

日本物理学会 2021年 秋季大会

sPHENIX実験INTTシリコン検出器用 データケーブル 量産の取り組み

蜂谷崇^{A,B},

秋葉康之^C, 今井皓^D, 近藤崇^E, 柴田実香^A, 下村真弥^A, 高濱瑠菜^A,
中川格^C, 並本ゆみか^A, 糠塚元気^B, 長谷川勝一^F, 森田美羽^A

奈良女子大理^A, 理研BNL^B,
理研^C, 立教大理^D, 都立産技研^E, JAEA^F



国立大学法人
奈良女子大学
Nara Women's University



sPHENIX実験とINTT検出器

sPHENIX実験

RHIC加速器で2023年から始まる実験である。

$\sqrt{s_{NN}} = 200\text{GeV}$ のAu+Au衝突させ、クォーク・グルーオン・プラズマ、QGPの物性解明を目指している。

INtermediate Tracker, INTT検出器

sPHENIX実験の飛跡検出器の一つ。

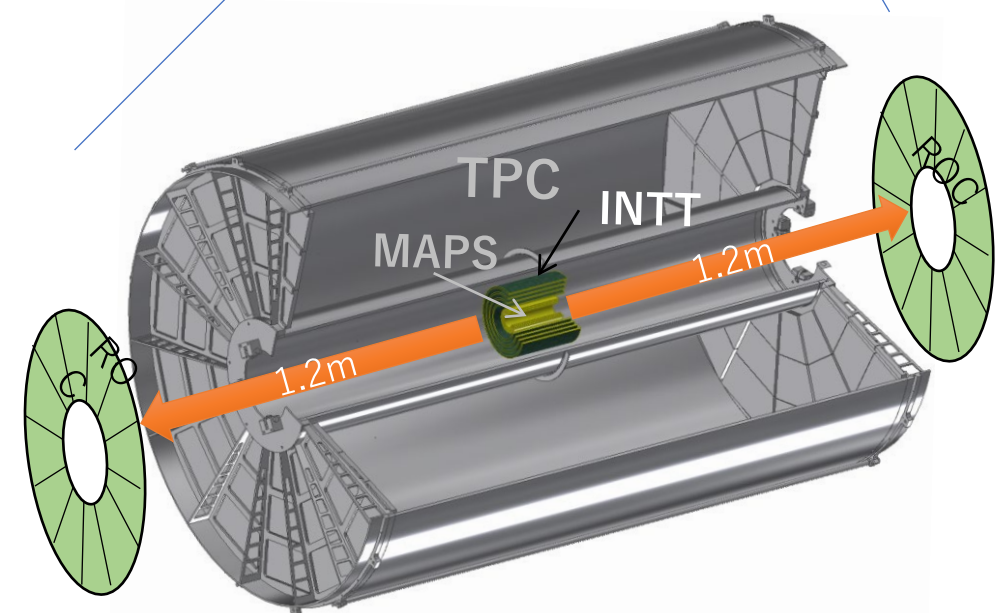
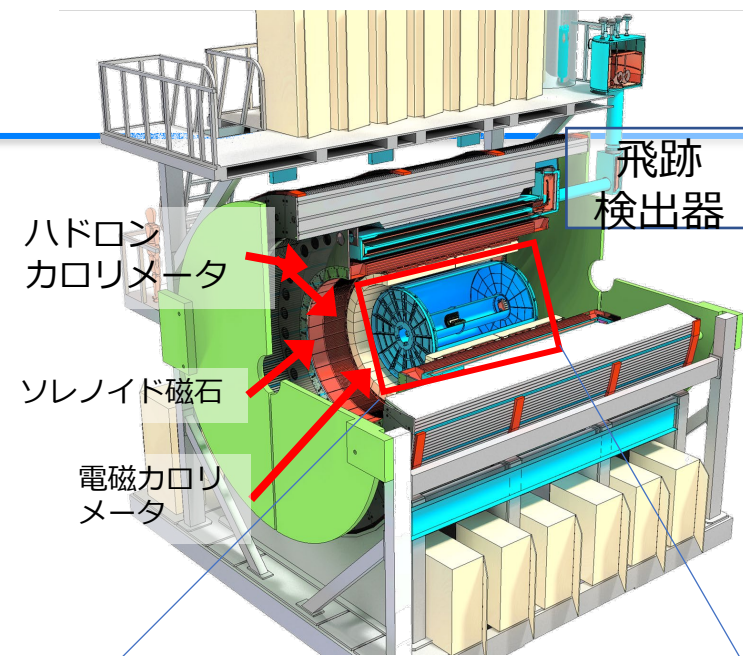
ストリップ型シリコンセンサーによる2層の円筒型の検出器であり衝突点近傍に設置される。

長尺データケーブル - バスエクステンダ

大量のデータを1.2m離れたデータ処理回路ROCまで伝送する。
設置場所の制約から5cm幅程度の狭く曲がった空間に収まる。
データケーブルに対する要求。

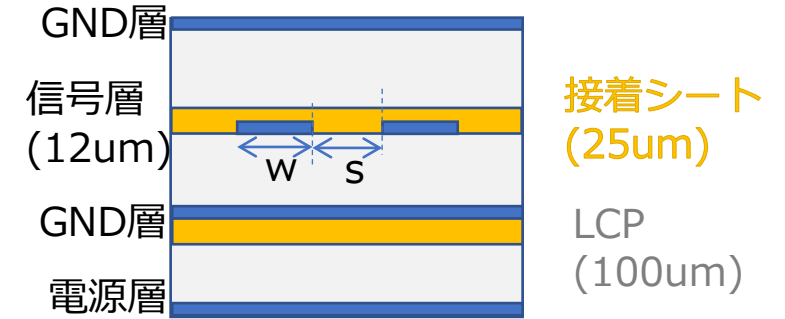
- 長さ ~ 120cm
- 配線密度 = 62 対のLVDSペア + Power/GND
- **通信速度 = 200 Mbps LVDS ($Z_{diff}=100\Omega$)**
- スペース制約 ~5cm幅に収まる柔らかいケーブル

要求を満たすケーブルは市場に存在せず、独自に開発した。



長尺データケーブルの開発

- ケーブルは、柔軟性と微細配線性を持つフレキシブル基板FPCの技術を応用した。
- データケーブルのデザイン
 - 長さx幅: 120 x 5 cm²
 - 4層構造(信号,GND層x2, 電源層)
 - 配線数: 62対 (Line and space : 130 & 130 μm)
 - Z_{diff}: 100Ω ストリップライン構造
 - 信号層はGND層で挟み込まれている
 - 誘電体として新素材：液晶ポリマー (LCP)を採用
 - ポリイミドに比べ誘電率(主に誘電正接)が低く、伝送損失が少ない。
 - これらのデザインはプリント基板の電磁界シミュレーションを用いて決定した



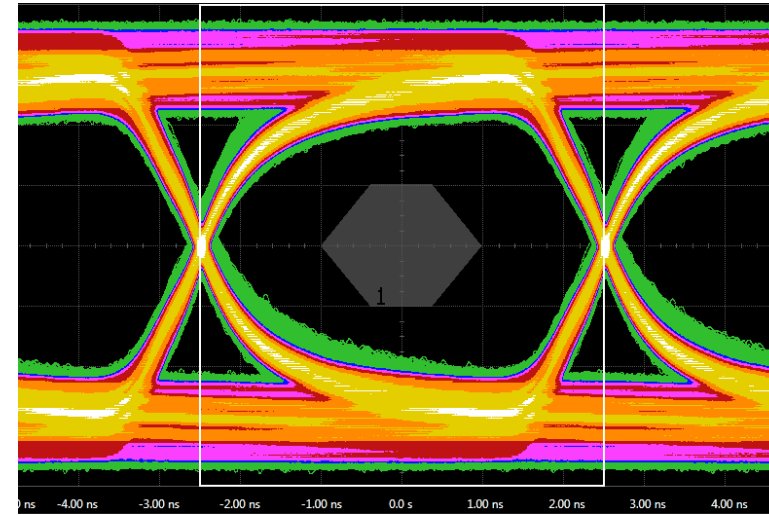
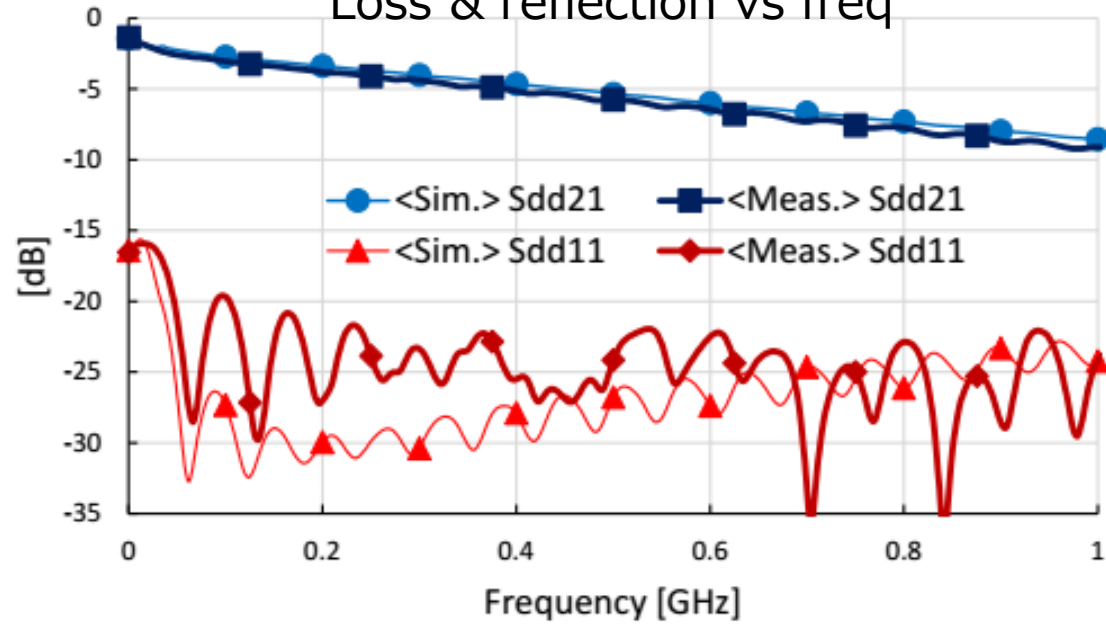
4層は接着剤によって張り合わせている

- これまでの研究で、電気特性(減衰、Zdiff、アイダイアグラム)は理解した
- 課題： 独自開発のため、データ伝送特性だけでなく、放射線耐性や長期安定性も調べる必要がある。
- 試作したバスエクステンダ (技術検証のため製造可能な最大長130cmで試作)

試作データケーブル



Loss & reflection vs freq

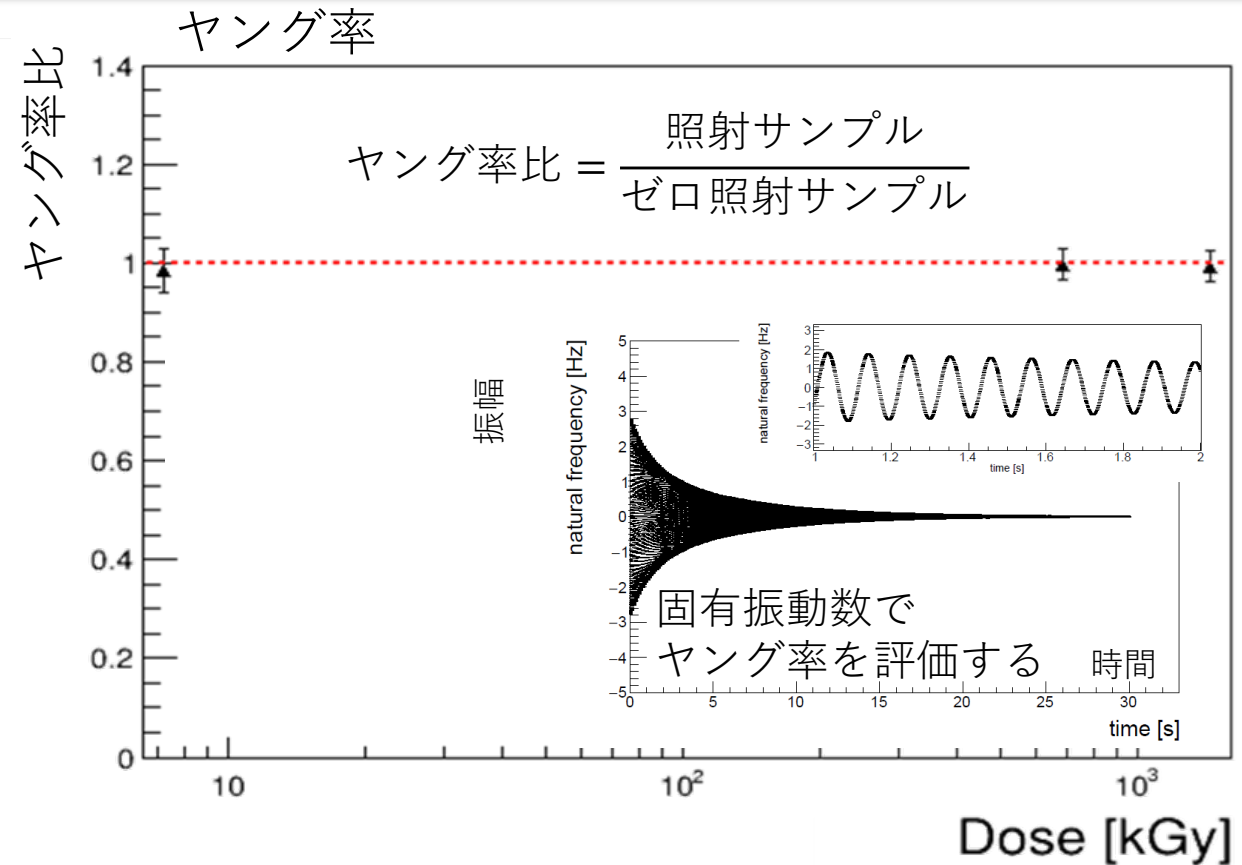
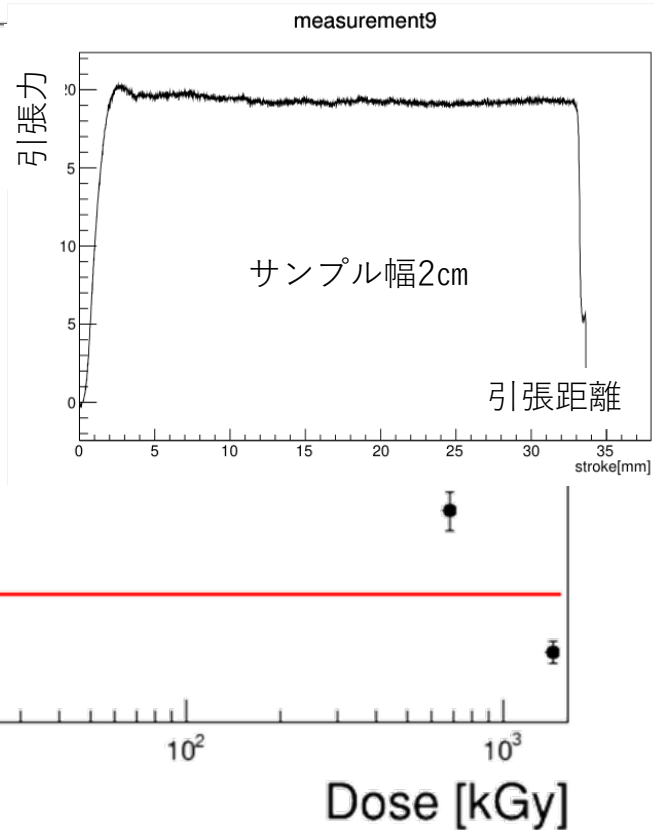
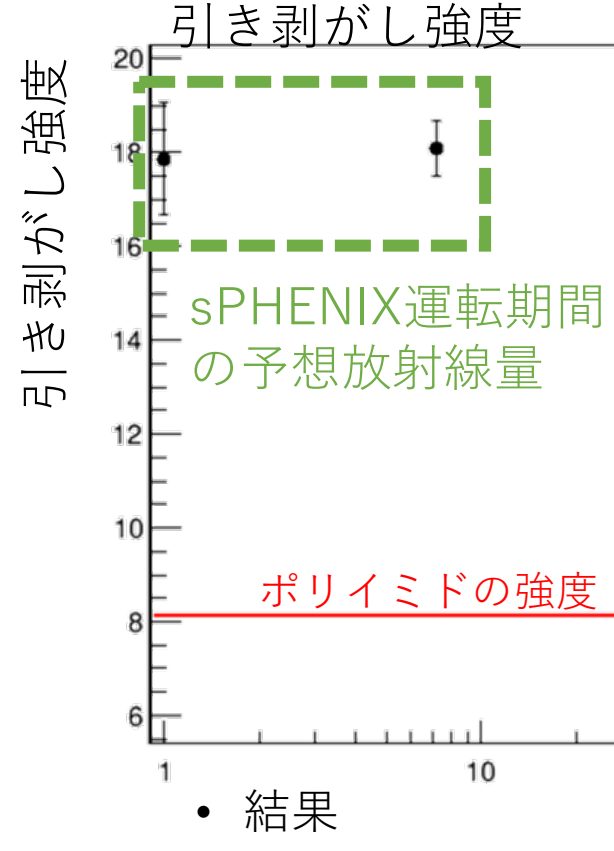


- sパラメータによる評価
 - 伝送損失：~30%、
 - 反射損失：< 10%

- 十分なEye開口
 - 電圧 vs 時間空間で、伝送に余裕がある。

ELEX(電気電子情報学会)に論文投稿済み

測定結果は、電磁界シミュレーションによる予測と一致
試作機は、仕様の性能を満たした。



- 引き剥がし強度:
 - 5kGy(～sPHENIX運転期間の予想被ばく量)までは変化なし。その後、緩やかに減少する。
 - 放射線量が高くなると、接着剤が劣化するという仮説を確認した。
- ヤング率: 1000kGyまでの照射では変化なし

バスエクステンダが十分な放射線耐性を持っていることを確認した。

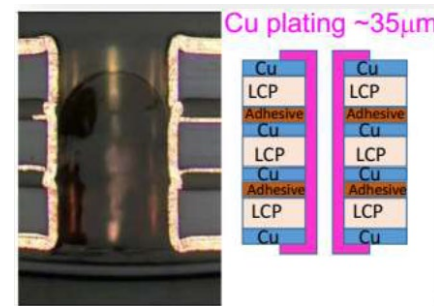
熱衝撃による加速試験

- 温度変化によって物理的な負荷を与える
 - LCPは温度膨張率が高く、温度によって大きく膨張・収縮する。
 - スルーホールの銅メッキが膨張ストレスでダメージを受け、限界を超えると破断する。
- 熱衝撃試験の条件
 - -15°C(30min.) ~ 75°C (30min.) を1-2分の短時間で急激に変える。
 - 通常の熱サイクル試験よりも厳しい条件。
 - 1000 cycles (~40 days)
 - 冷熱衝撃試験機 TSA-71H-Wを使用
- テスト用FPC サンプル
 - 実際のケーブルと同じ4層構造。3枚
 - 各400, 1000, 1000個のスルーホールを直列につなぎ合わせ、抵抗値を監視する。もしスルーホールがダメージを受けると抵抗値は増大し、破断すれば無限大になる。
- 結果
 - 抵抗値は温度によって多少変わるが40日間一定を保った。
 - 1000サイクルのテスト終了時、全サンプルが良好であった。

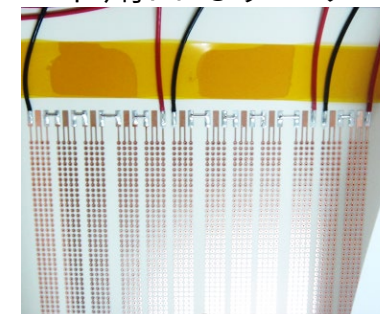
1000サイクル = 少なくとも8年以上

sPHENIXの運転期間(3年)を超える長期安定性

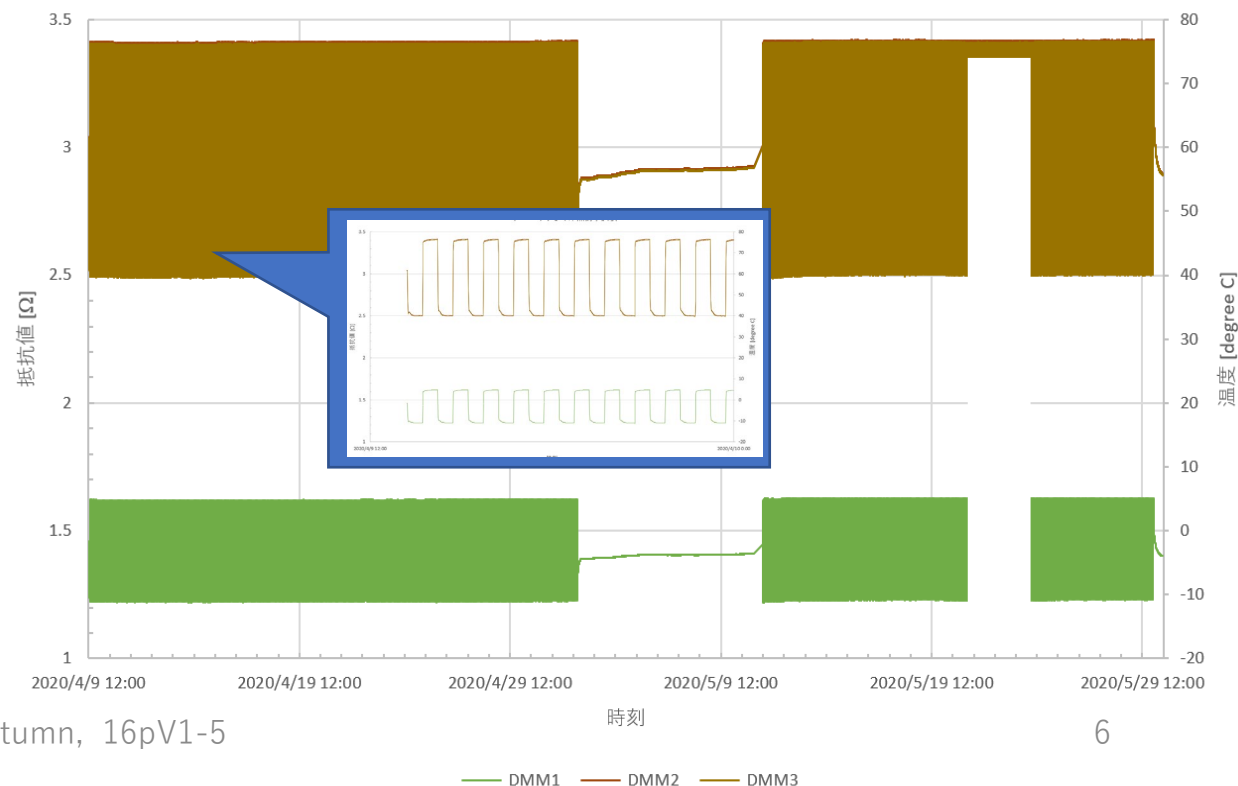
スルーホールの断面図



ディジーチェーン接続した
テスト用FPCサンプル



スルーホールめっきの冷熱衝撃試験



長尺データケーブルの開発完成

- 電気特性、安定性は要求を満たす
- 試作から製造パラメータは最適化済み
- 歩留まりが低く、要対策 30~50%

- 量産 140本(予備込み)
- 歩留まり問題への対策が課題
 - 配線の断線やショートが発生
 - 製造過程で問題発生を調査

製造過程

単層形成

多層化

露光

エッチング

積層

スルーホール
形成
・ドリル
・銅メッキ

表面層

部品実装

歩留まり発生箇所

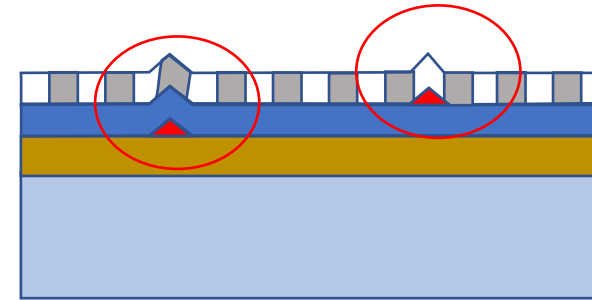
配線の断線やショート

解決済み

接着強度が低い スルーホール壁 内外層の配線ずれ
面にヒビやコブ

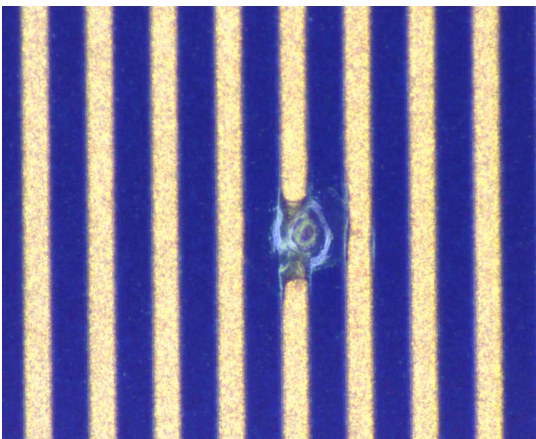
断線やショートの原因と対策

- 断線やショート箇所の調査
 - 露光やエッチング不良が起こっている。
- 原因
 - 小さなホコリが原因でドライフィルムの密着が悪化
 - 露光やエッチング不良が発生
- 対策
 - UVライトによるホコリの可視化+シリコンローラーによる除去



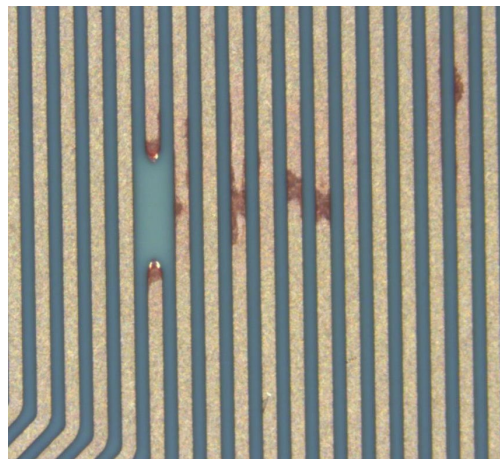
露光マスク
ドライフィルム
銅箔
LCP } 基板材

露光ミス



2021/9/16

エッチングミス



JPS2021 Autumn, 16pV1-5



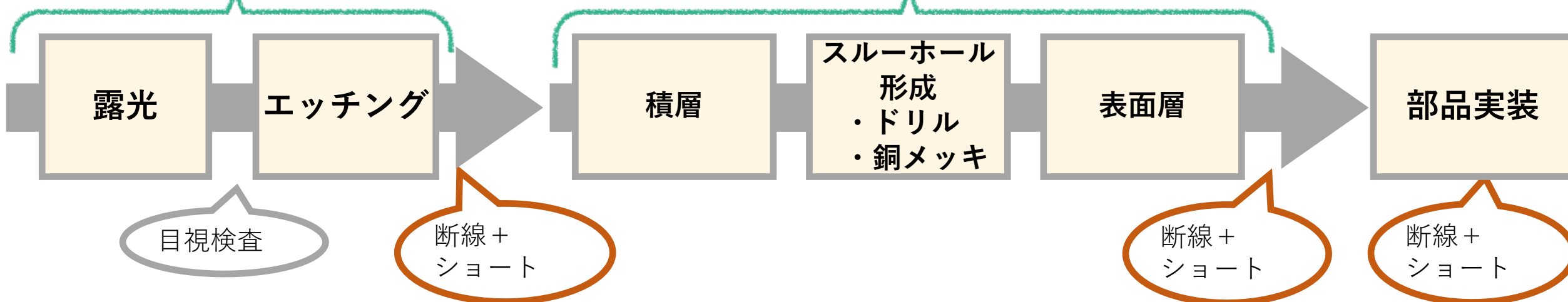
導通テストによる歩留まり改善



製造過程

Single layer

Multi-layer



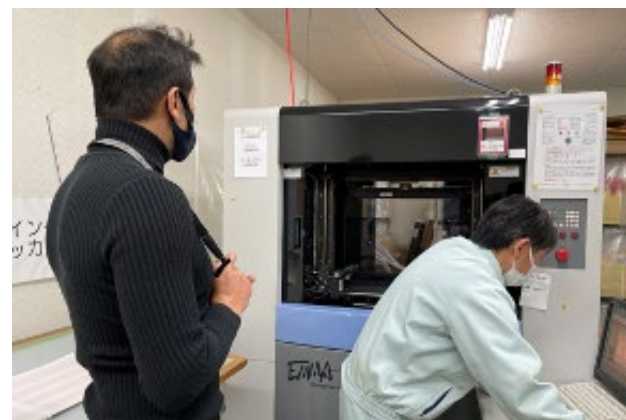
導通テスト(断線 + ショート)

- 製造段階で2回
 - 良品のみ後工程に
- 受け入れ検査で1回

目視検査

歩留まりの大幅改善を見込む

2021/9/16



フライングチェッカー

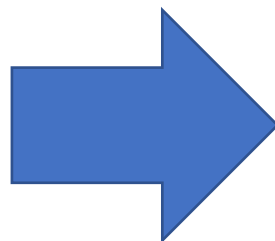
JPS2021 Autumn, 16pV1-5



自動導通チェッカー

対策前

テスト数12シート、48本
良品数 24 = 50%
不良配線： 74

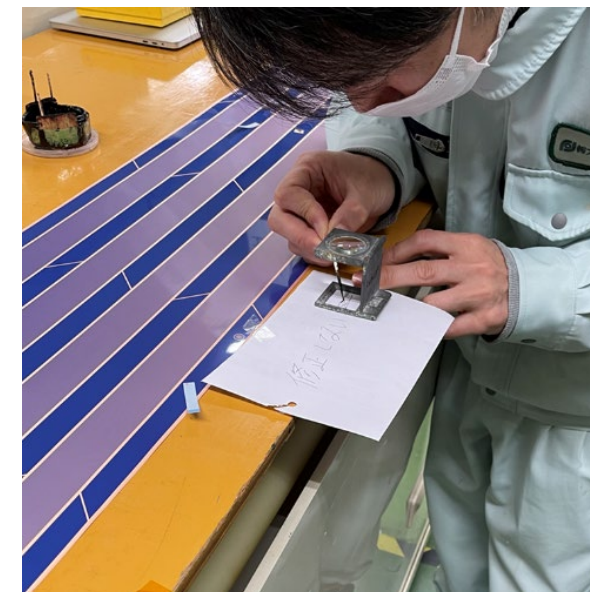
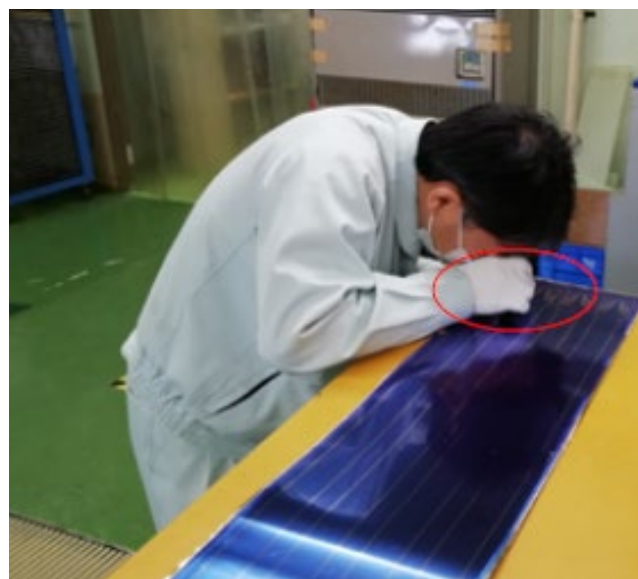


対策後

テスト数 3シート 12本
良品数： **12本 = 100%**
不良配線数： 5本

- 不良配線の発見と修正
 - 拡大鏡による目視検査
 - 配線を手で補修可能
 - 数が多くなると対応できない。
- 目視検査の自動化
 - 不良個所を簡単に発見することができれば、さらなる改善が見込める。

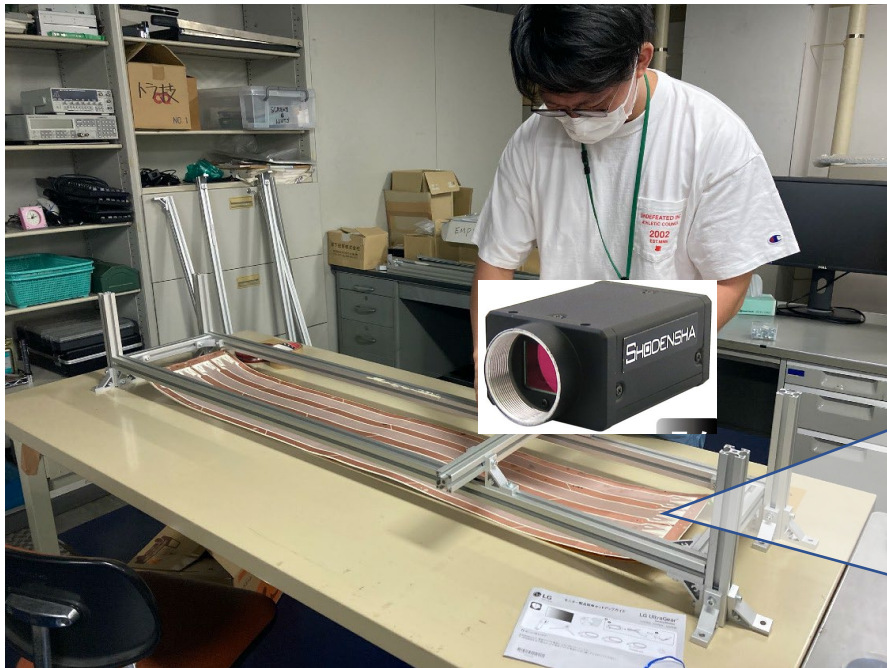
工程数が
増え大変



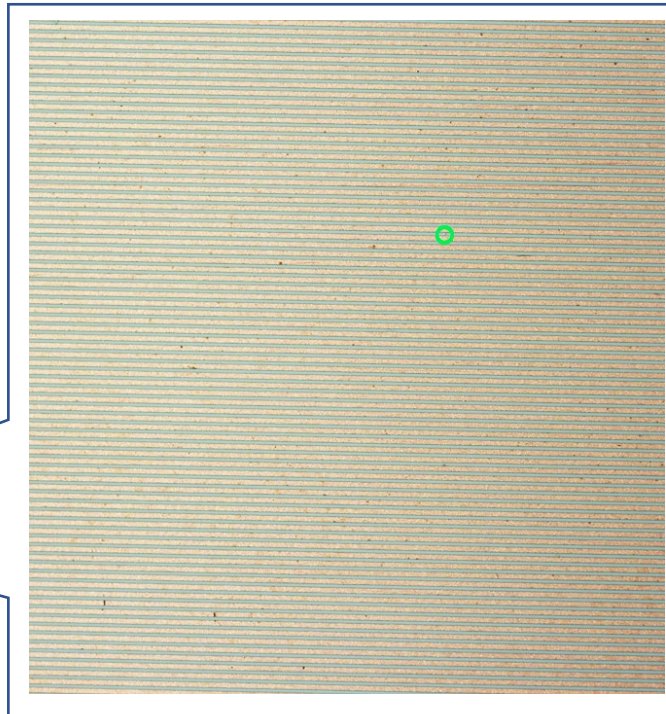
目視検査の自動化：さらなる改善を目指す

- 自動目視検査装置の開発を進めている
 - ハードウェア： 基板を固定し、カメラをレールに走らせながら撮影
 - ソフトウェア： 撮影した画像から不具合箇所を検出
- 装置＋アルゴリズムの調整を行い、量産に使用する。

結果は次回のJPSで報告する。

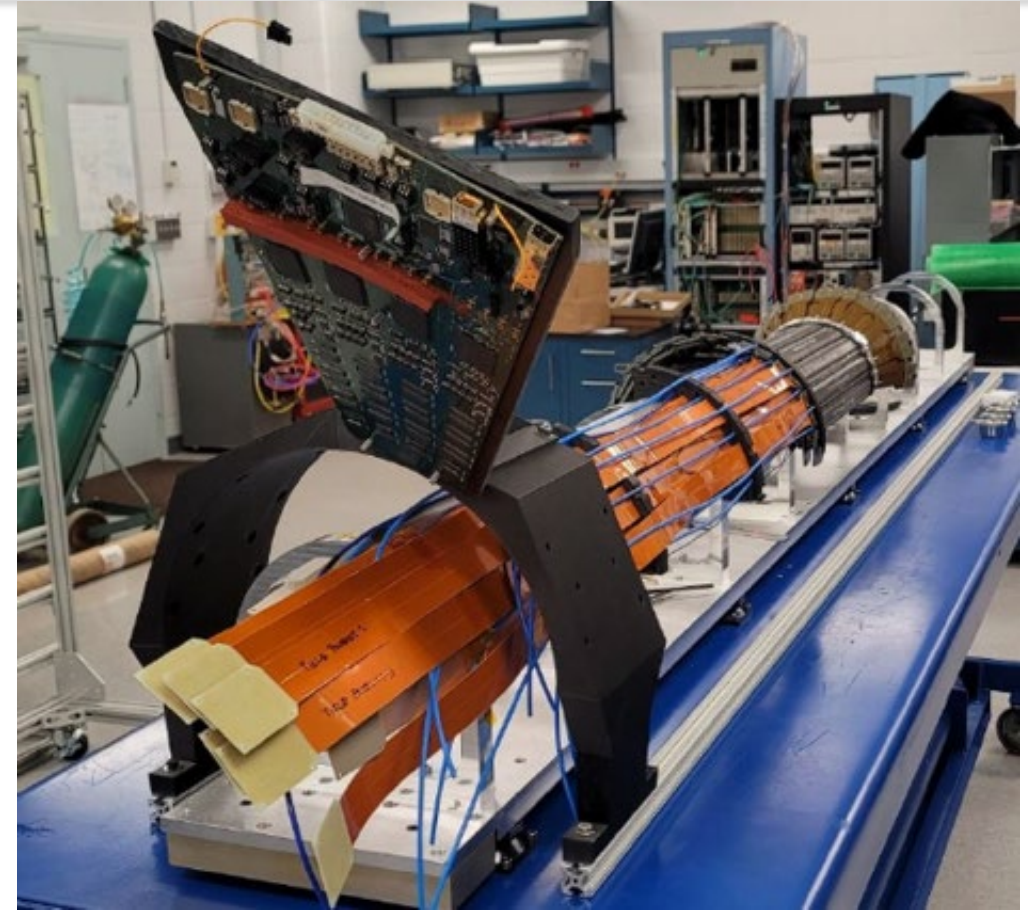


B4中村さん@立教大



INTTの組み立て： データケーブルの位置合わせ

- INTTの組み立てテストが進んでいる。
 - 試作ラダー + 試作ケーブル
 - 量産ラダー： 56本 (23本済)
- 量産予定
 - 2022年3月までに調達し、その後、組立。



- sPHENIX実験用シリコン検出器INTTのための長尺データケーブルの開発が完了した
 - 長尺(1.2m)、高配線密度(62対/5cm)、200MbpsのLVDS の全ての要求を満たした。
- 安定性と放射線耐性
 - 劣化加速試験の結果、少なくとも8年以上の安定性を確認した
 - 放射線耐性：5k, 500k, 1000kGyのガンマ線で引き剥がし強度とヤング率を測定した。 どちらも十分な耐性を持つことが分かった。
- 量産に向けて
 - 低い歩留まりの原因を特定し、解決した。 50 → 100%を達成。
 - 製造途中で導通試験を行うことで、歩留まりを改善することができた。
- 今後の予定
 - 2023年の実験開始に向け、量産を進めている。
 - 開発した自動導通チェッカーを用いて量産したケーブルを全数検査する。
 - 2022年に実機の組み立てを完了する



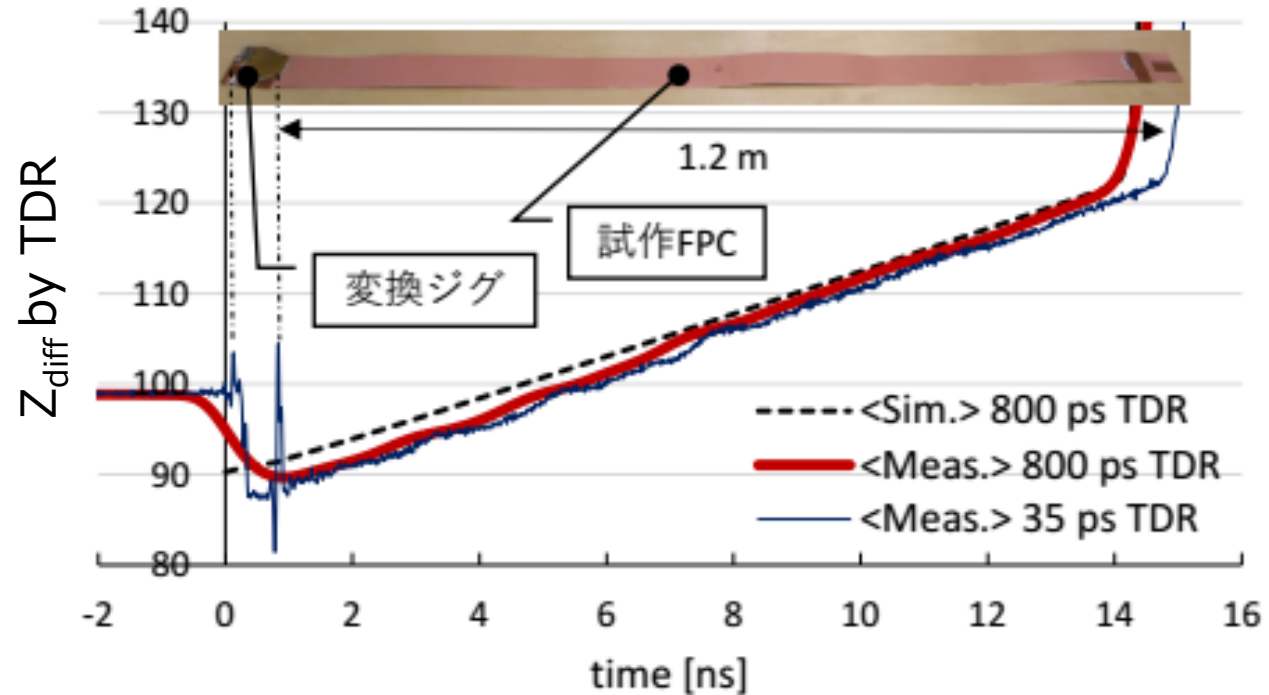
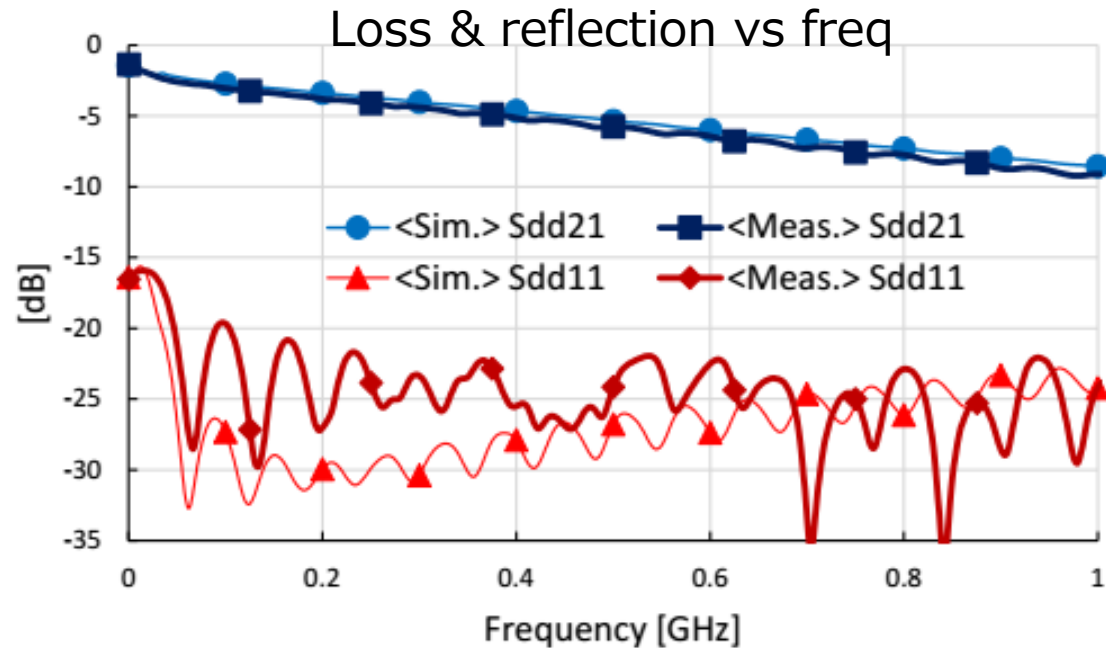
ショートが分かっているテスト品の判定結果：
 1：ショート、0：オープン、赤：NG
 ショートを見つけることができた。

aとb	b028	b029	b030	b031	b032	b033	b034	b035	b036	b037	b038	b039	b040	b041	b042	b043	b044	b045	b046	b047	b048	b049	b050
a028	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
a029	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
a030	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a031	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a032	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a033	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a034	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a035	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a036	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a037	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a038	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a039	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a040	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
a041	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
a042	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
a043	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
a044	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
a045	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
a046	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
a047	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
a048	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
a049	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
a050	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1

全Chの組み合わせでOK/NGを判定

	ショート	オープン
同じCh	OK	NG
異なるCh	NG	NG

実行時間： 10秒程度



- Freq. dependence(s-parameter)

- Signal loss : ~30%、
- Reflection: < 10%

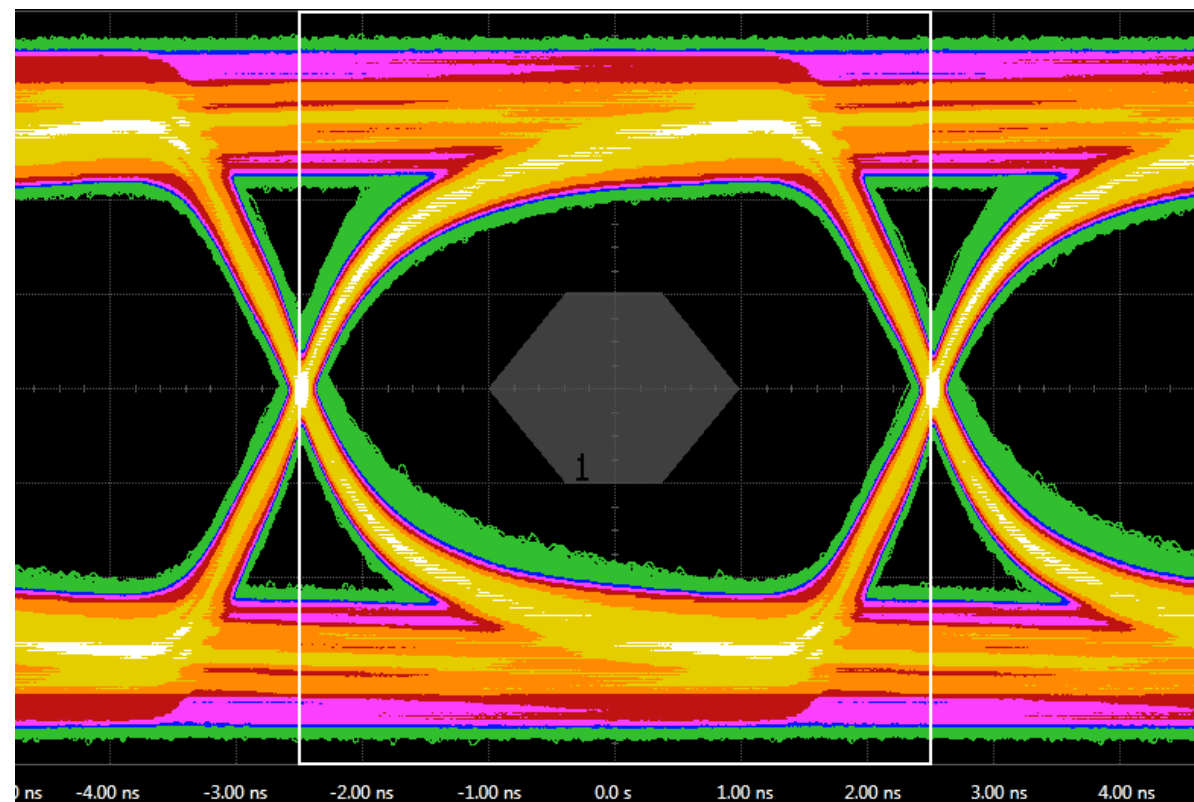
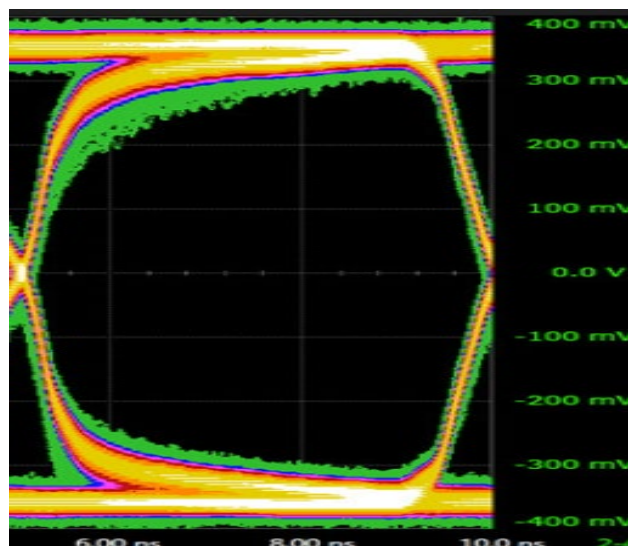
- Zdiff by TDR

- $Z \sim 90 \Omega$ (slight smaller than 100Ω)

Data is consistent with the EM field simulation

Eye diagram

Input : 200Mbps pseudo-random pulse with 500 ps rising time,

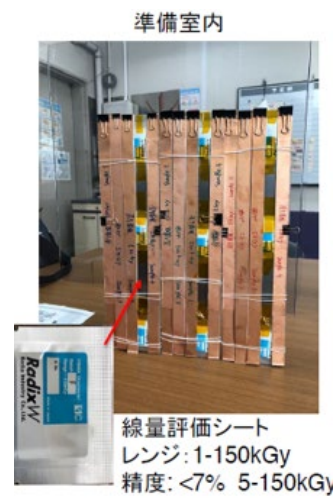
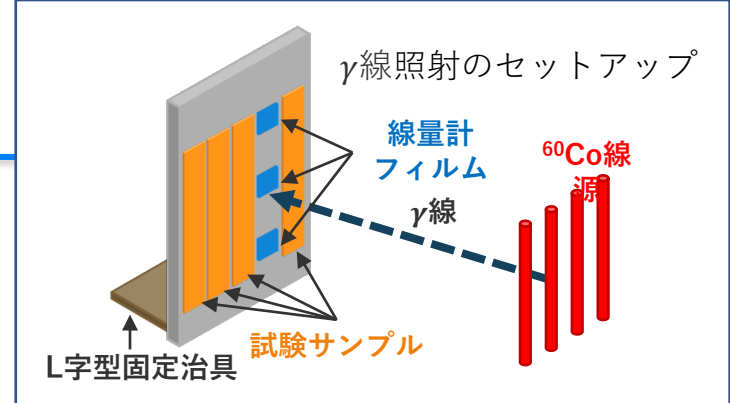


- The signal pulse is clearly separated from the mask
 - Pulse get distorted due to larger signal loss of hi-freq. component
 - Bit error rate $< 10^{-9}$

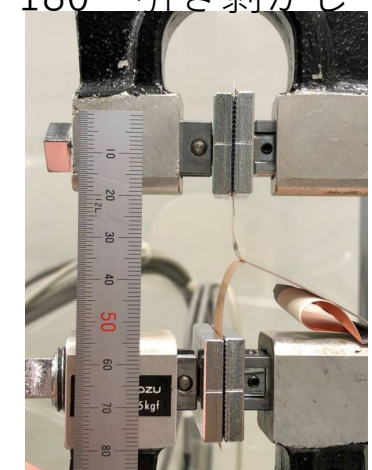
The performance of bus-extender is good enough for INTT

バスエクステンダの放射線耐性

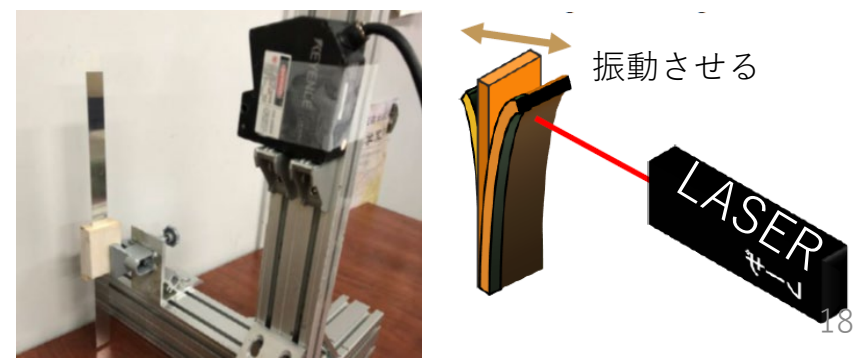
- 放射線に曝し、劣化を調べる
 - バスエクステンダは銅とLCPを接着剤で張り合わせた多層構造。特に接着剤の劣化が予想される。
- テスト条件
 - 高崎量子応用研究所QSTの高強度ガンマ線源 ^{60}Co を用いて、FPCサンプルにガンマ線を照射する。
 - 放射線量： 5k, 500k, 1000k Gy
 - 線量シートで計測
- 2つ物理特性の変化を検証
 - 引き剥がし強度：
引張試験機を用いて、接着層を180°で引き剥がす。
 - 固さ：ヤング率
固有振動数をレーザー変位計で測定する



引張試験機による180°引き剥がし



レーザー変位計による固有振動数の測定



固有振動数とヤング率の関係

$$f_n = a\sqrt{E}$$

f_n : 固有振動数
 E : ヤング率
 a : 係数

単層の製造

マスクの作成

露光してネガを転写

エッチング
(薬品で銅を溶かし、配線を形成する)

多層の製造

各層を接着シートで張り合わせる。
高温炉

スルーホール

穴あけ+メッキ
各層間を導通させる

表面処理

コネクタ周りの配線の作成。
メッキによる銅の除去
切出し、部品実装

高精度プリンタで配線精度 $\pm 3\mu\text{m}$



エンボスシート+真空ポンプでマスクと材料の密着度アップ。より精度の高い露光



シャワー式エッチング槽

Lamination in furnace



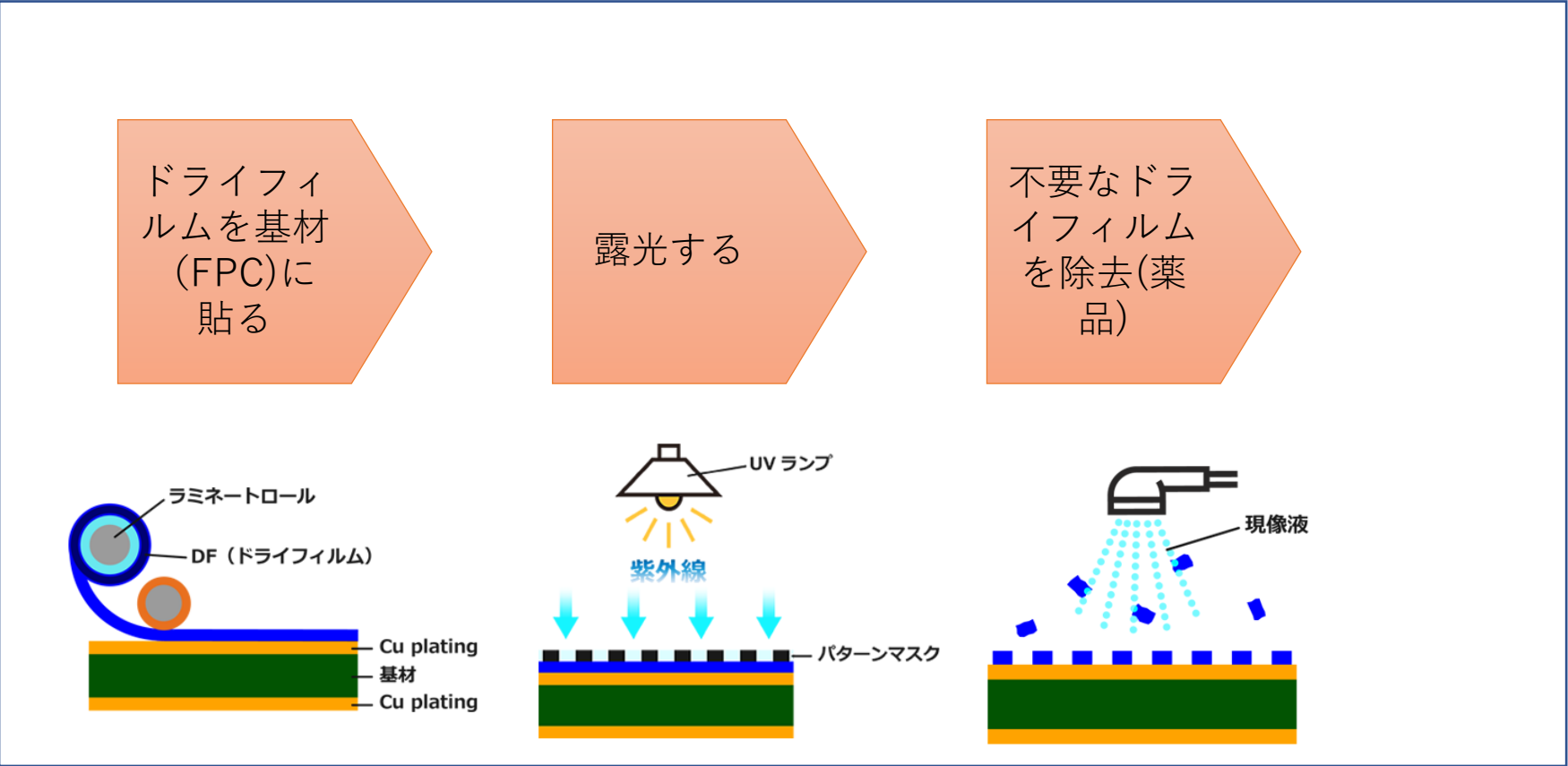
金属の軒を取り外す。
しわの原因。
積層温度、時間の見直し



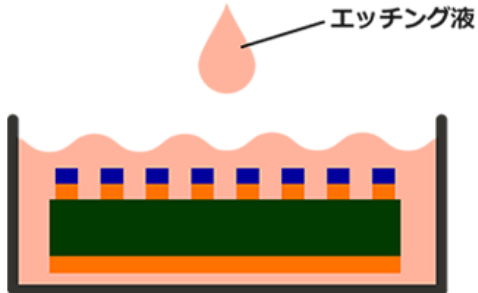
ドリルの最適化(フジユキ)
メッキの最適化(大洋工作所)
接着剤(有沢)の変更

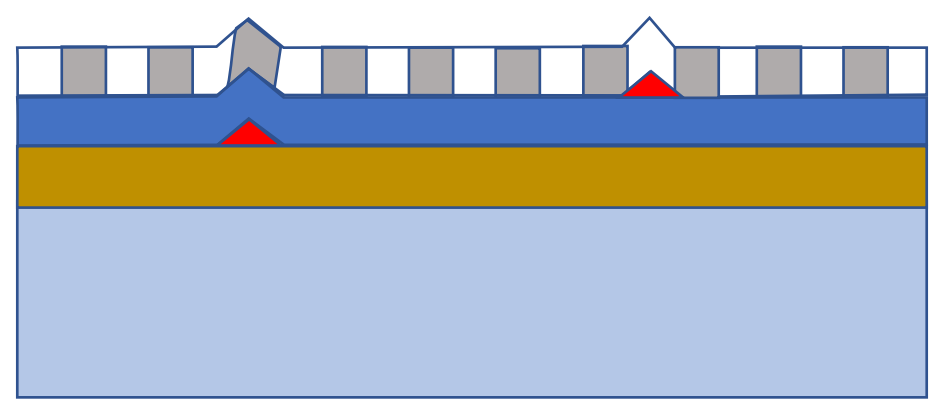
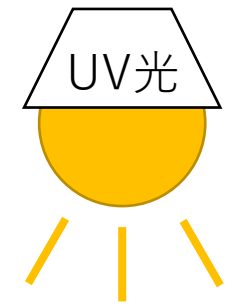
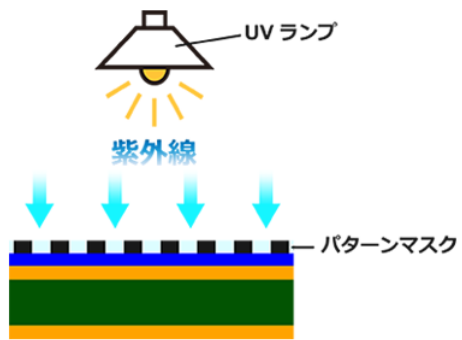
- ・ コブの解決
- ・ 熱試験の解決
- ・ 接着強度の向上

ネガを転写の中身



エッチング
DFのない
場所の銅箔
を除去





露光マスク
 ドライフィルム
 銅箔 } 基板材
 LCP }

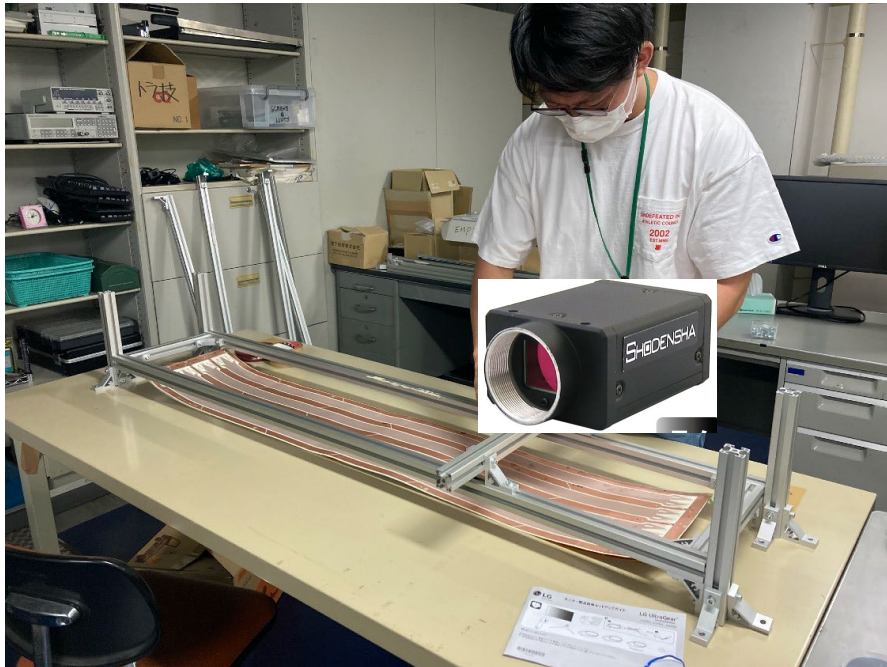
ショート箇所、オープン箇所の補修について

- 露光段階後
 - オープン： ドライフィルム様なインクでラインを書いて、つなぐ
 - ショート： ドライフィルムがはがれるかもしれないので触らない
- エッチング後
 - オープン： 対処法なし
 - ショート： カッターなどにより余計な銅箔を取り除く
- いずれにしても時間・労力が大きく、多数を手動でおこなうことは現実的でない。量産時はショート・オープンをなるべく少なくする必要がある。

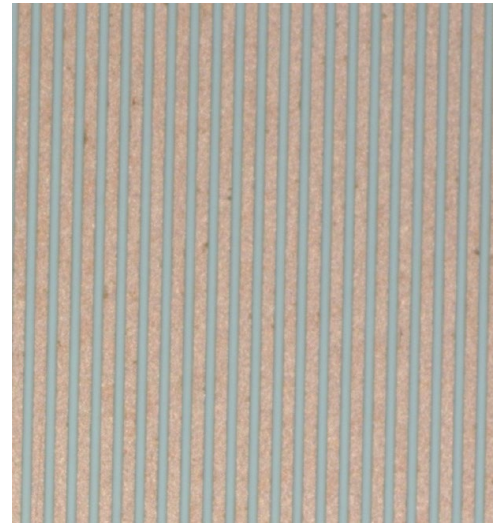


目視検査の自動化：さらなる改善を目指す

- 自動目視検査装置の開発を進めている
 - ハードウェア： 基板を固定し、カメラをレールに走らせながら撮影
 - ソフトウェア： 撮影した画像から不具合箇所を検出



中村@立教大

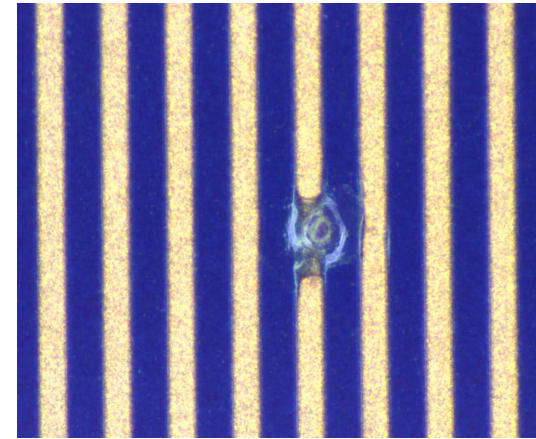


Toward Mass production

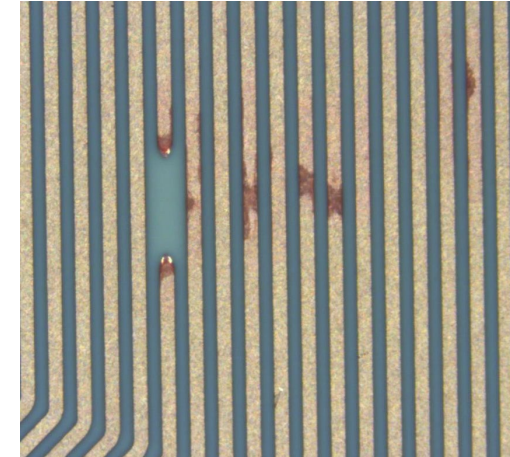


- Improving the yield rate is necessary
 - Current yield rate was ~20~30%
 - Production parameters are best tuned
 - Pressure to make multi-layer & make thru-hole
- Inspected/discussed the production procedure with manufacturers
 - Contamination of small dusts is major cause when producing the FPC
- New procedures to remove the dust as much as possible
 - UV lights to look for remaining dust
 - Silicon roller to remove dust
- Check the continuity before laminating multiple layers

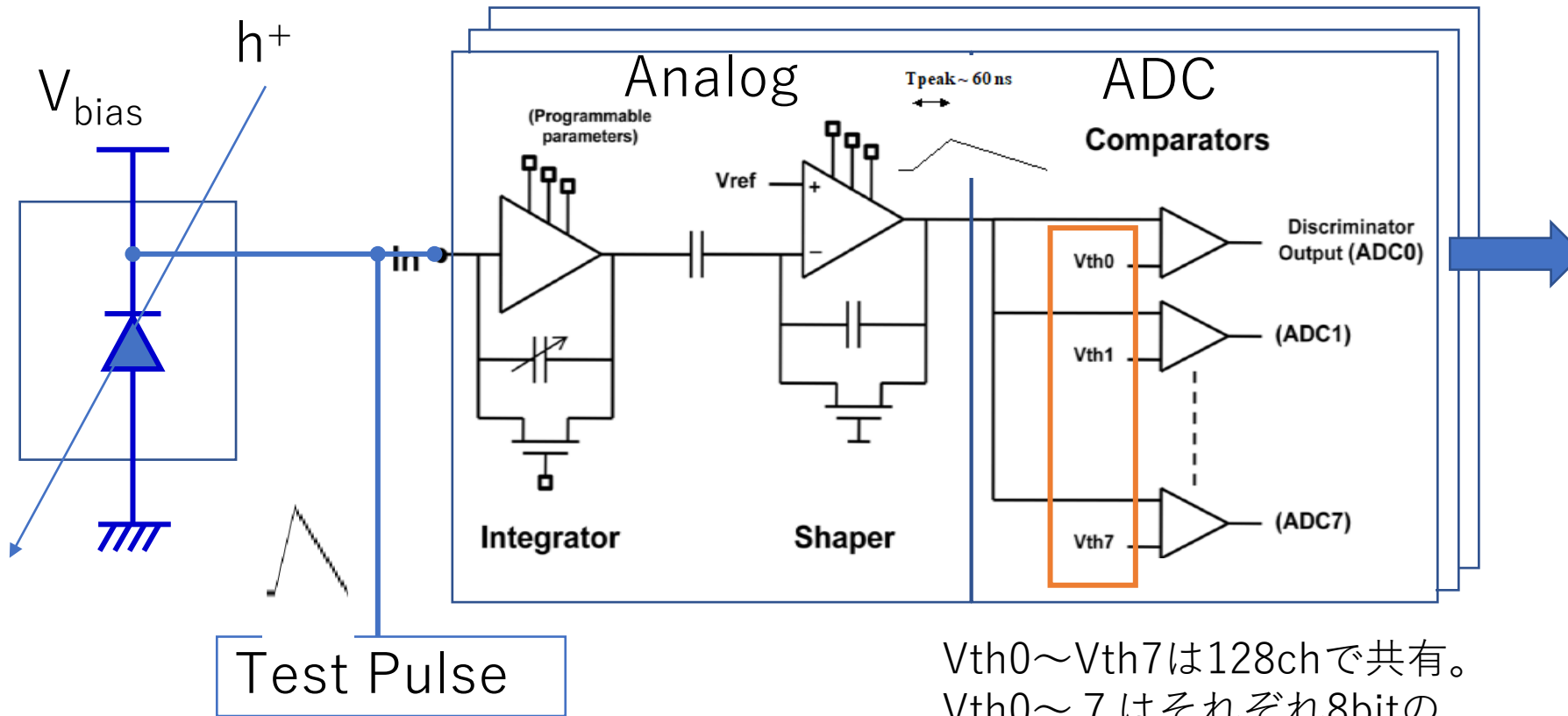
Short line by mis-exposure



Open line by mis-etching



Readout Chip (FPHX)



Vth0~Vth7は128chで共有。
Vth0~7はそれぞれ8bitの
DACで設定できる

- Performance is studied using:
 - Charged particle by beam test, cosmic ray and RI sources
 - Test pulse for Readout electronics

Digital data processing

