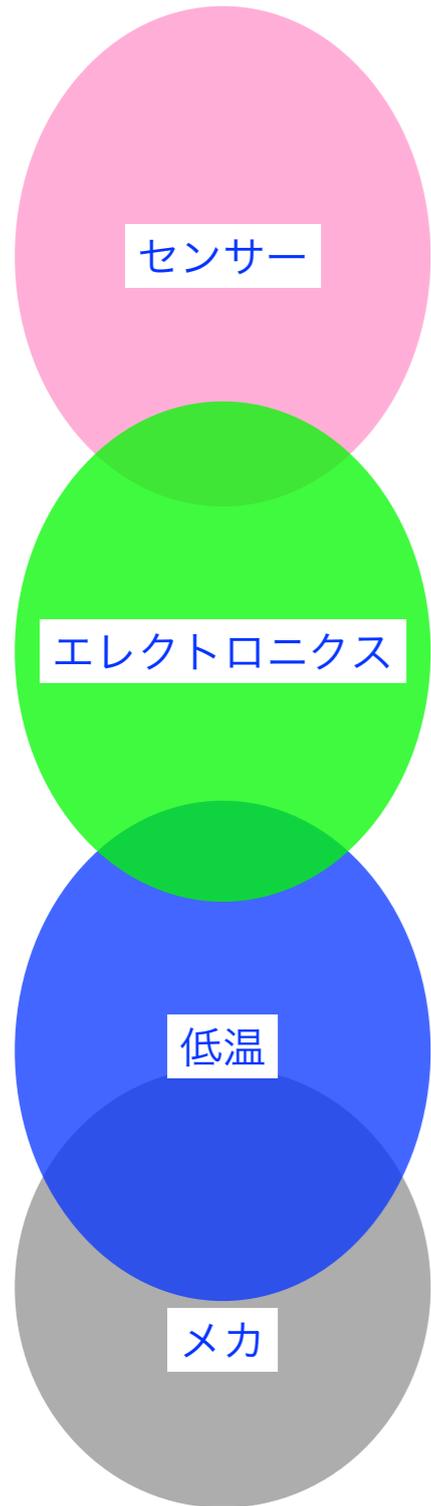
- 現行・次期プロジェクトを支える基幹技術開発
- ボトムアップ型の測定器開発プラットフォーム
- トップダウン型のセンター主導開発プロジェクト
  - モノリシックピクセルセンサー
  - 極低温冷凍機, 強磁場・低物質超伝導電磁石

次世代技術開発部門



# 測定器開発センター工程表

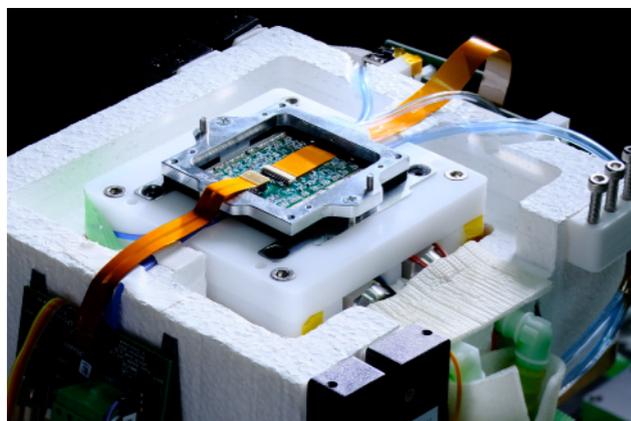
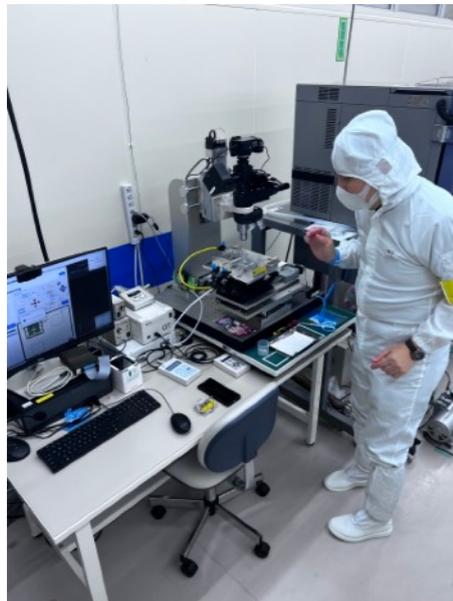
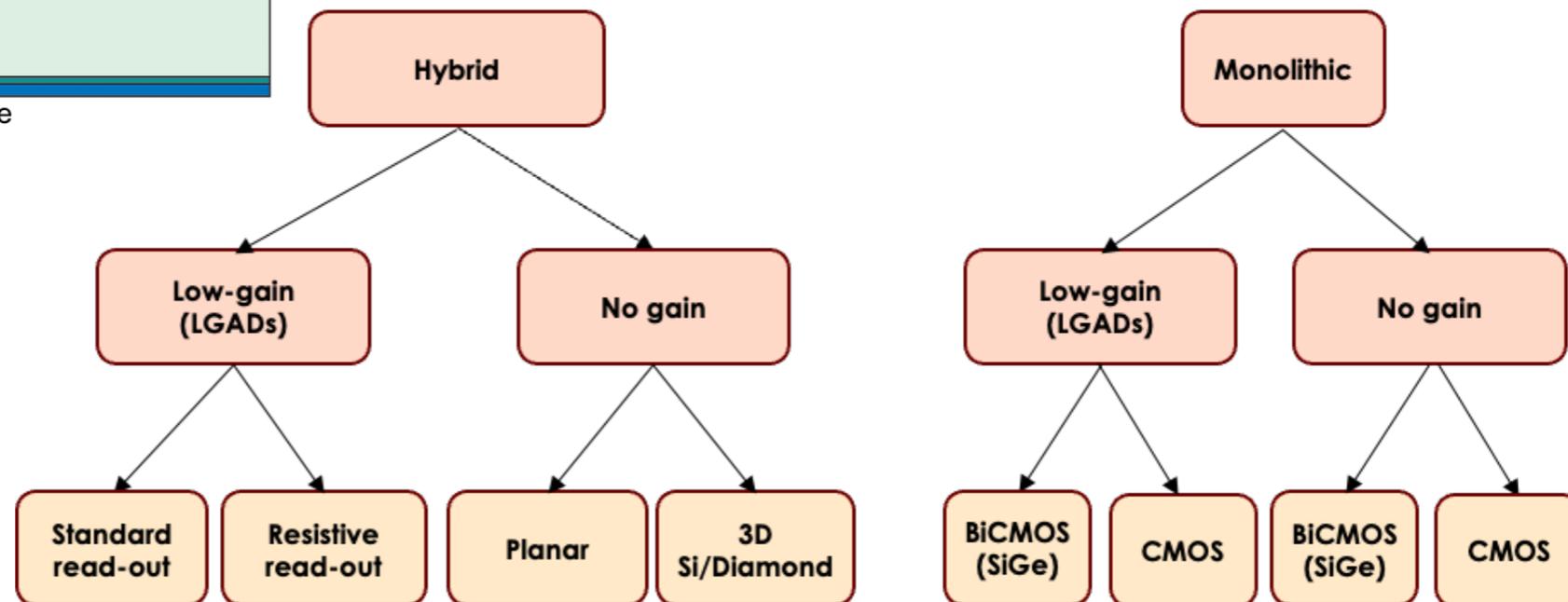
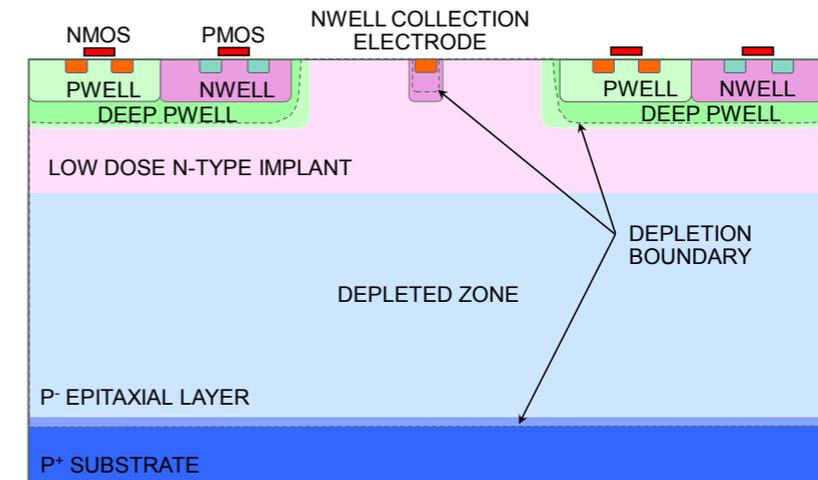
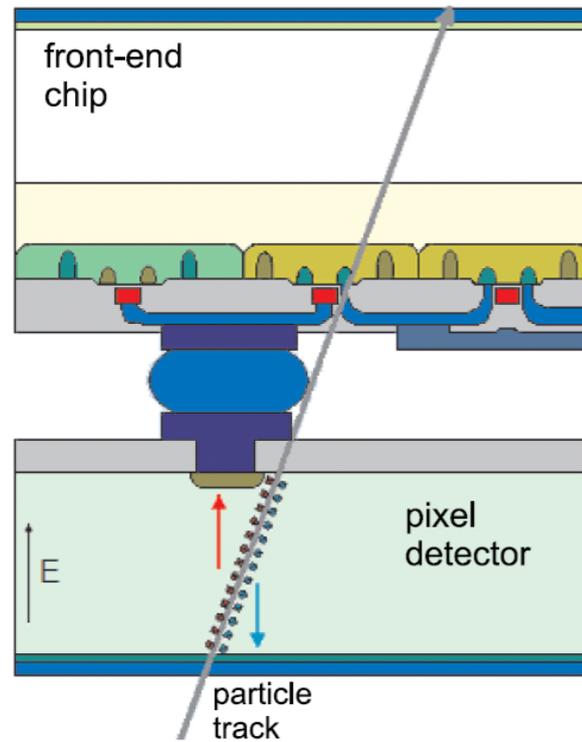
時間



次世代大型プロジェクト

注意：時間刻みは一定ではない

# 半導体検出器



## 要求されるキーテクノロジー

- Lepton collider
  - 高位置 + 高時間分解能, 低物質質量 (省電力化)
- Hadron collider
  - 高位置 + 高時間分解能, 放射線耐性, 大面積化

# CMOS Monolithic Active Pixel Sensor (MAPS) <sup>14</sup>

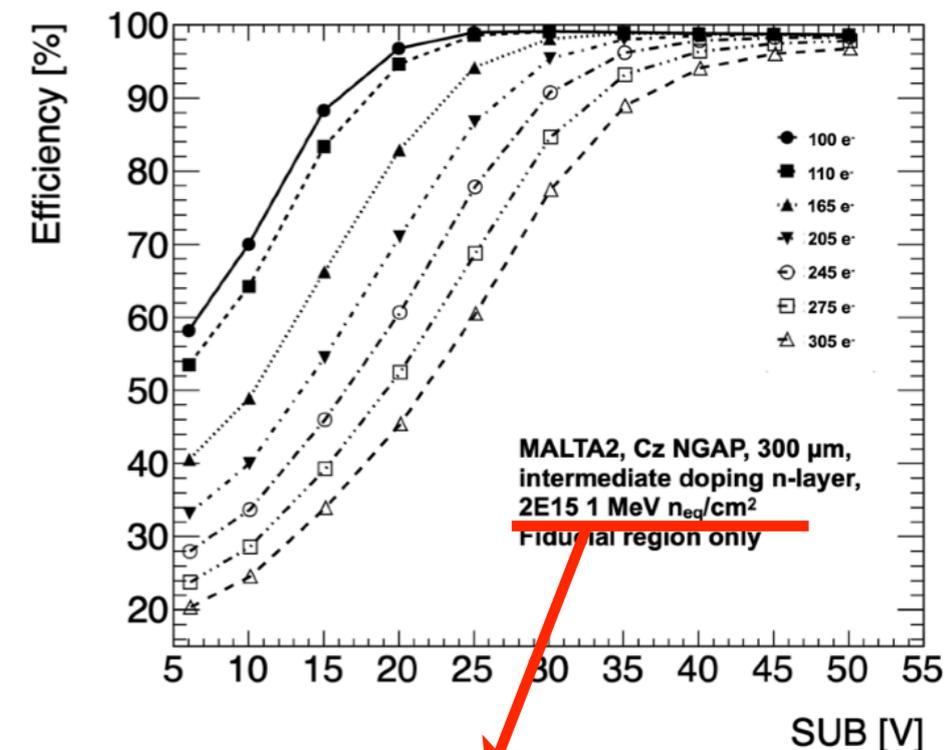
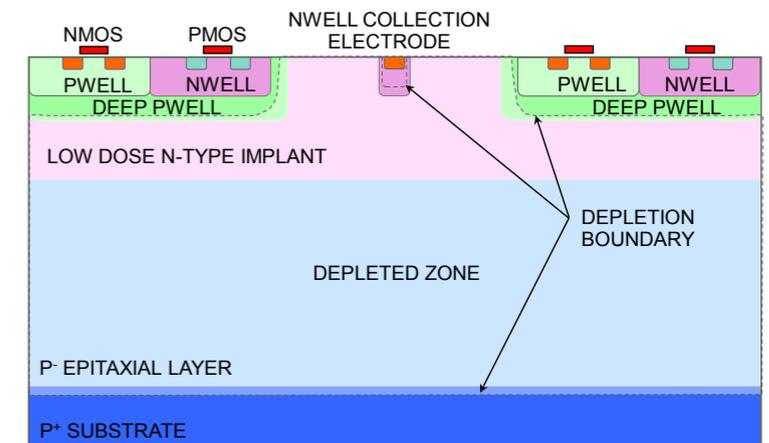
## メリット

- バンプボンディングしなくて良い
  - 微細化, 良歩留, 低価格化, 製造短期化
- 低物質質量

## R&Dアイテム

- 放射線耐性の強化
  - HL-LHC用に開発されたTowerJazz 180nm MALTAが有力
    - Belleグループ (ストラスブール, 日本) と連携
      - ▶ TJ Monopix 2 などの試験
      - OBELIX開発 → TPSCo 65nm
- 低ゲイン層追加
  - 高時間分解能, アンプなしで省電力化
  - エネルギーフロンティアグループ, ジュネーブ大学と連携
    - ▶ SiGe BICMOS (20 psの時間分解能を実現) の開発
    - ▶ CERN MALTA

TowerJazz 180 nm MALTA



ITDC内に開発者を増やして  
65nm技術の習得  
→先行する欧米に追いつく

	RHIC STAR	LHC Heavy Ion	Belle II	ILC	LHC 最内層	HL-LHC 最内層	FCCpp
<b>NIEL [neq/cm<sup>2</sup>]</b>	10 <sup>12</sup>	10 <sup>13</sup>	>10 <sup>14</sup>	10 <sup>12</sup>	10 <sup>15</sup>	10 <sup>16</sup>	10 <sup>17</sup>
<b>TID [rad]</b>	0.2M	1M	20-100M	1M	80M	1G	>1G
<b>Hit rate [MHz/cm<sup>2</sup>]</b>	0.4	10	20-100		200	2,000	20,000

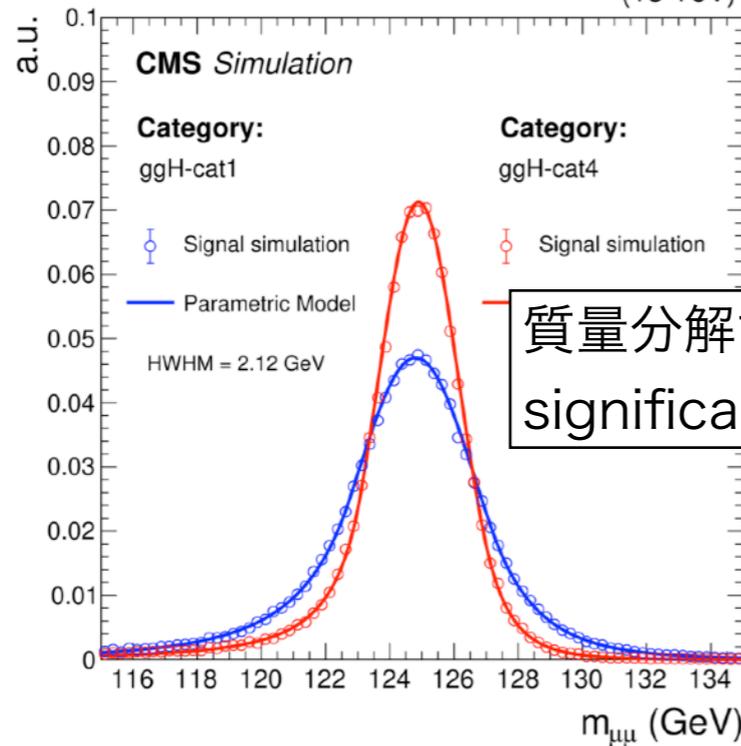
皆が集って半導体検出器開発をする大規模クリーンルームなどのインフラを整備したい

# 将来コライダー実験と電磁石

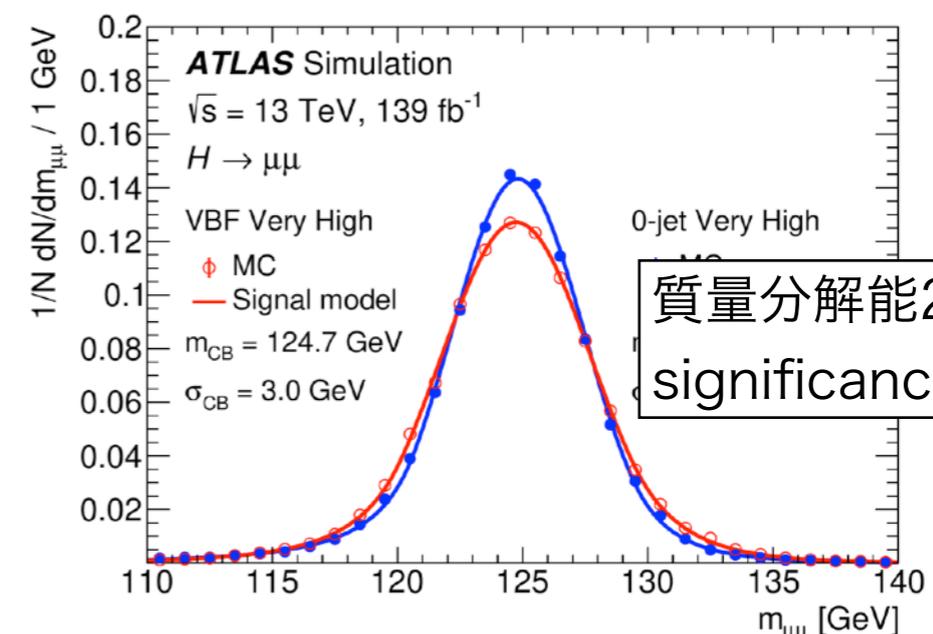
- 将来コライダー実験において電磁石は非常に重要な開発項目
  - ハドロンコライダーのビームエネルギー、ルミノシティ
    - NbTi → Nb<sub>3</sub>Sn → HTS
  - 検出器の運動量分解能

H → μμ

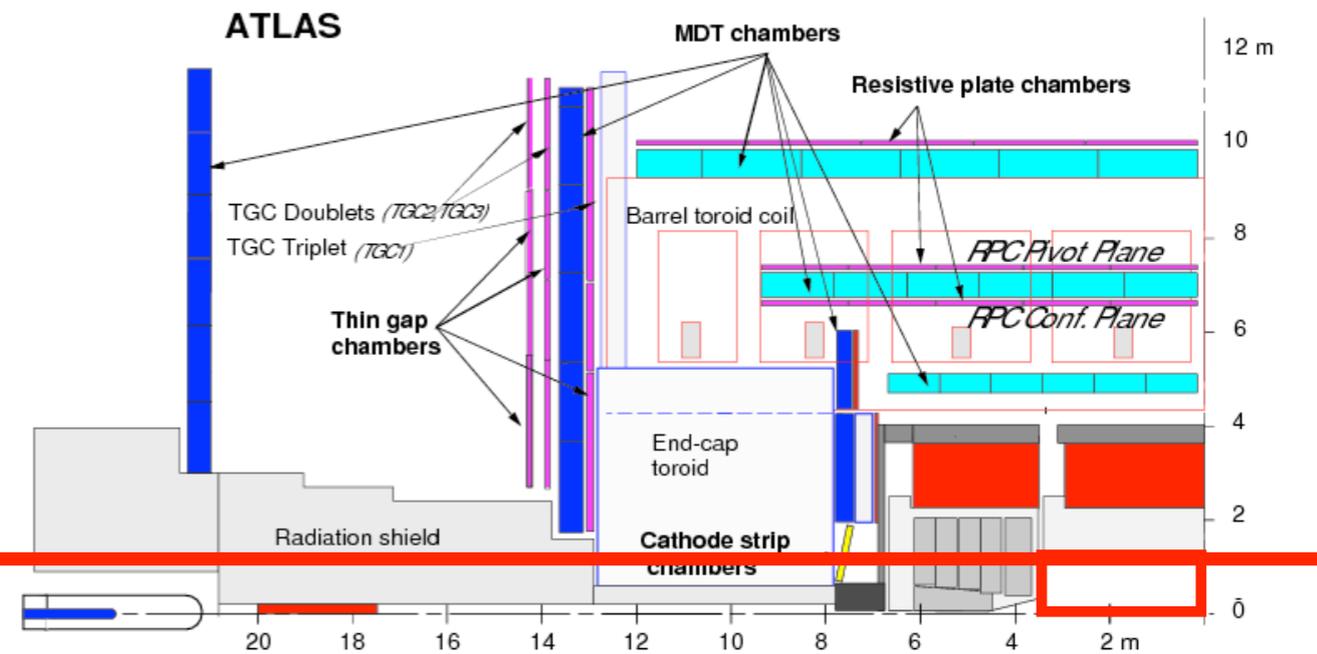
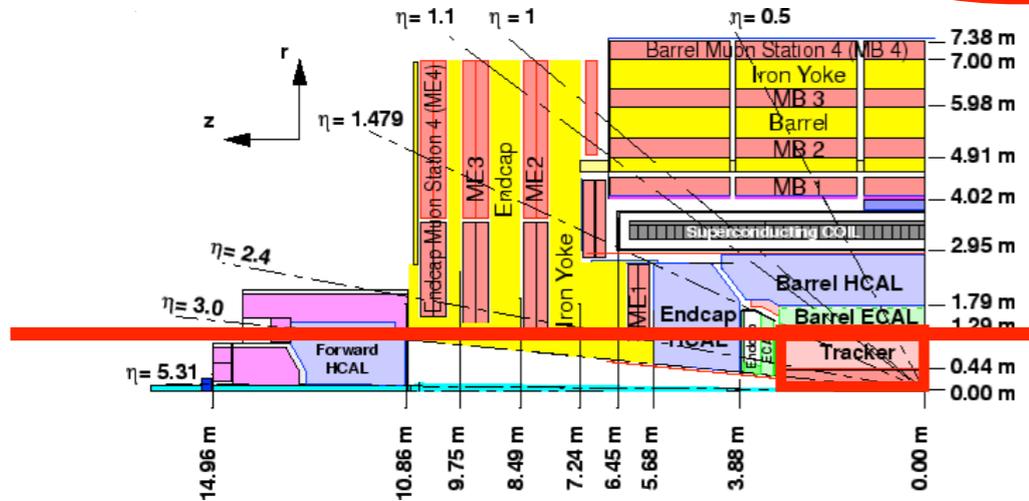
CMS : 3.8T (13 TeV)



ATLAS : 2T



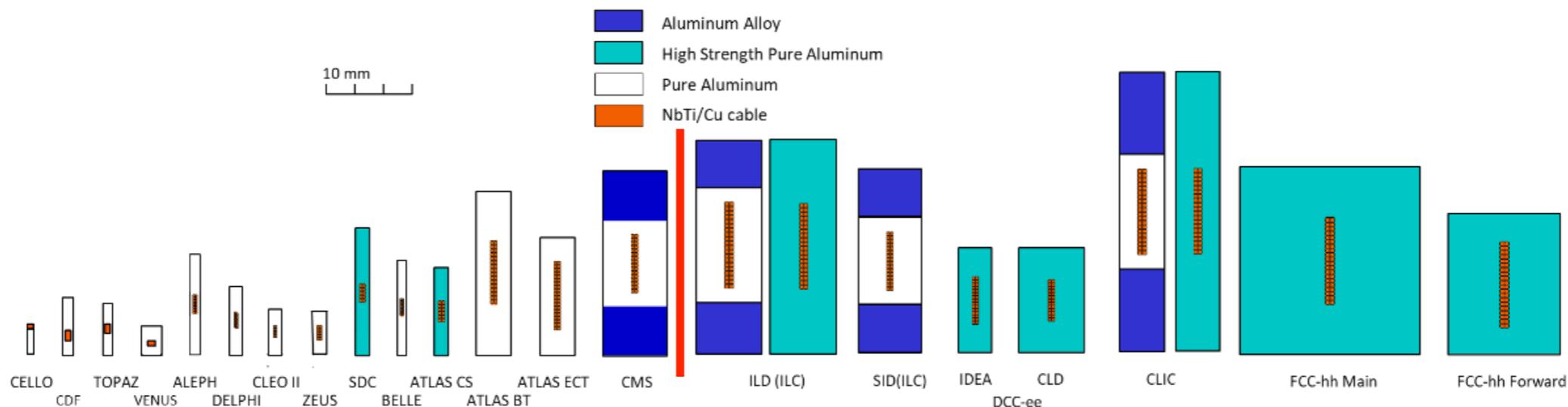
$$\left(\frac{\sigma(p_T)}{p_T}\right)^{meas} = \frac{\sigma(s)}{s} = \frac{\sqrt{\frac{3}{2}}\sigma(x)}{s} = \frac{\sqrt{\frac{3}{2}}\sigma(x) \cdot 8p_T}{0.3BL^2}$$



# Al 安定化線材

純アルミを高い断面比率(5以上)で銅マトリックスNbTi複合多芯線を被覆

- 安定化：励磁に伴う擾乱をアルミの熱容量で吸収し、クエンチの展開を抑制
- クエンチ保護：クエンチに発展した時のジュール発熱と温度上昇・電圧上昇を緩和
- 低物質質量：純銅と比べ1/3以下、物質質量増加を抑えつつ、安定化材の比率を上げる
- 電磁力支持：高強度の純アルミ開発により電磁力に対抗

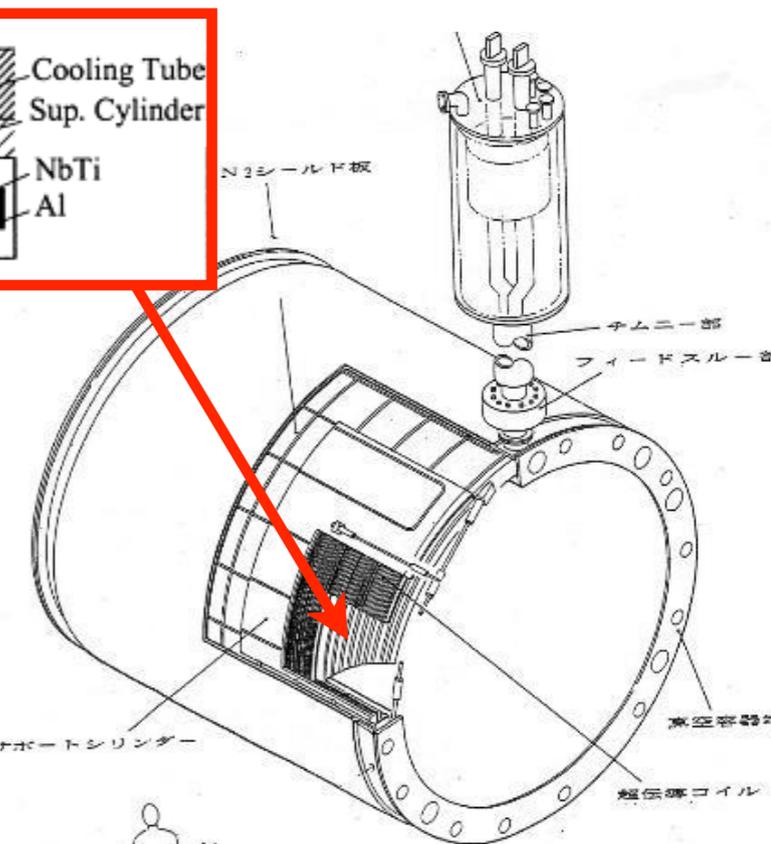
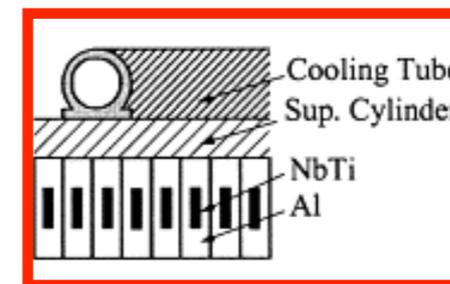
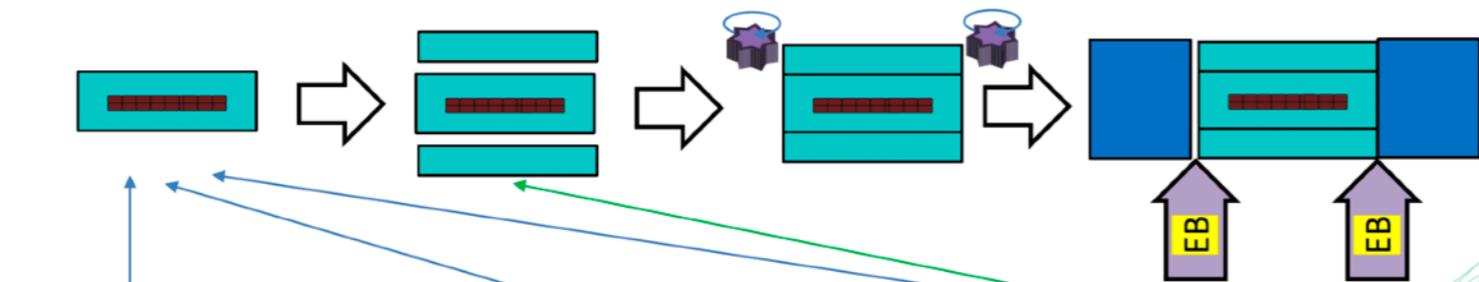


純アルミ(高強度)被覆

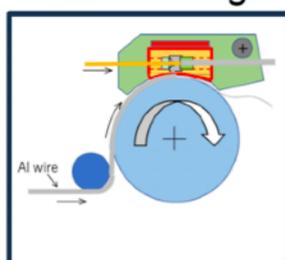
純アルミ(高強度)被覆

溶接面仕上げ

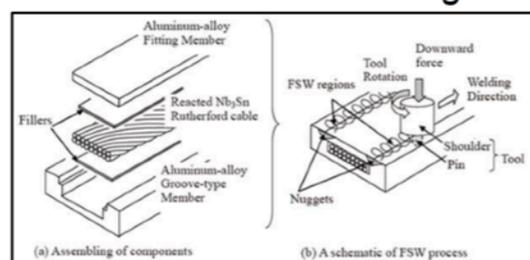
溶接面仕上げ



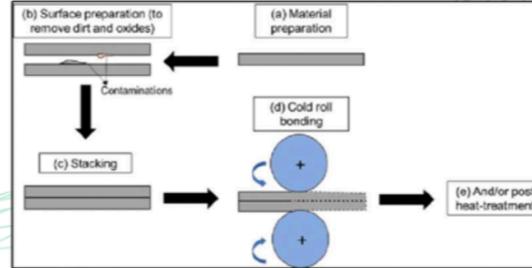
Conforming



Jacket & Welding



Clad Metal



この例は古河スカイ(現UACJ)

クラッド加エメーカーとの協力

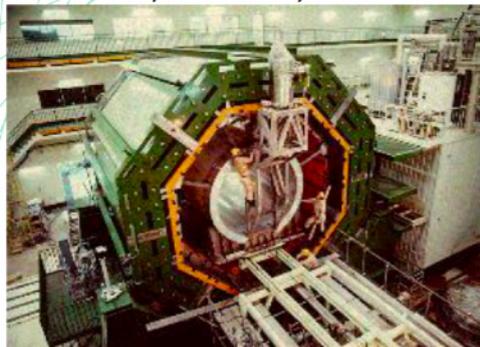
# AI 安定化線材

2024.6.12 素核研ワークショップ

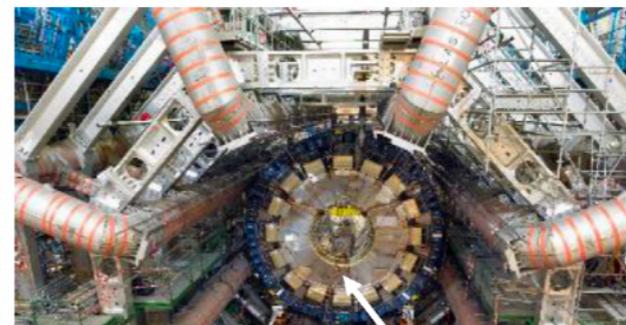
「将来コライダー実験に向けた共同研究」  
飯尾さんのスライドより

## History of superconducting solenoid development at KEK

トリスタン計画の3検出器  
VENUS, TOPAZ, AMY 1980年代



## ATLAS solenoid & toroid @LHC



ノーベル賞へ  
20年以上安定稼働

1997年定格励磁成功～

2001年定格励磁成功～

SSC計画SDC  
プロトタイプ1990'前半



SDCで開発した巻線機を試用

コライダー用磁石はこの後20年以上なし



気球による宇宙線観測用



COMET CS

COMET捕獲ソレノイド  
同じコンセプトで設計2010'

4/21

日本企業が貢献してきた

将来コライダー実験の巨大なソレノイド→より大断面導体が必要

- 実績のある全てのメーカーがアルミ安定化超伝導線の製造から撤退
- アルミ安定化線が世界的に供給できない状況

理由：磁石ごとに異なる仕様と少量の生産

断続的な需要、設備と人材の維持困難

# 低温グループからの共同研究の提案

2024.6.12 素核研ワークショップ「将来コライダー実験に向けた共同研究」  
飯尾さんのスライドより

## Joint research proposal

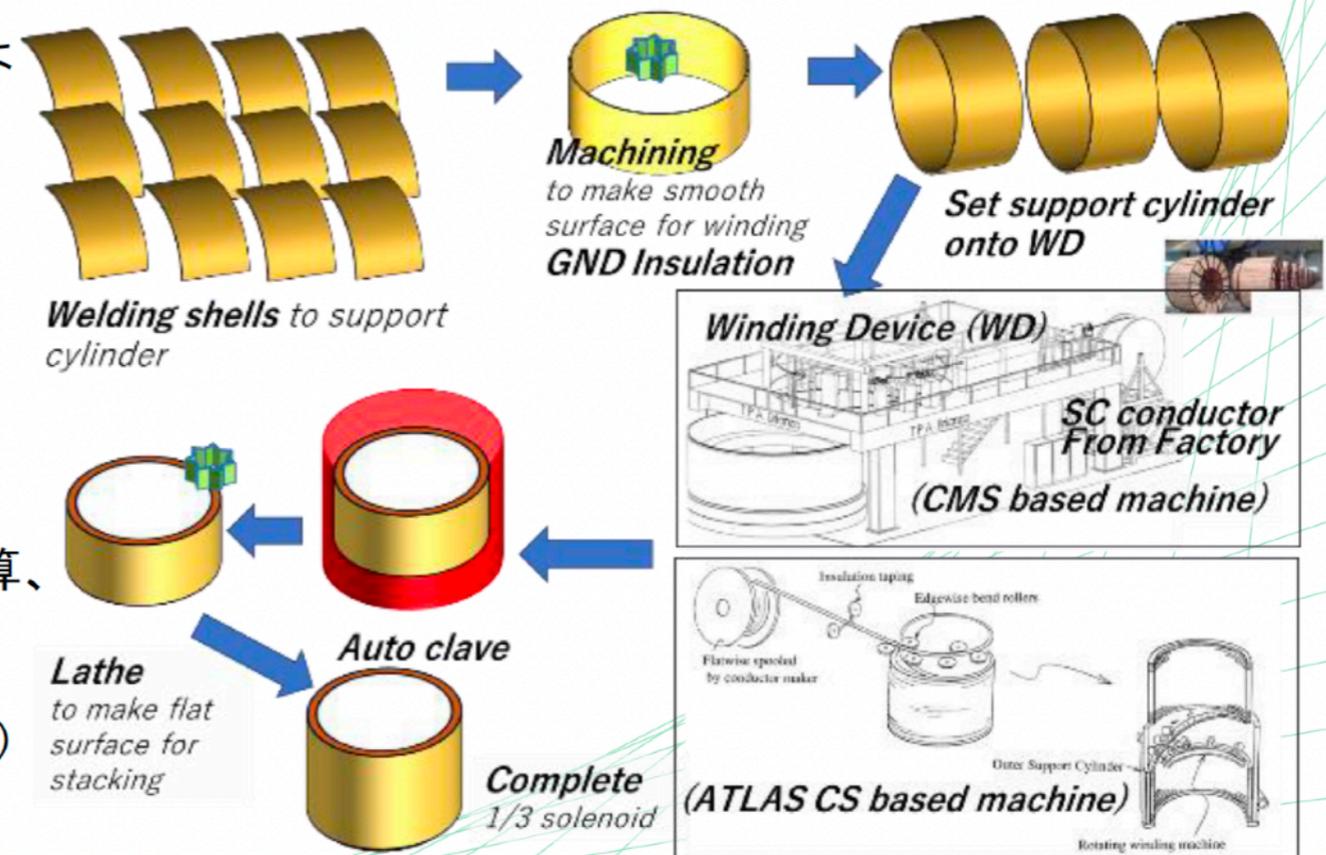
### Development of large solenoids for future detectors

#### 1. 将来の検出器用大型アルミ安定化線材の開発

- CERNが中心にアルミ安定化線供給体制を再構築しようとしているが、それに協力していく。
  - 日本の製造経験者からの情報を提供。
  - 再構築にあたっての技術情報を得る。
  - 可能な要素試験や要素開発があれば協力する。
  - CERNへ派遣し、解析などのマンパワーとなる。
- アルミ被覆法の代替案の検討。

#### 2. ソレノイド製造方法の開発

- ILDを一つの対象として詳細設計(磁場計算、応力計算、クエンチ計算、冷却計算等)を行う。
- コイルの製造方法について調査、検討。
  - CMSの実績の調査(コイルモジュールのドッキング)
  - 巻線機(多層直接内巻き)の開発
  - 残線を使ってモデルコイルの作成し、製造にかかる技術要素の検証をする。



→ HTSを使った電磁石開発などへの発展も検討できる

ILD検出器の基礎開発を主な研究プロジェクトとする  
大学のスタッフと学生などに真面目に考えてもらいたい

# 測定器開発プラットフォームとコライダーエレクトロニクスフォーラム ～ユーザーが進めるボトムアップ研究～

プラットフォームA  
光センサー, シンチ  
越水 (静岡大), 西田 (KEK),  
南條 (阪大)

シンチレータ開発  
光センサー開発  
⇔  
技術応用 (医療等)

プラットフォームC  
ガス検出器+アクティブTPC  
坂下(KEK), 身内(神戸大)

GEM, micromegas,  $\mu$ -PIC  
Ar/Xe TPC

## 分野を超えた共同開発の場

- ・ 共同研究 (ITDC自身の開発も含む) の推進
- ・ 測定器開発装置や研究スペースの共用
- ・ ワークショップなどによる情報交換

幅広い研究機関  
大学, 理研, 高専, 企業, 都立産業技術研究センター

幅広い分野からの参加  
宇宙, 素粒子, 原子核, 物性, 工学, 医療

プラットフォームB  
シリコン検出器  
東城 (九大), 外川 (KEK)

モノリシックセンサー開発  
検出器組み立て技術

コライダーエレクトロニクス  
フォーラム (CEF)  
山田, 長野, 本多(KEK),  
堀井(名大),

高性能FPGAと高速データ転送技術

A, B, Cそれぞれが30人程度の参加者でスタート  
↓  
A : 73人, B : 51人, C : 49人, CEF : 25人程度

数と研究テーマは機動的に更新していく ← ユーザーからの要望次第

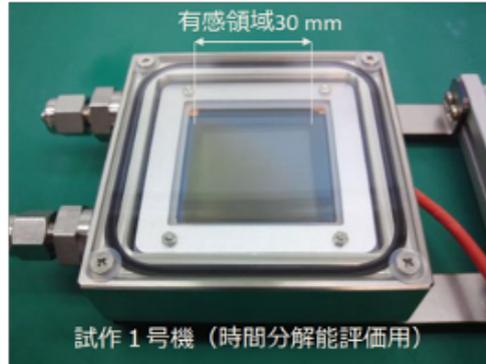
# 測定器開発プラットフォーム A

## Keyword: Photodetector + Scintillator

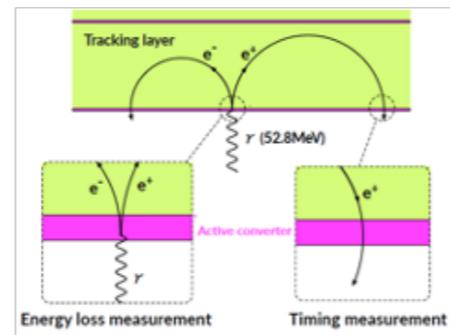
世話人：越水(静岡大)、南條(大阪大)、西田(KEK)

- 光検出器の開発や情報共有
- 高機能なプラスチックシンチレータの開発

GaPMT (KEK, 名古屋)

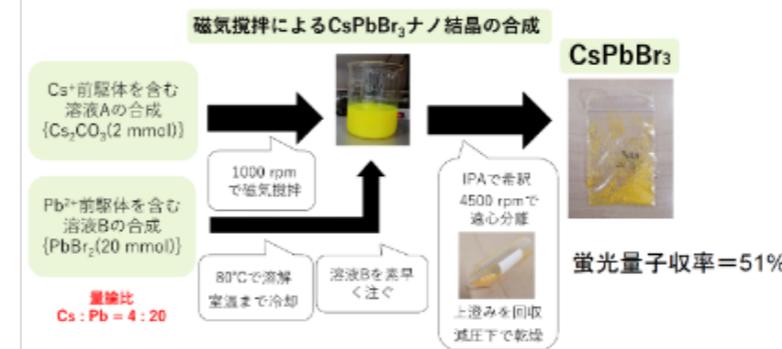


$\mu \rightarrow e\gamma$ 用アクティブコンバーター(東大)



シンチレータ開発

追加2 ペロブスカイト量子ドット合成の現状



富士実験棟B3  
(プラットフォーム共同実験室)

- KEK 富士実験棟B3 (測定器開発プラットフォーム)



年に2回ほど研究会をしています。

次回:シンチレータ高度化研究会2024 @ 静岡大  
<https://kds.kek.jp/event/51167/> (9/30-10/1)

紫外線硬化シンチレータの作成などを行います(講演もあります)。参加者募集中。



# 測定器開発プラットフォーム B

## Keyword : Semiconductor

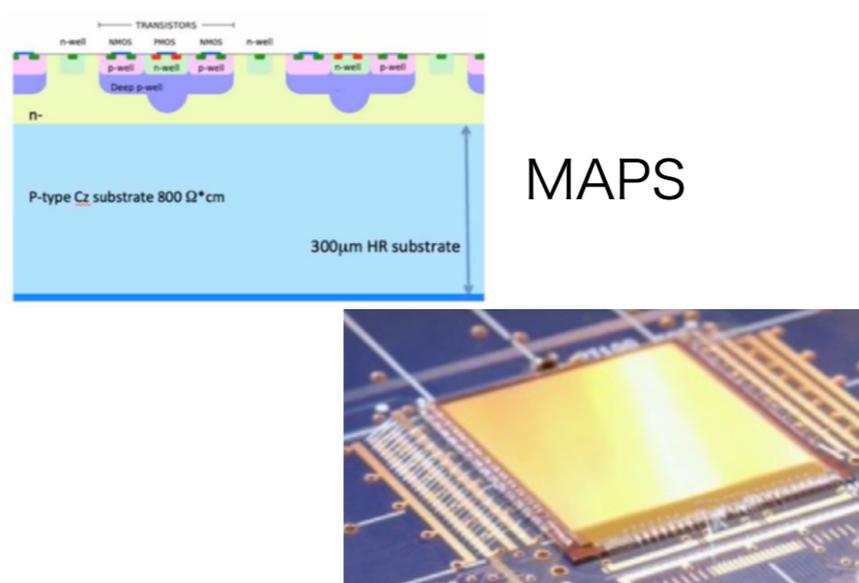
世話人：廣瀬茂輝（筑波大）、外川学（KEK）

- 半導体検出器についての情報共有、共同研究

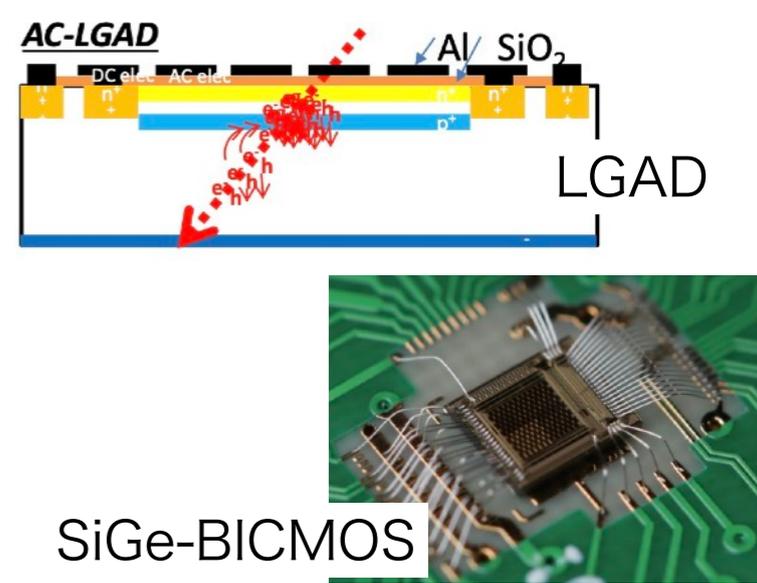
Pixel, Stripセンサ



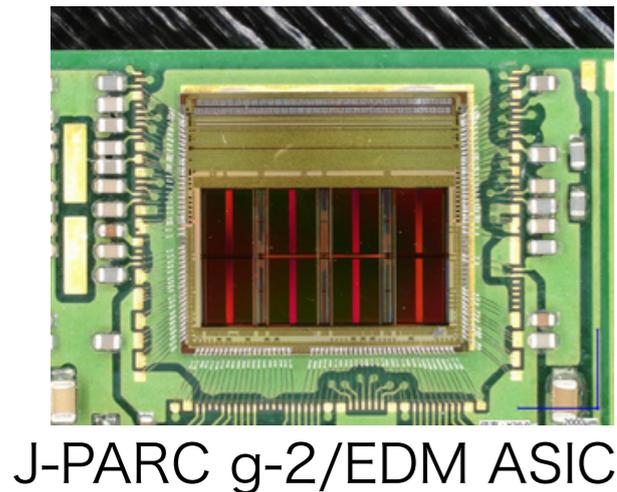
モノリシック検出器



高速応答 (< 30 ps)



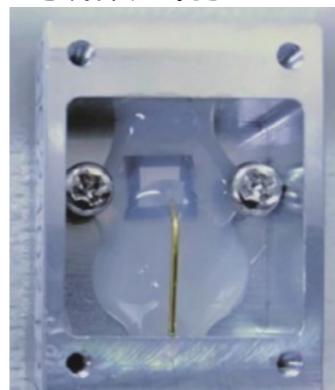
ASIC



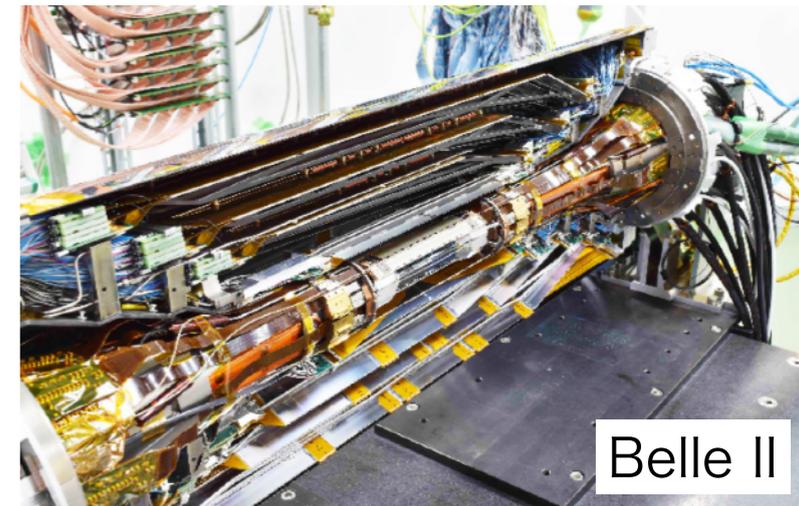
シリコン以外の半導体検出器



高放射線耐性  
対熱、耐圧



組み立て、建設に関する議論



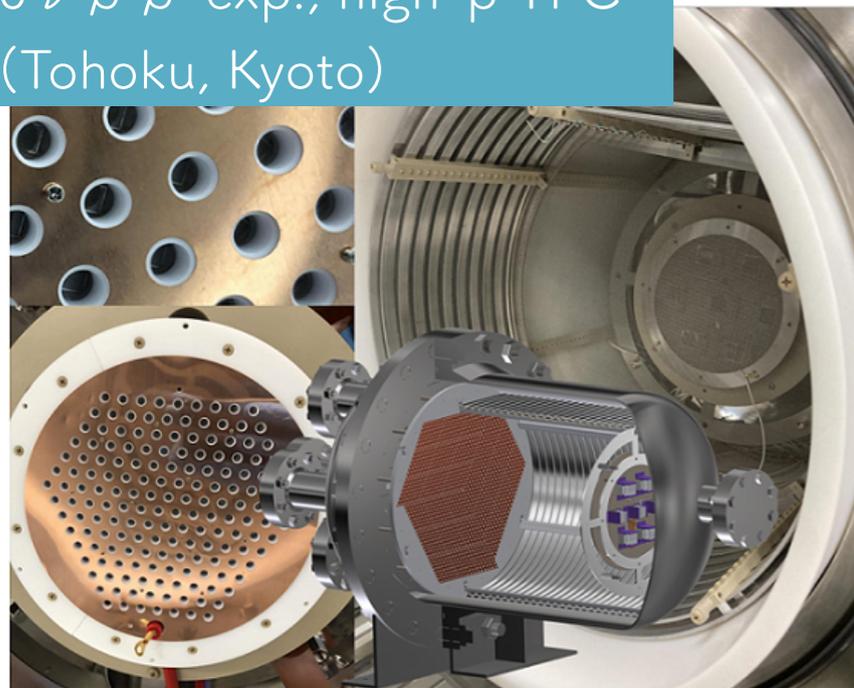
# 測定器開発プラットフォーム C

Keyword : Gas detectors, Active-medium TPC

世話人 : 身内 (神戸大)、坂下 (KEK)

Knowledge sharing and cooperation on common key technologies (e.g. high voltage, light readout, gas amplification, charge readout, cryogenic technology, etc.) R&D

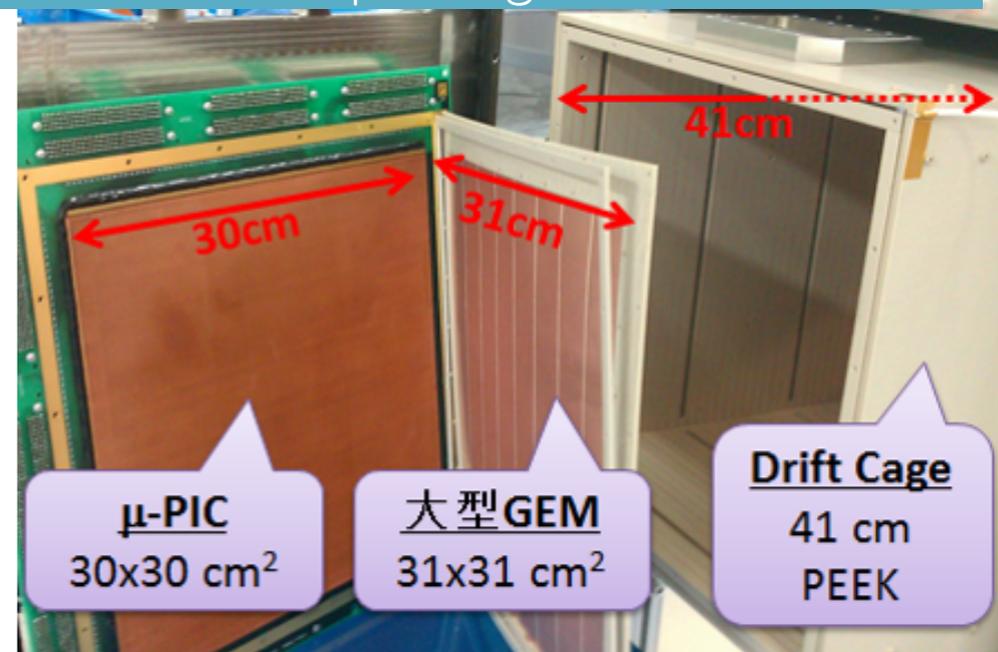
$0\nu\beta\beta$  exp., high-p TPC  
(Tohoku, Kyoto)



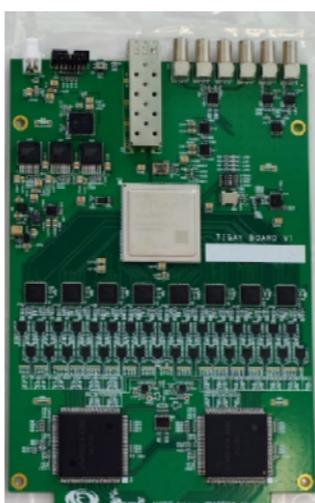
Xe gas TPC (Tohoku, Kyoto)



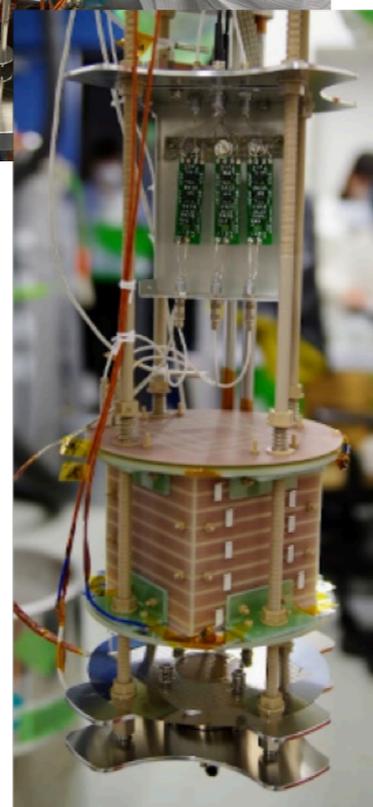
Dark Matter exp., Large  $\mu$ -PIC (Kobe)



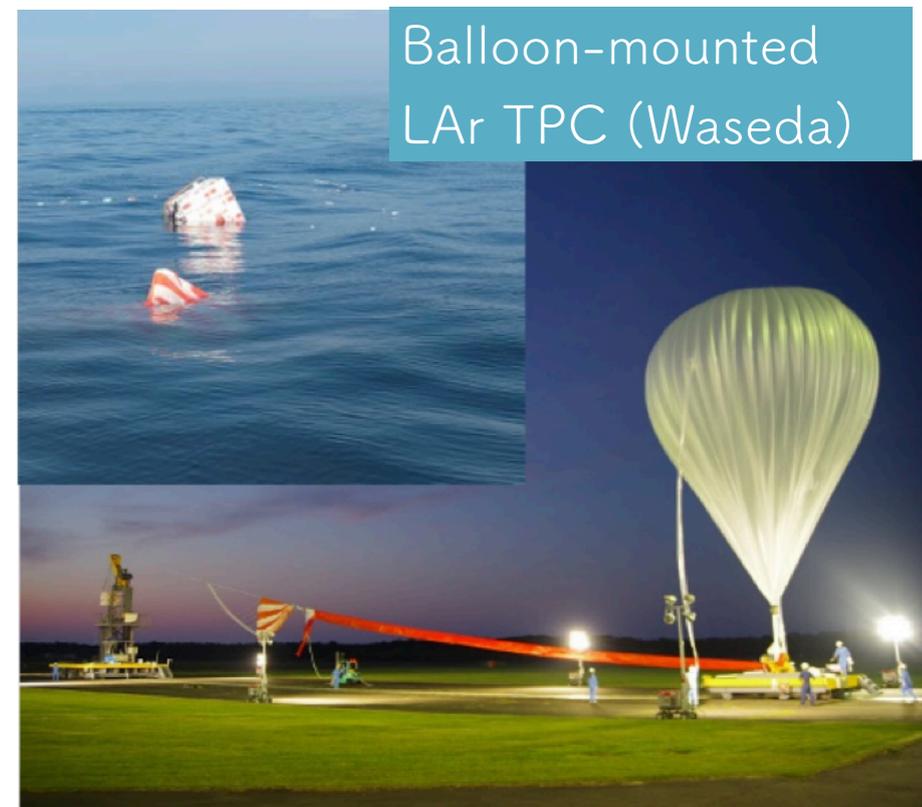
LAr TPC (KEK, Iwate)



Readout ASIC  
Board



Balloon-mounted  
LAr TPC (Waseda)



# コライダーエレクトロニクスフォーラム

23

世話人：山田、長野、本多（KEK）、堀井（名古屋）

プロジェクト、大学・研究機関の垣根を超えた回路開発

→ 研究会の議論の中で共同開発要素の提案（20-30名の参加者）

→ 共同開発の立ち上げ

ACAP FPGA (Xilinx Versal FPGA) Task Force（～15名ほどが興味）

VCK 190



AI Engine 搭載のVersal FPGA test board

Belle II UT4



VPK120



高速光通信 PAM 4  
搭載など Peripheral  
が充実のVersal FPGA  
test board

## 今後の戦略

- より多くの人に認識・参加してもらえるように宣伝を強化する
- より多くの共同開発要素を見出して実践する → 定期的な勉強会、戦略会議の開催
- 欧米の検出器 R&Dプロジェクトとの共同開発を行う中心的な場にする

# 測定器開発テストビームライン

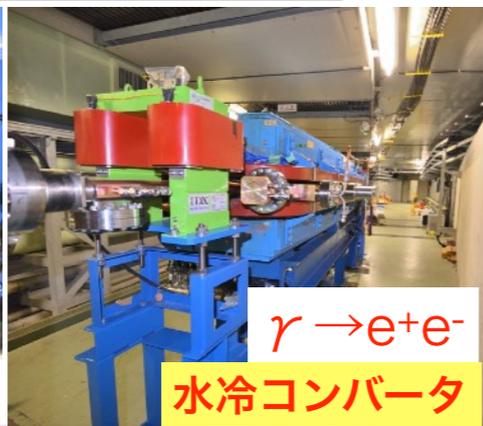
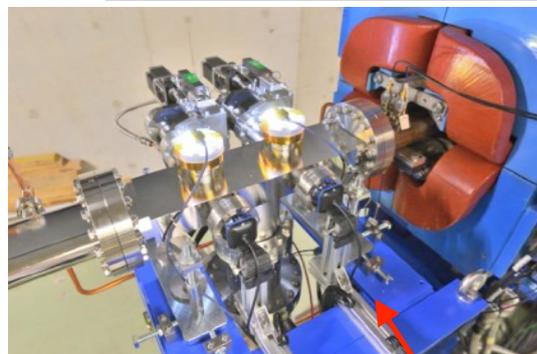
- 2023年6月より測定器開発テストビームラインの本格運用を開始

PF-AR

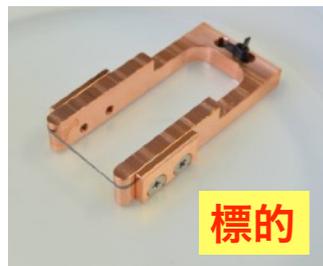
5GeVもしくは6.5GeV

50-55mA top-up運転

シングルバンチ1.257  $\mu$ s周回周期

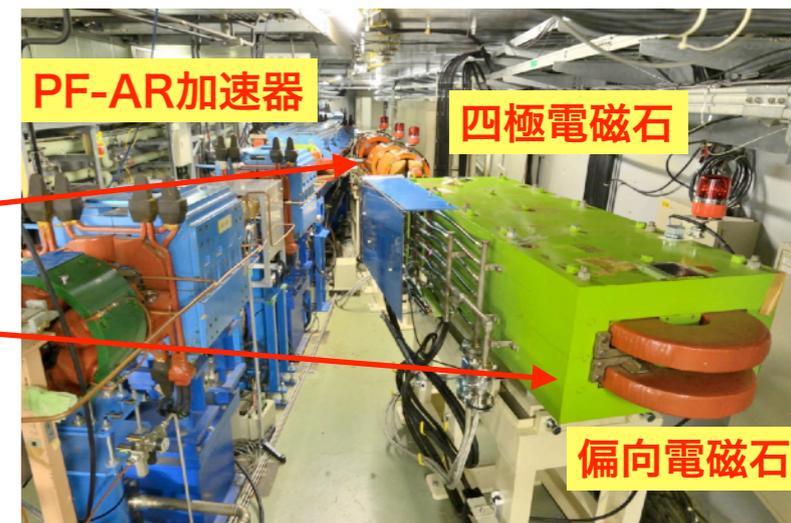
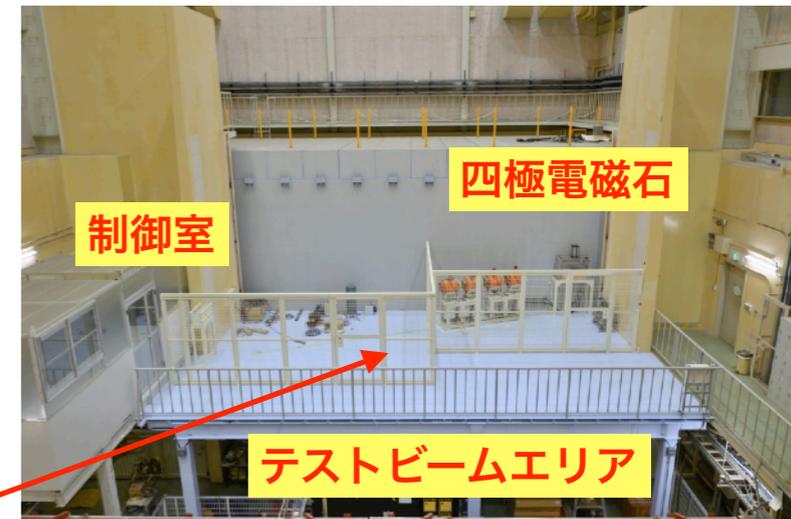
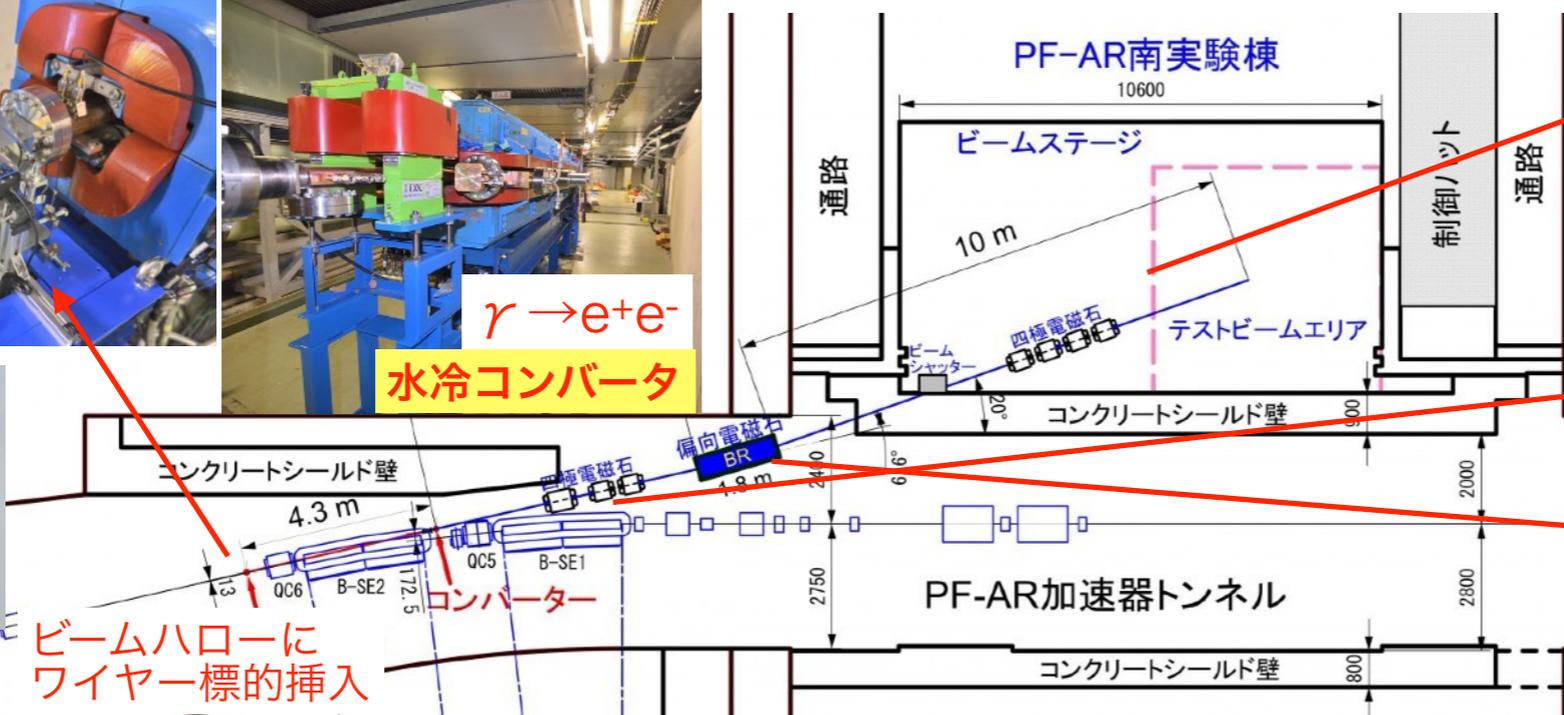


$\gamma \rightarrow e^+e^-$   
水冷コンバータ



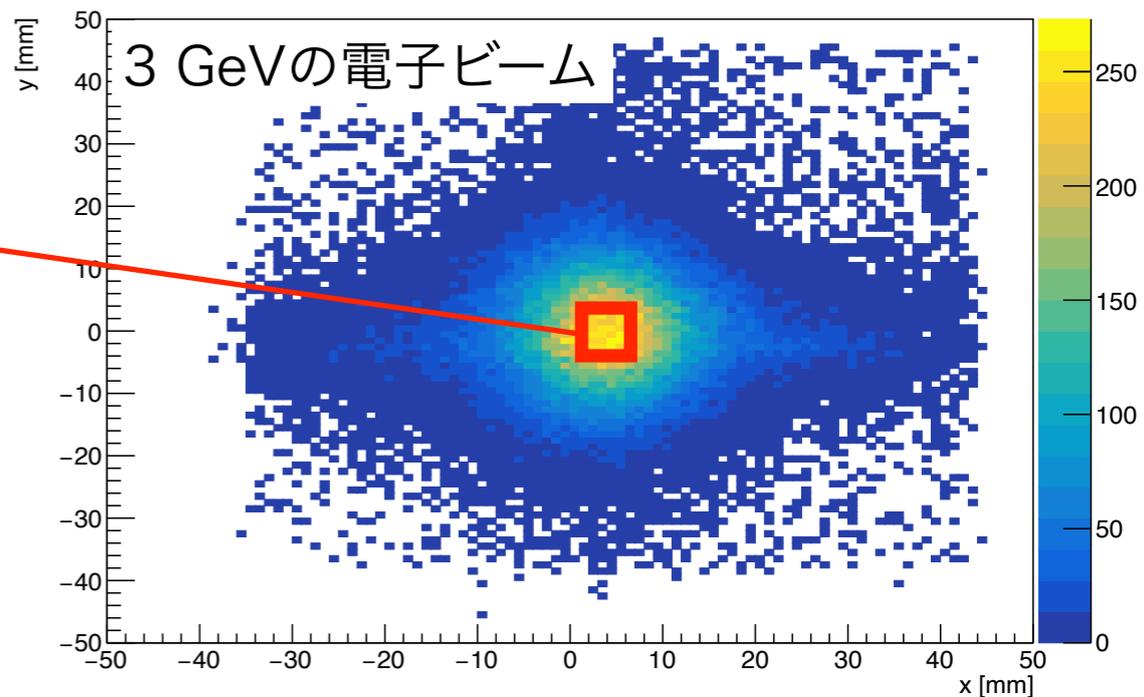
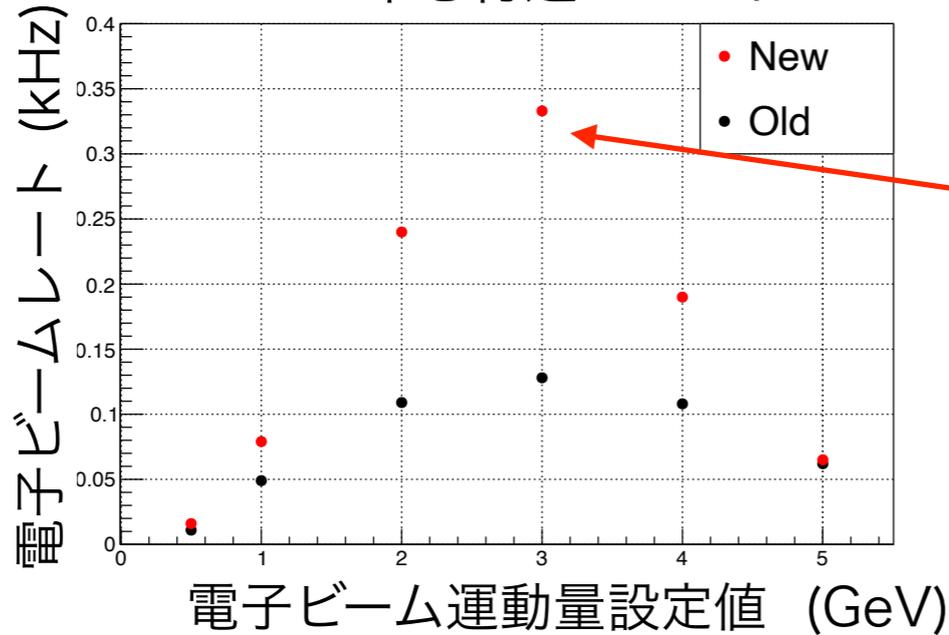
標的

ビームハローにワイヤー標的挿入



- 21 研究課題
- 1 教育課題 受入
- のべ150人利用
- 35 学会発表
- 16 修士論文
- ビームタイム：  
5-6月期  
10-12月期  
2-3月期

ビーム中心付近のレート



# まとめ

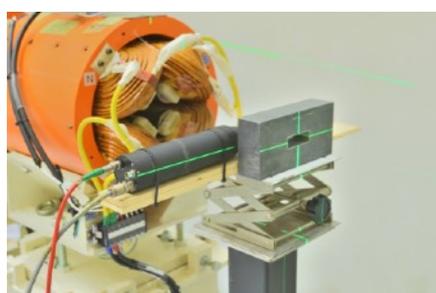
- 将来計画に向けた測定器開発が進行中
  - 測定器開発センター主導のtop-downプロジェクト
    - ▶ **半導体検出器開発** → **一緒に研究したい人募集中**
    - ▶ **アルミ安定化線材の開発**
  - 測定器開発プラットフォームを活用したボトムアップ開発
    - ▶ Photodetector+Scintillator
    - ▶ Semiconductor
    - ▶ Gas detector + Active medium TPC →興味ある人は世話人に連絡
    - ▶ Collider Electronics Forum
- 国内外の研究者が集って測定器開発を進めるための場を構築中
  - 測定器開発テストビームライン（電子ビーム）運用中
    - ▶ ハドロンテストビームライン新設に向けた議論を開始
  - **テストビームラインの増強・新設に向けたstudyをする人募集**
  - 半導体検出器開発のための大規模クリーンルームなどインフラを整備・充実していきたい
  - **コミュニティからの意見・要望をお待ちしています**

backup

## コミュニティやKEK内所施設とともに共同研究を推進する測定器開発の国際拠点 イノベーションの芽と人材の育成

### 大学共同利用部門

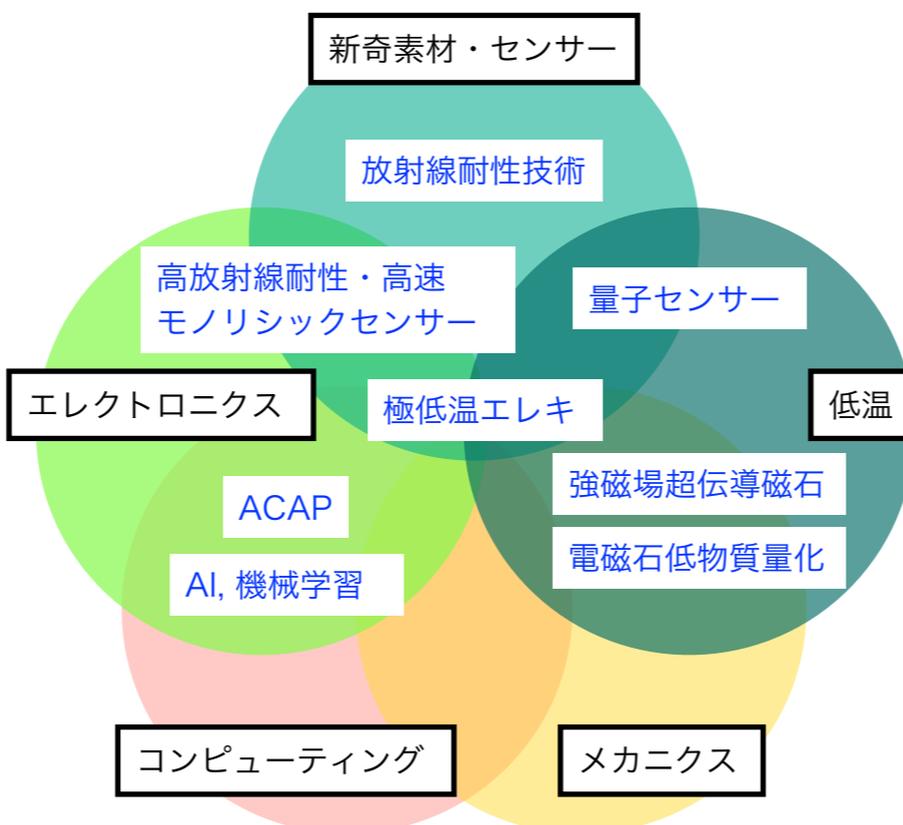
- テストビームラインなど KEKならではのインフラ活用による大学共同利用機能の強化
- 測定器開発の効率向上  
→ 開発速度の向上, 開発コストの削減



- 簡便な利用システムの構築により, 幅広いユーザーが利用可能  
→ 大学院生などの若手研究者が自由な発想で活用  
→ 若手人材育成
- OJTによる研究者育成

### 次世代技術開発部門

- 次世代プロジェクトを支える基幹技術開発  
← 出口応用は各プロジェクトで実施
  - ◎ 各プロジェクトのサポートも継続
- コミュニティと共に開発を推進する測定器開発プラットフォームを複数定義し, ボトムアップ研究
  - ◎ 数と種類は機動的に更新
  - ◎ 研究者の交流を促進するインターフェース
- センター主導での開発の候補
  - ◎ 極低温冷凍機, 強磁場・低物質質量超伝導磁石
  - ◎ モノリシックピクセルセンサー



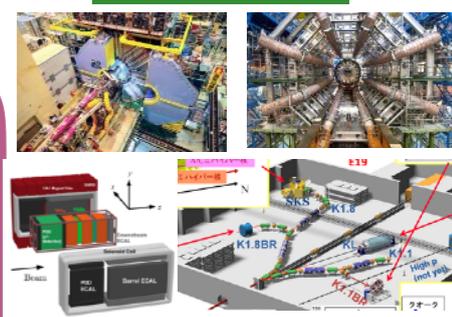
### 測定器開発プラットフォーム

- 低温技術
- メカニクス技術
- センサー技術
  - 光センサ+シンチ
  - 半導体センサー
  - ガス&アクティブ媒質
- エレクトロニクス技術
  - センサfrontend
  - センサ高機能化
  - 計測システム構築
  - コライダーエレクトロニクスフォーラム
- コンピューティング技術

SPADI alliance

### コミュニティ

#### 素核研内連携



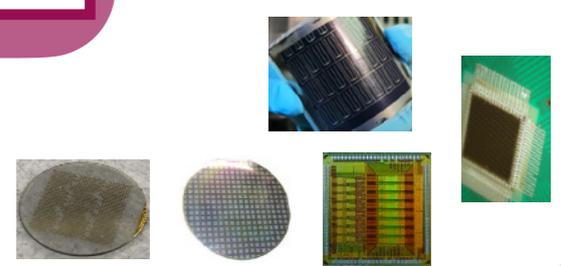
#### KEK内所施設連携



#### 大学との連携



#### 産学連携

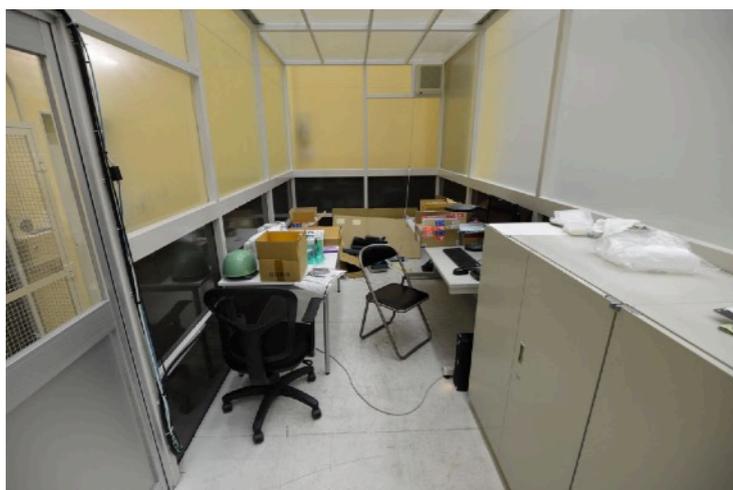


# インフラ整備

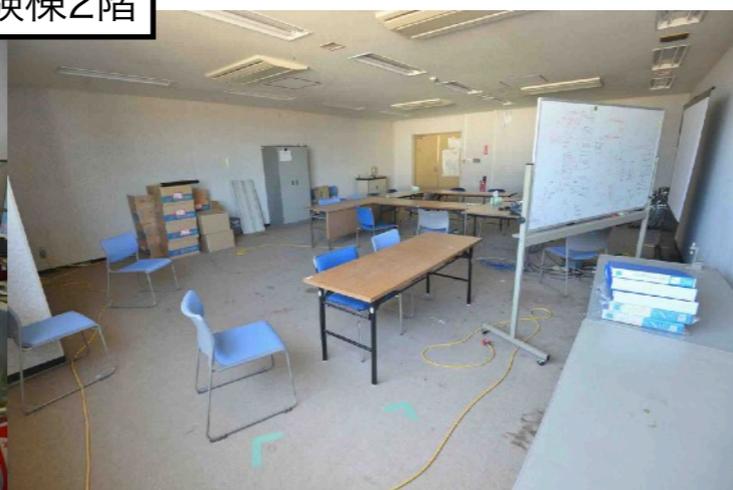
テストチームユーザー控え室



テストチームカウンティングルーム



富士実験棟2階



各種ユーザー控え室

