

# T2K前置検出器における MPPC読み出しエレクトロニクス

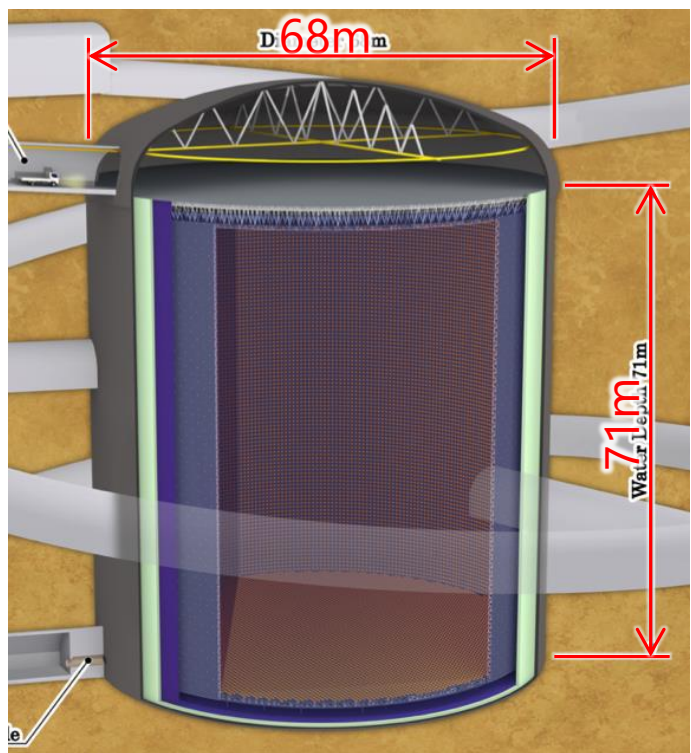
木河達也 (京都大学)

計測システム研究会2020@J-PARC  
2020年11月26日

# T2K実験とハイパーカミオカンデ

- T2K実験: J-PARCのニュートリノビームを直後の前置検出器と295km離れたスーパーカミオカンデで観測する長基線ニュートリノ振動実験。
- 統計誤差が支配的であり、8.4倍の有効体積を持つハイパーカミオカンデによりCP対称性の破れの発見を目指す。

ハイパーカミオカンデ検出器

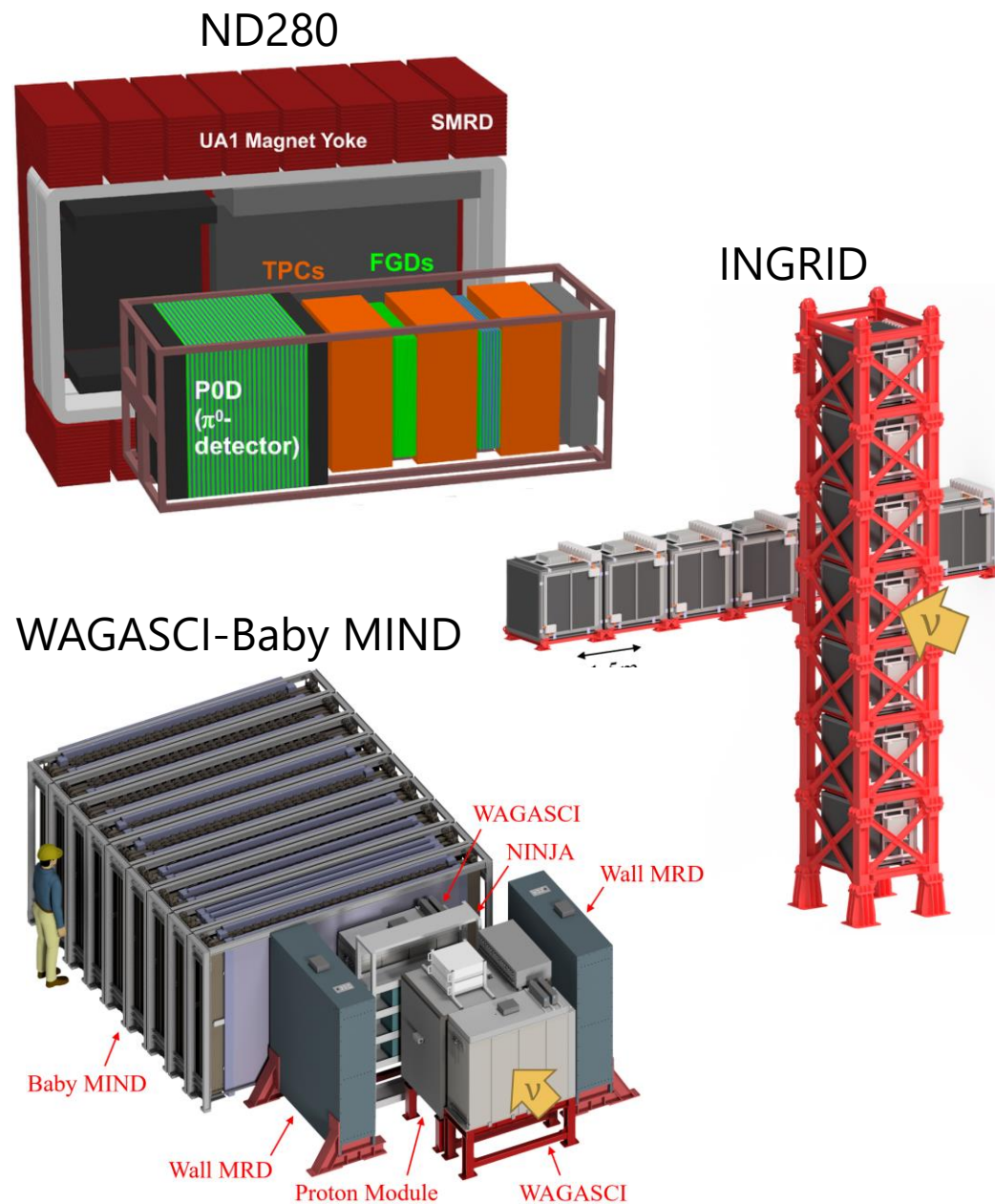


J-PARC加速器



# T2K実験の前置ニュートリノ検出器

- 3種類のニュートリノ検出器群。
- ND280: スーパーカミオカンデ方向に向かう振動前のニュートリノを精密測定。
- INGRID: ビーム中心軸上でニュートリノビームの方向、空間分布、強度を測定、監視。
- WAGASCI-Baby MIND: ND280よりニュートリノエネルギーが高い場所でニュートリノ反応を精密測定。



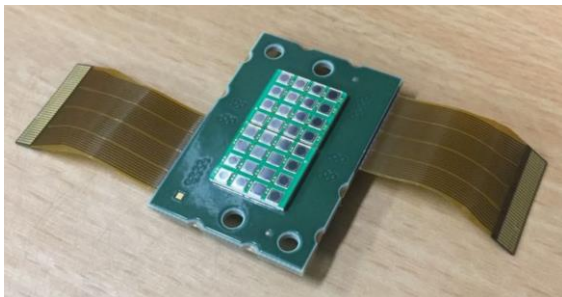
# 前置検出器におけるMPPC

- TPC以外のすべての検出器はシンチレータの波長変換ファイバー+MPPC読み出しによる飛跡検出器。
- 合計のMPPCは6万チャンネル以上。
- 4種類のエレクトロニクスにより読み出し。

パッケージ型MPPC  
(ほとんどの検出器で使用)



モノリシックアレイ型  
MPPC(WAGASCIで使用)

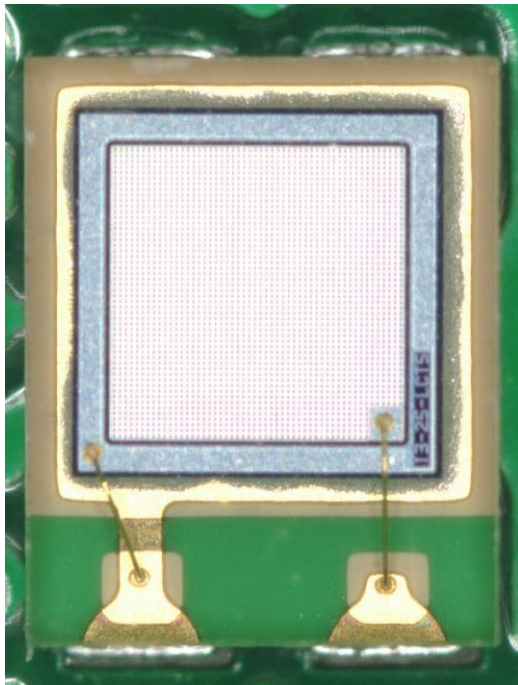


検出器群	サブ検出器	チャンネル数	ASICチップ <sup>o</sup>
ND280	FGD	8,448	AFTER
	ECAL	22,336	Trip-t
	POD	10,400	Trip-t
	SMRD	4,016	Trip-t
INGRID	INGRID	10,796	Trip-t
WAGASCI- Baby MIND	WAGASCI	2,560	SPIROC2D
	Proton Module	1,204	Trip-t
	Wall MRD	160	SPIROC2D
	Baby MIND	1,998	CITIROC
計		61,918	

# 前置検出器におけるMPPC

- 2021年度に行われるND280のアップグレードによりMPPCは11万チャンネルを超える。
- 多チャンネルMPPC読み出しエレクトロニクスは重要。

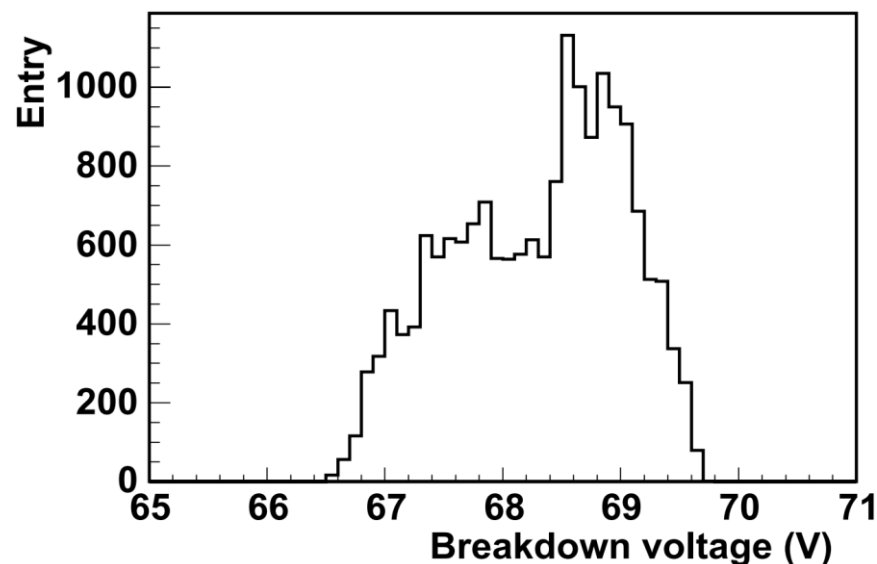
表面実装型MPPC  
(Super-FGDで使用)



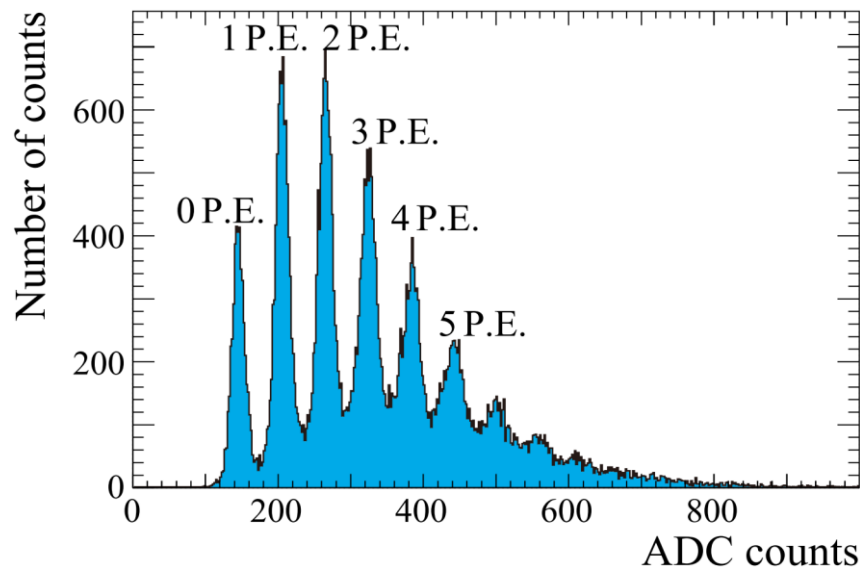
検出器群	サブ検出器	チャンネル数	ASICチップ
ND280	FGD	8,448	AFTER
	ECAL	22,336	Trip-t
	SMRD	4,016	Trip-t
	Super-FGD	58,368	CITIROC
	TOF	240	MUSIC
INGRID	INGRID	10,796	Trip-t
WAGASCI- Baby MIND	WAGASCI	2,560	SPIROC2D
	Proton Module	1,204	Trip-t
	Wall MRD	160	SPIROC2D
	Baby MIND	1,998	CITIROC
計		110,126	

- MPPCの動作電圧の個体差が大きい。
  - チャンネルごとに異なった印加電圧が必要。
  - 陽極側に同じ電圧を印加し、陰極側に与えるオフセット電圧をDACで調整する。
- 較正を行うための1光電子(P.E.)付近と100P.E.以上まで観測できる広いダイナミックレンジ。
  - ハイゲインとローゲインに信号を分離し測定。

INGRIDのMPPCの降伏電圧

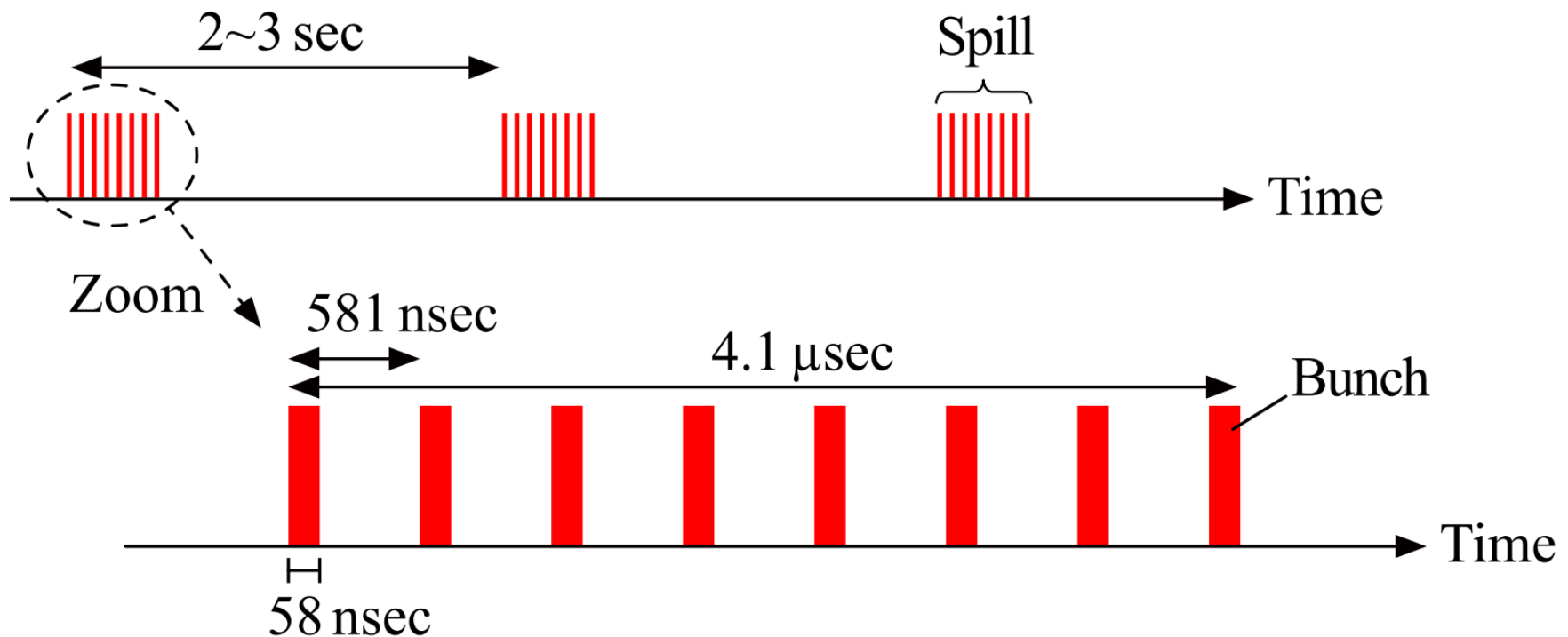


MPPCからの信号のADC分布



# トリガー

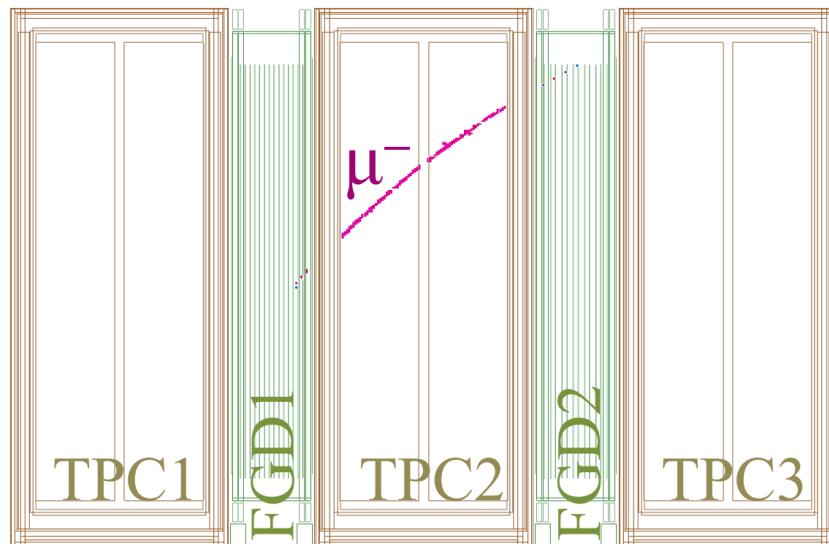
- 現在は2.5秒(将来的に1秒未満)の周期のビームトリガー(外部トリガー)でデータ取得。  
→ データ転送のための時間は十分にある。
- 検出器較正用の宇宙線トリガー(セルフトリガー)とペDESTラル取得用のピリオディックトリガー。



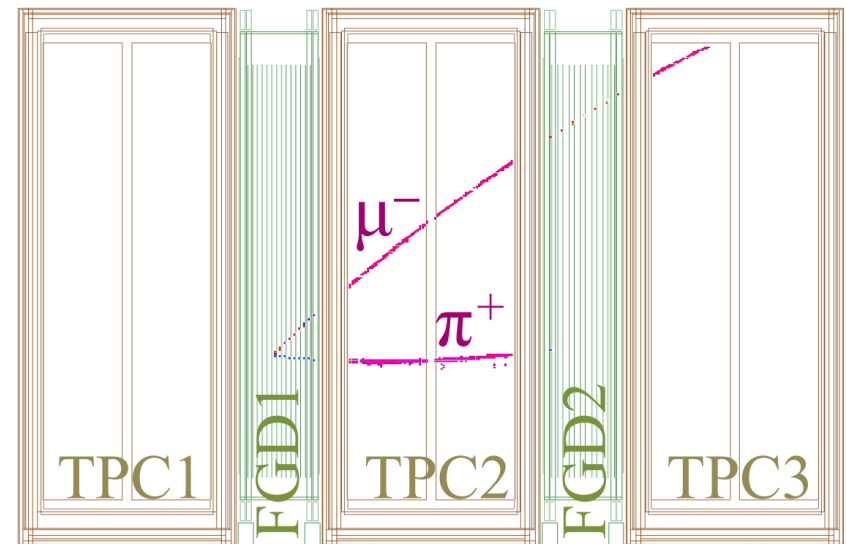
# 崩壊からの(陽)電子信号の取得

- FGD, Super-FGD, WAGASCIでは反応モードの識別が重要。
  - CCQE反応:  $\nu_{\mu} + n \rightarrow \mu^{-} + p$
  - CC1 $\pi$ 反応:  $\nu_{\mu} + p \rightarrow \mu^{-} + \pi^{+} + p$
- $\pi^{+}$ の運動量が低いとビームタイミングの飛跡だけでは区別できないが、 $\pi^{+} \rightarrow \mu^{+} \rightarrow e^{+}$ の陽電子が $\mu\text{s}$ 程度遅れて放出される。

ND280におけるCCQE反応



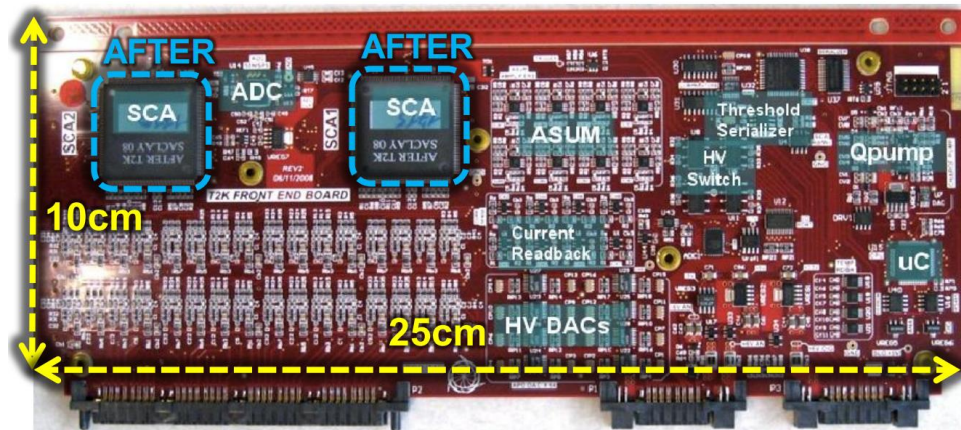
ND280におけるCC1 $\pi$ 反応



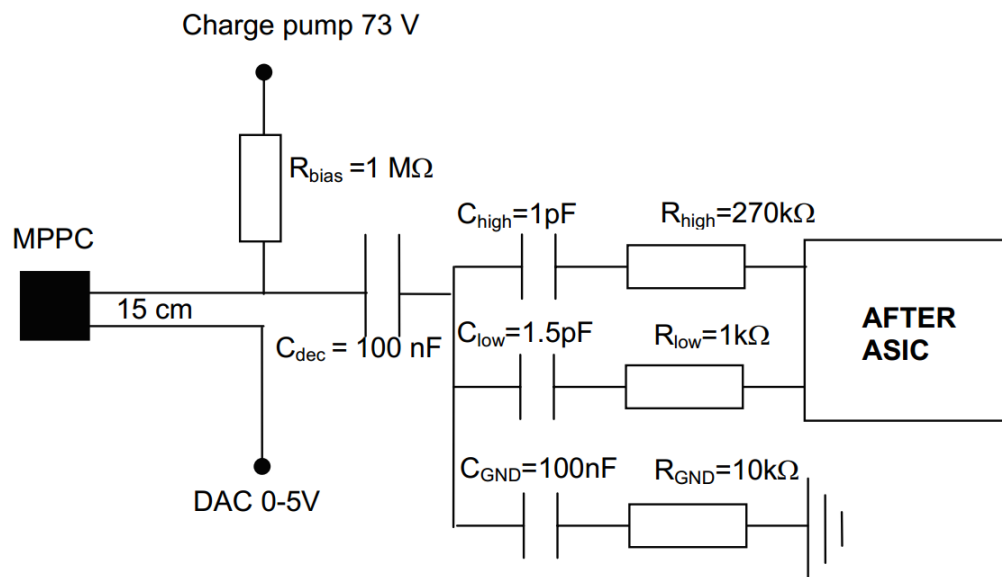


- FGDではSaclayで開発されたAFTER ASICを使ったエレクトロニクスを使用。
- 50MHzサンプリングで波形情報を取得。
- 崩壊による遅れた陽電子信号も観測可能。

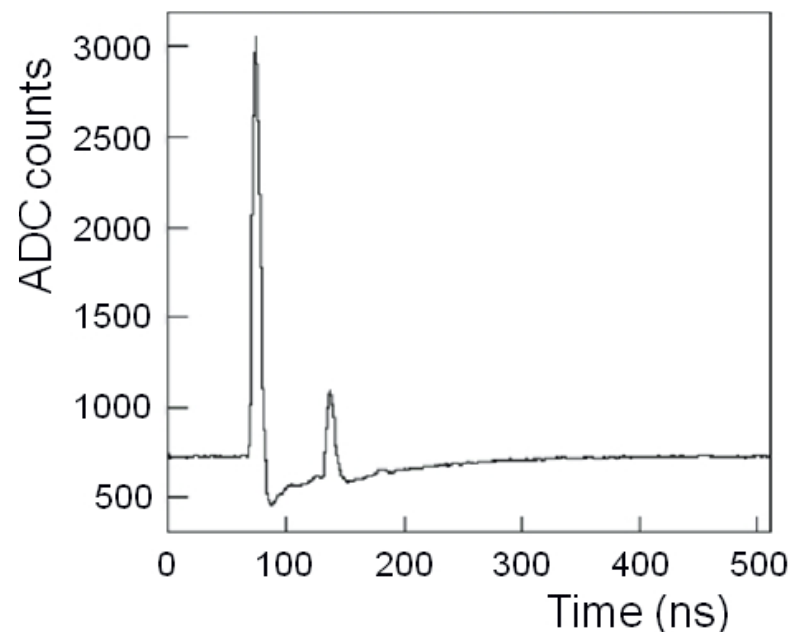
AFTER ASICを用いたエレクトロニクス



AFTERエレクトロニクスのアナログ回路

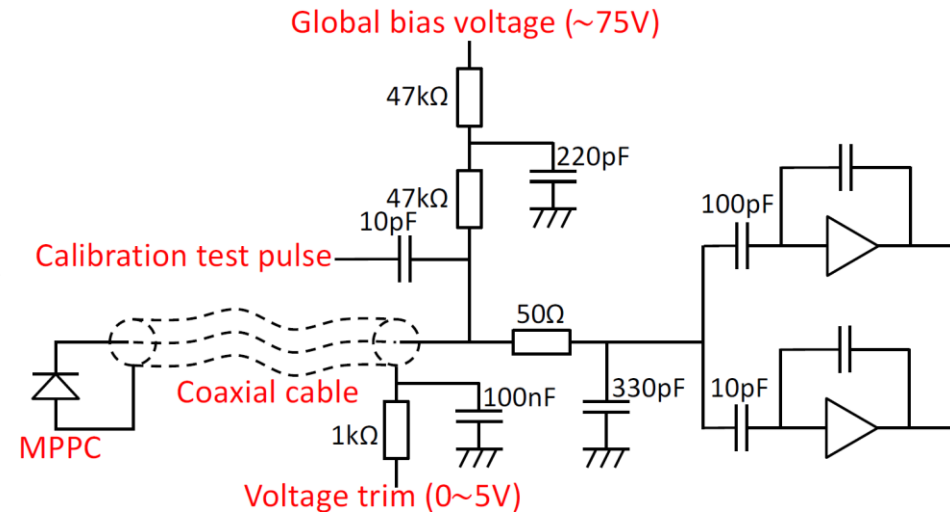


FGDにおけるMPPC信号の波形の例

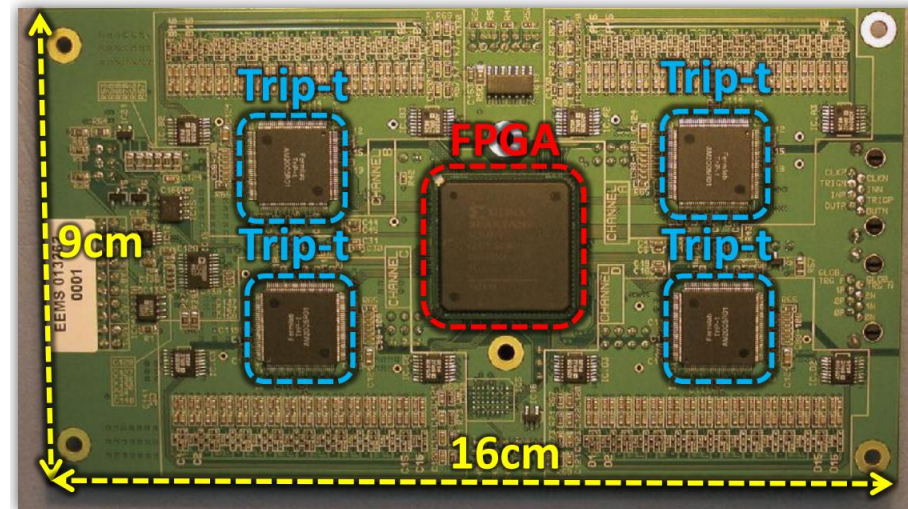
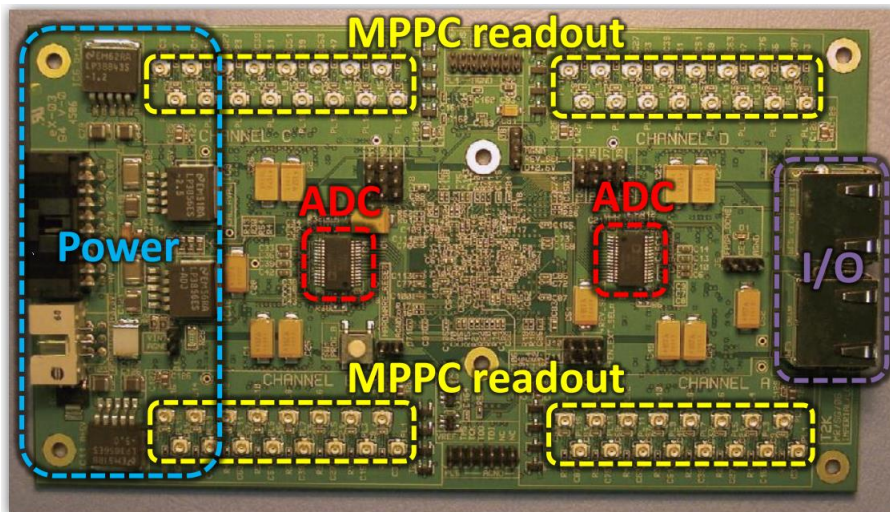


- INGIRDなどではフェルミ研でD0実験のために開発されたTrip-t ASICを使ったエレクトロニクスを使用。
- ADCとTDCにより各チャンネルの電荷・時間情報を取得。

Trip-tエレクトロニクスのアナログ回路



Trip-t ASICを用いたエレクトロニクス

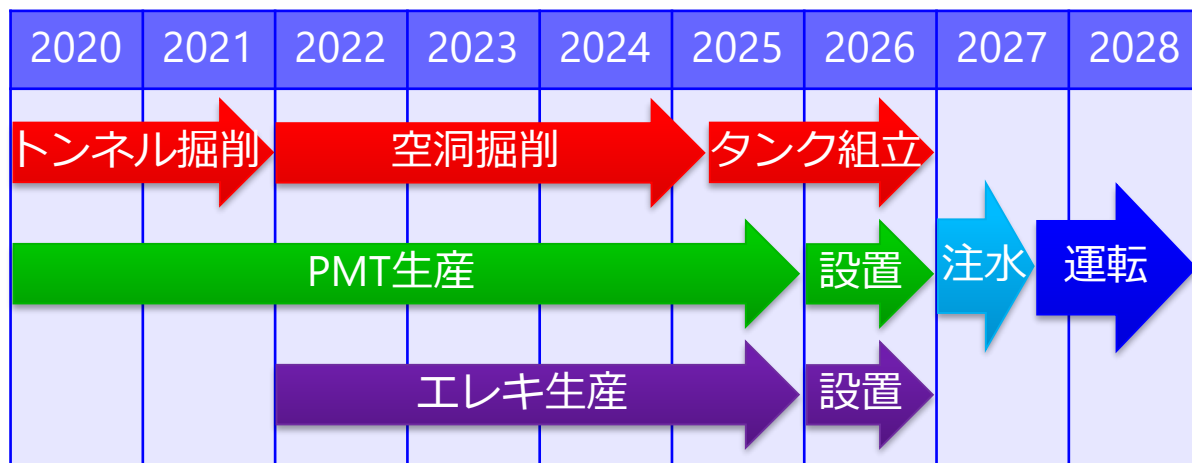


# ハイパーカミオカンデのタイムライン

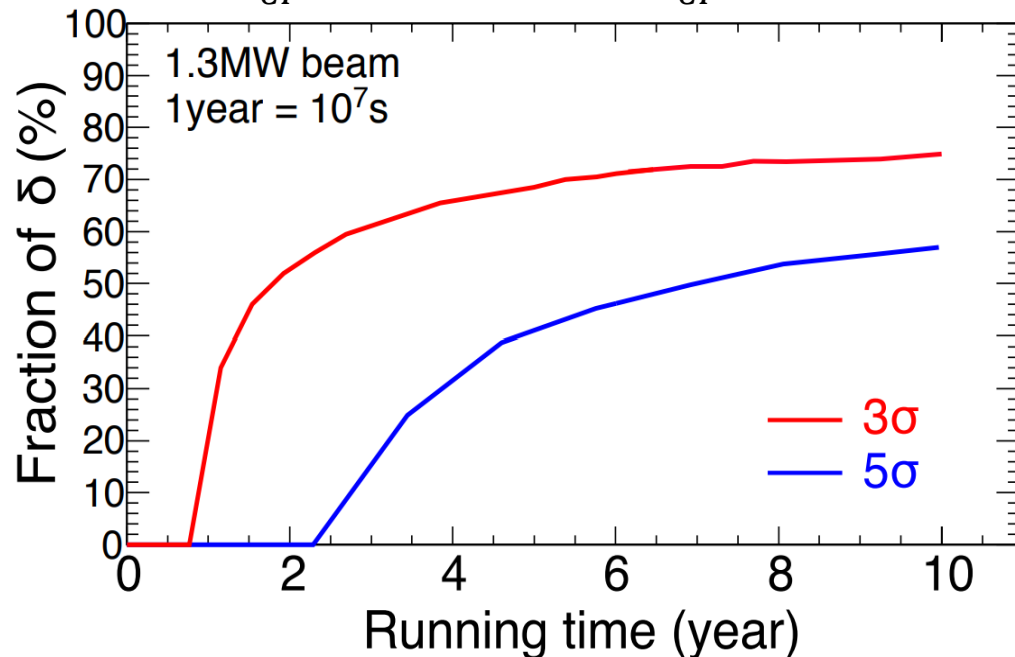
11

- 2027年にデータ取得開始を予定。
- 広い $\delta_{CP}$ の範囲でCP対称性の破れを探索するには10年程度のビームデータが必要。
- 現在から20年近く安定して使用できる、もしくは修理や再生産が可能なエレクトロニクスが必要。

## ハイパーカミオカンデ建設のタイムライン



## $\sin\delta_{CP}=0$ を棄却できる $\delta_{CP}$ 範囲の割合



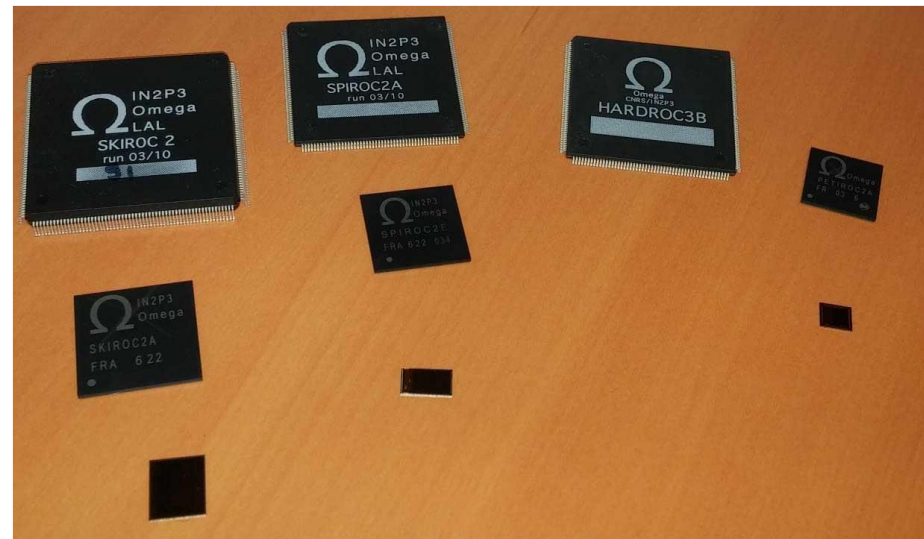
# 今後の長期運転のための問題

- AFTERやCITIROCは現行のASIC。故障、老朽化に対してエレクトロニクスを再生産、交換で対応可能。
- Trip-tは既に生産終了している。
- Trip-tを用いたエレクトロニクスは2007年に生産されたが寿命は15-20年程度と考えられている。
- 今のところINGRIDで年間1-2枚程度、故障が起きており、スペアも10枚程度しか残っていない。
- 2021年のND280アップグレードの際に取り出されるPODのTrip-tエレクトロニクスはスペアにできる。
- Trip-tエレクトロニクスに変わる新たなエレクトロニクス(37,148チャンネル分)が必要。
- できれば汎用的に使用可能な多チャンネルMPPC読み出しエレクトロニクスを作りたい。

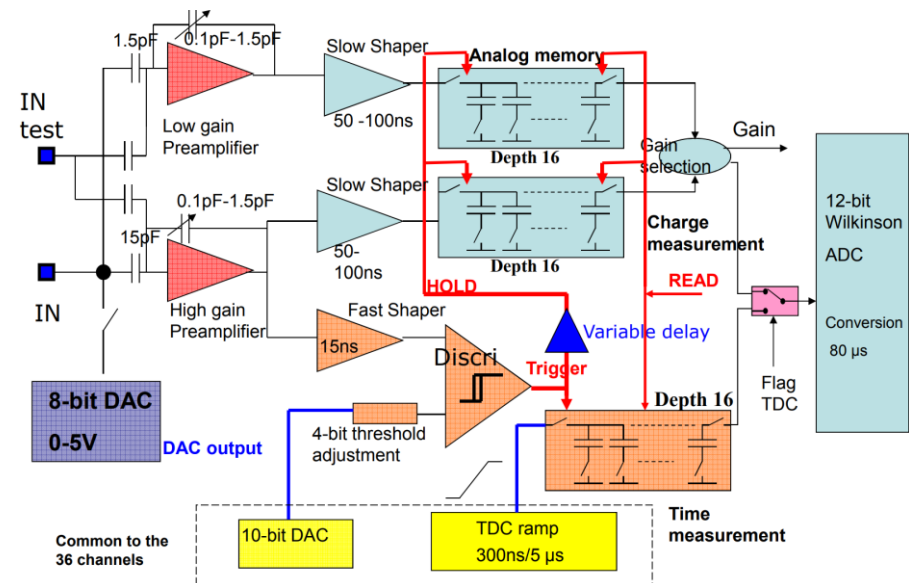
# SPIROC ASIC

- フランスのオメガ研究所で開発されたMPPC読み出しに特化したASIC。
- 当初はILCの電磁カロリメータのために開発。
- 36チャンネル/チップ。
- ADCが内蔵。
- WAGASCIで使用されたSPIROC2Dにおけるバグ修正や改良が施されたSPIROC2Eが販売中。

## SPIROC ASIC+その他のオメガ製ASIC



## チャンネルあたりのアナログ回路



# オメガ研究所の状況

- T2K実験の前置検出器はフランスのエコールポリテクニークLLRと共同研究しているので、オメガのASICを比較的容易かつ特別価格で手に入れられる。
- 37,148チャンネル分を読み出すにはSPIROC2Eチップが1,000枚以上必要だが、在庫は十分にならないので、新たなファウンドリランが必要。
- コストは最低で200ユーロ/チップ。1000枚作るには200,000ユーロ=2500万円。
- 現在は130nm CMOS技術を用いたエレクトロニクスをCMSとハイパーカミオカンデのために開発中。
- 現時点では130nm CMOS技術を用いた新しいMPPC読み出しエレクトロニクス(SPIRIC2Eの後継)の開発の計画はないが、将来的に可能性はある。(どの程度需要があるか。)

# 国内でのASIC開発の可能性

- MPPCは国内でも多くの素粒子・原子核・宇宙線実験で使用されているが、読み出しエレクトロニクスのASICはすべて海外製のものを使用している。
- オメガ製のASICは多くの実験で入手困難で高価。
- 国産のMPPC読み出しに特化したASICがあれば、多くの人にとって使い勝手がいいはず。
- KEK Esysや他実験グループと協力して開発できる可能性があるか。
- それを使って汎用的な多チャンネルMPPC読み出し基板を開発すれば多くの実験にとって有用なはず。

# まとめ

- T2K実験の前置検出器では多チャンネルMPPC読み出しエレクトロニクスが重要。
- 特に現在のTrip-tエレクトロニクス(37,148チャンネル分)がハイパーカミオカンデ稼働前に入れ替えが必要と考えられる。
- (1)オメガ製の既存のMPPC読み出しに特化したASIC(SPIROC2E)を用いるか、(2)新たなASICの開発を待つか、(3)国産のASICを協力して開発するか。
- 本件のみなら(1)が手っ取り早い。
- 海外グループが開発を行う可能性もある。