

# 超伝導検出器KIDの周波数駆動パルス 多重同時読み出しシステムの開発

計測システム研究会@RCNP

～計測システム開発の現状と今後の展開～

2015年7月26日

岡山大学

山田 要介

他SCDグループ,産総研,JAXA/ISAS

# 目次

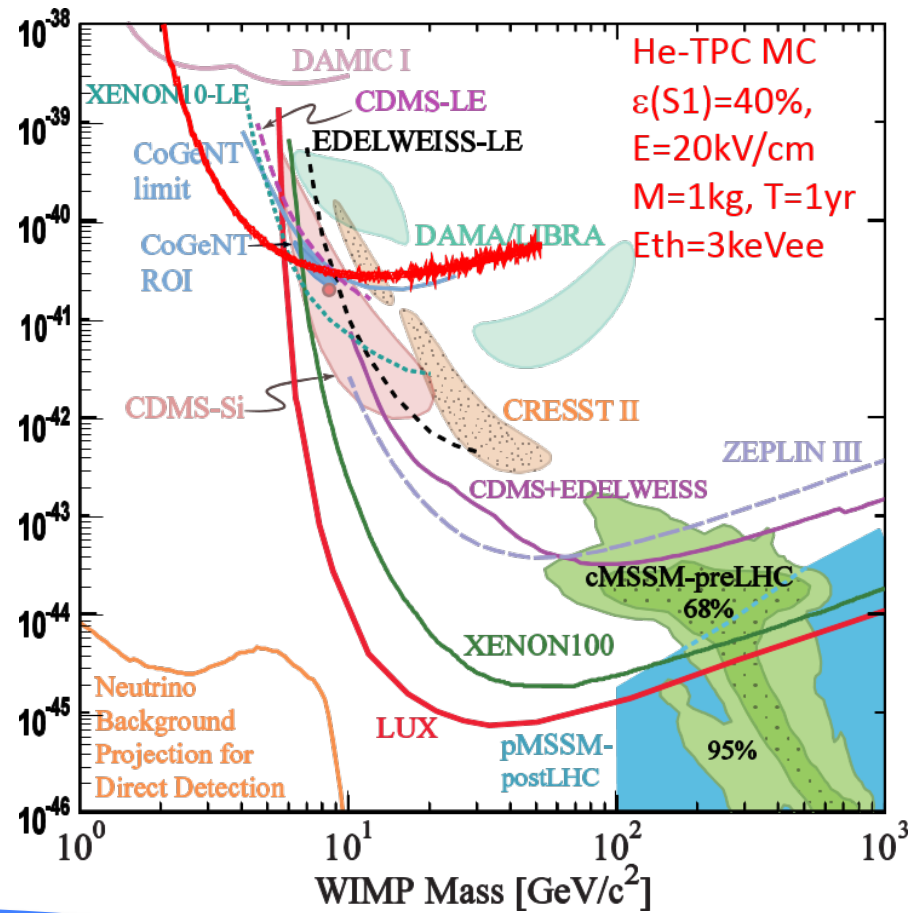
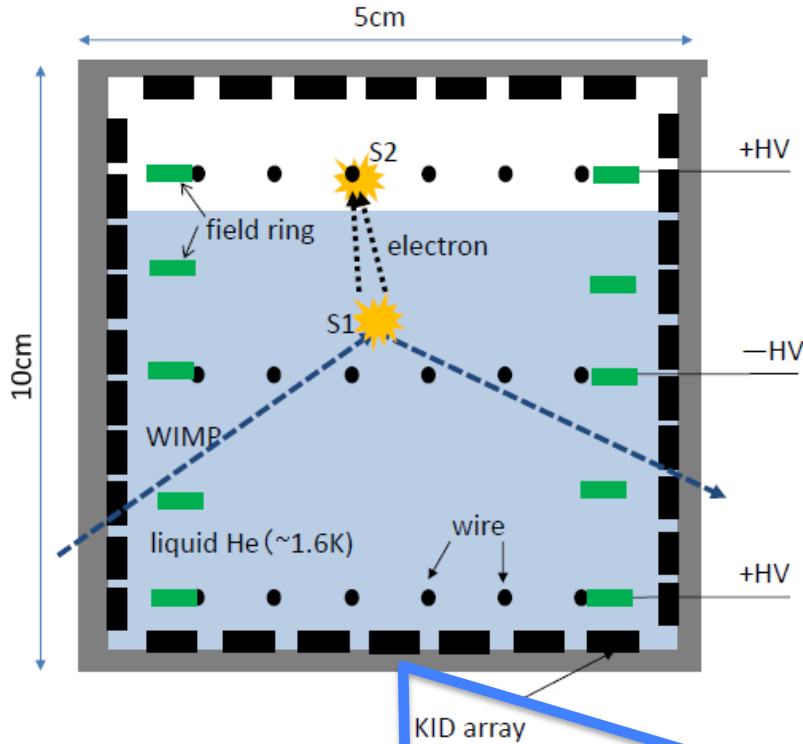
- 開発背景
  - 暗黒物質探索
  - 超伝導検出器Kinetic Inductance Detector(KID)
- システムの要求・仕様
- 現在の状況と遭遇した問題
- まとめと今後の課題

# 開発背景

# 暗黒物質探索@岡山大学

## 液体ヘリウム気液二相型TPC

W. Guo and D.N. McKinsey, PRD 87, 15001 (2013).



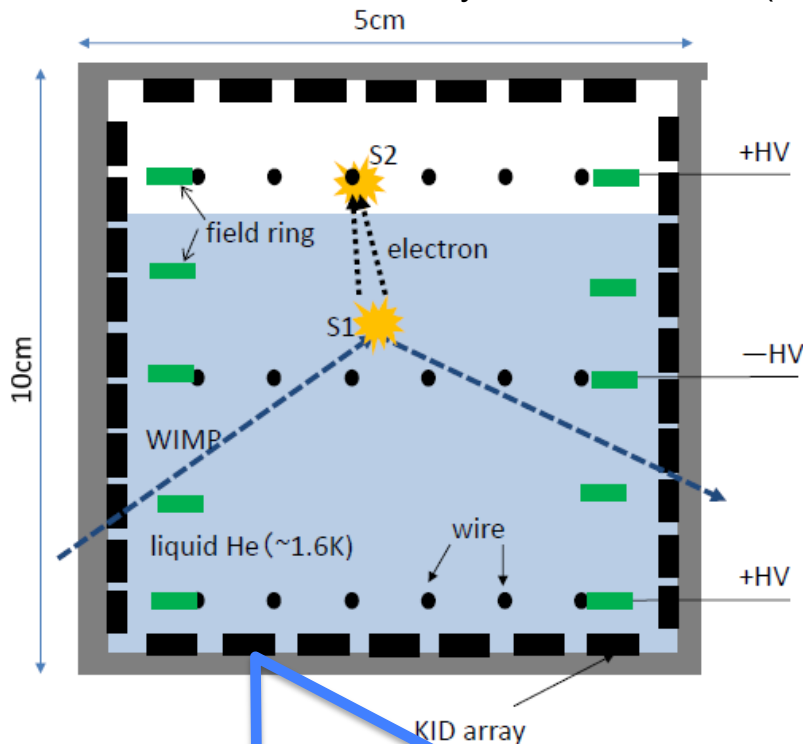
PDG2014

液体ヘリウムをターゲットとして用いて  
 10GeV以下の軽い暗黒物質を探索する

# 暗黒物質探索@岡山大学

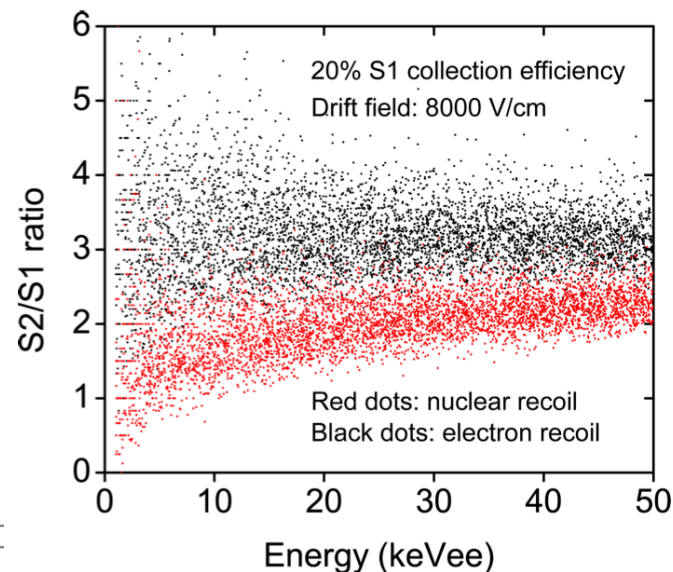
## 液体ヘリウム気液二相型TPC

W. Guo and D.N. McKinsey, PRD 87, 15001 (2013).



- 反跳粒子が周りのヘリウムを励起・イオン化する
- 励起したヘリウムは16eVの紫外線光子を放出(S1)
- イオン化で生じた電子がワイヤ付近へ掃引され加速し、シンチレーション光を放出(S2)
- S2/S1の比からバックグラウンドとなる環境ガンマ線と分離できる

励起ヘリウムから16eVの紫外線シンチレーション光が放出されKIDにより検出される



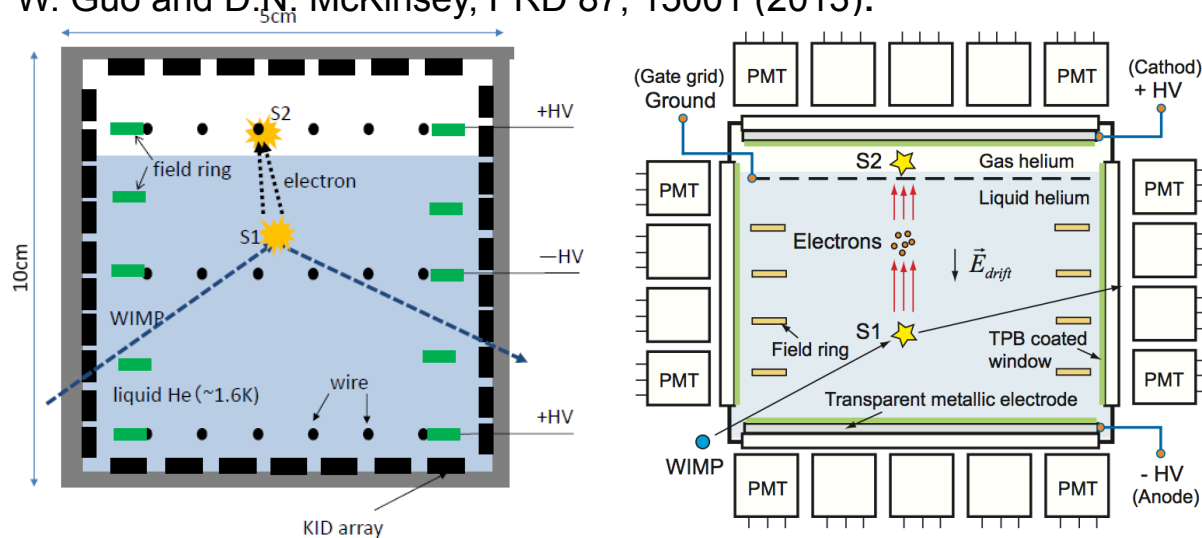
# 暗黒物質探索@岡山大学

- PMTとWavelengthshifter
  - 16eVの紫外線はPMTでは直接検出できない
  - 低温では動作しないので液体ヘリウムTPC外に配置する必要がある
  - 量子効率20%程度
- 超伝導検出器
  - シンチレーション光を直接検出できる
  - 低温で動作する、そのまま液体ヘリウムTPC内に配置可能
  - 量子効率80%程度

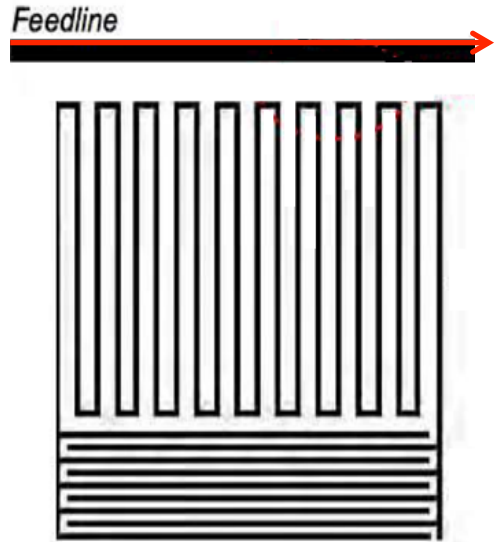
高効率で直接紫外線を検出するために、超伝導検出器を使用する

## 液体ヘリウム気液二相型TPC

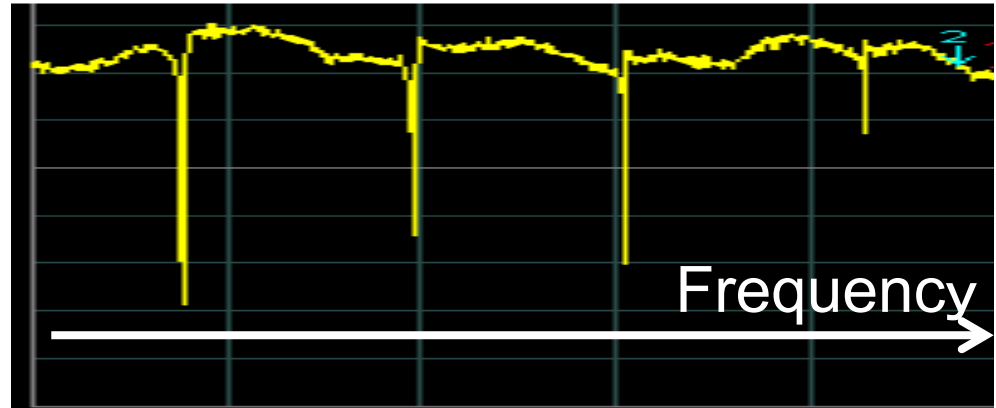
W. Guo and D.N. McKinsey, PRD 87, 15001 (2013).



# 超伝導検出器 Kinetic Inductance Detector (KID)



チャンネルを周波数領域で区別して読み出す



周波数領域 (Frequency Domain) 読み出し

※一本の配線で多チャンネル同時読み出しが可能なので、多素子化が容易

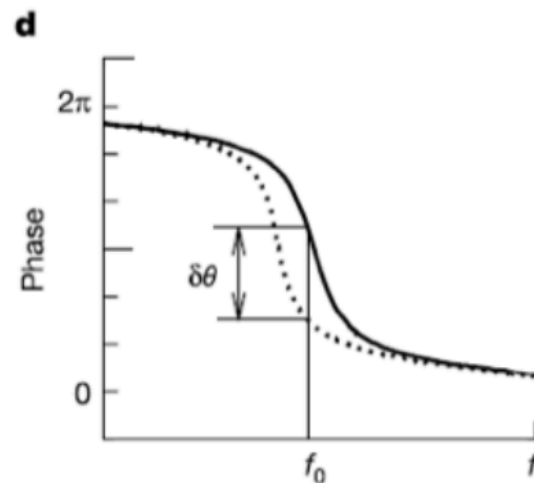
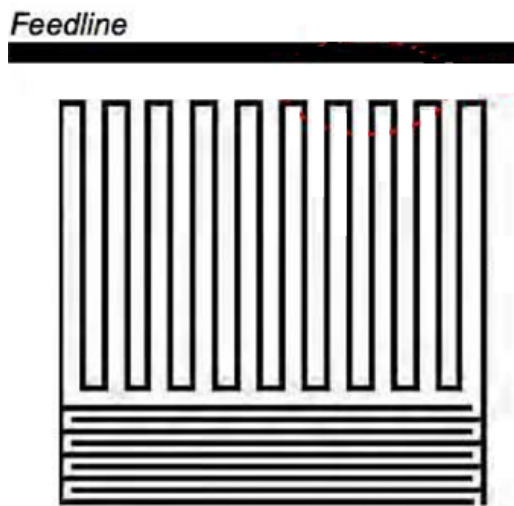
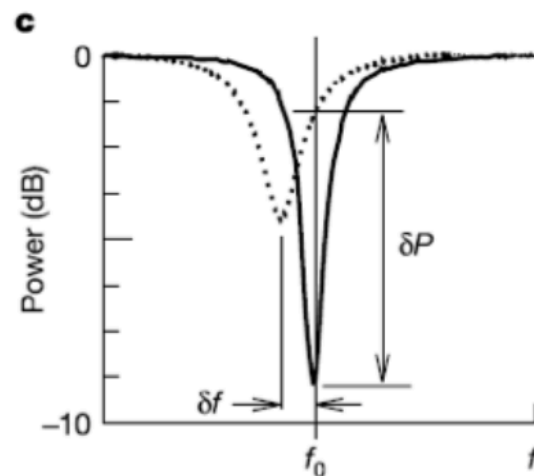
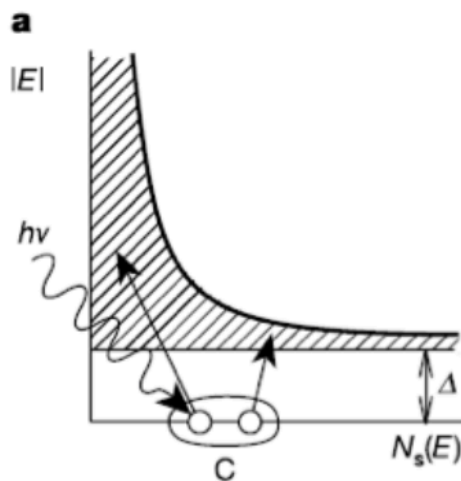
液体ヘリウムの暗黒物質探索検出器において最終的に250チャンネル読み出しを目指す

# 動作原理

1. 外部からのエネルギーにより内部のクーパ対が破壊され、準粒子が生成される

2. 準粒子によりインダクタンスが変化

3. 共振周波数が変わる、位相も変わる



P. K. Day et al., Nature 425 (2003) 817-820



# 要求・仕様

- ホモダイン方式
  - 共振信号の振幅と位相のデータを抽出する機能
- 2.5 $\mu$ s程度のパルス信号を対象
  - サンプリング周波数は4.8MHz以上にする
  - LowPassFilterのカットオフ周波数がサンプリング周波数の1/6
- 20チャンネル多重同時読み出し
  - ADCの帯域幅(120MHz)とKIDの共振周波数間隔(6MHz)
- PCへ測定データを保存する
  - SiTCP通信で測定データを保存

# 用いたハードウェア

## Xilinx Kintex-7 DSP 評価キット

アナログドーターボード(FMCI50)

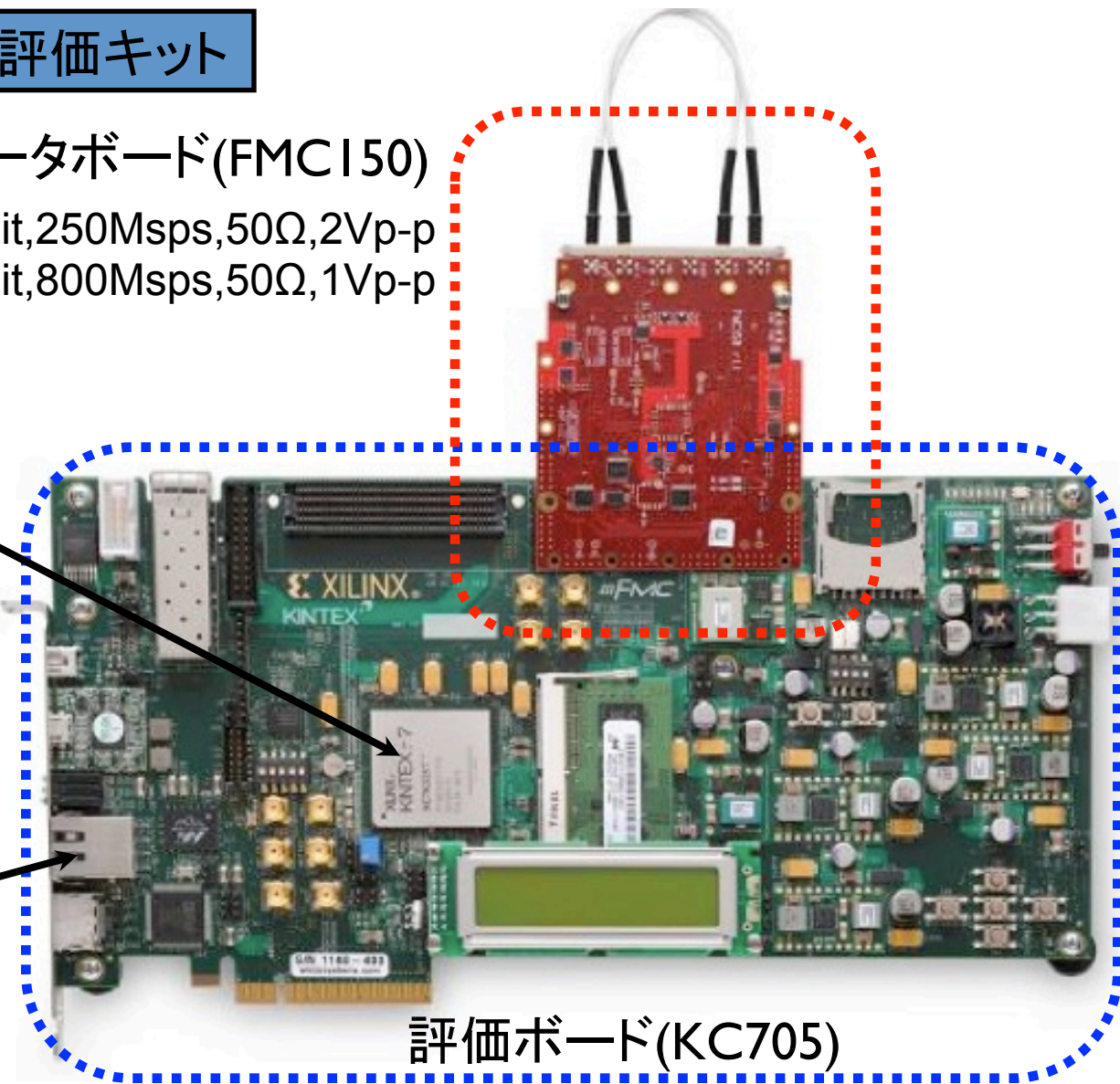
ADC:2ch,14bit,250MSPS,50Ω,2Vp-p

DAC:2ch,16bit,800MSPS,50Ω,1Vp-p

FPGA: Kintex-7

LAN port

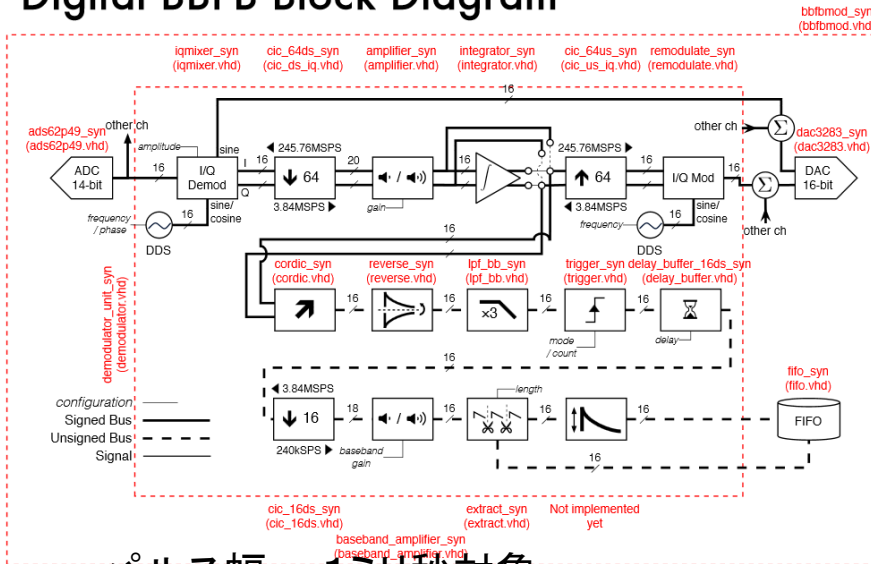
→ SiTCP (Max. 1Gbps)



評価ボード(KC705)

# これまで開発されてきた読み出しシステム

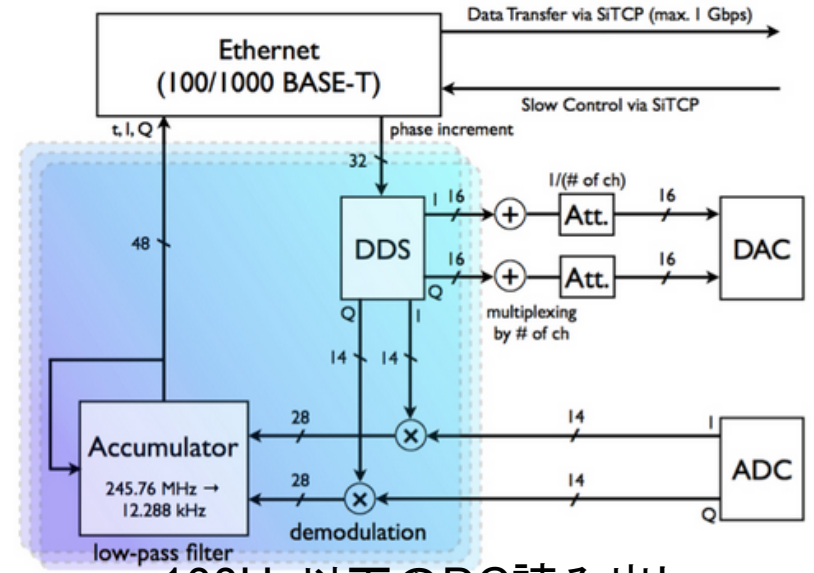
## JAXA/ISAS 酒井氏開発 TESボロメータ用読み出し論理回路 Digital BBFB Block Diagram



パルス幅 ~1ミリ秒対象

- ISE Design Suite 14.5(Xilinx社製)を使用
  - 開発言語はVHDL
- 上記にある2つのシステムに基づき、  
KIDのパルス信号(~2.5 $\mu$ s)読み出しシステムを開発する

## 岡山大学 岐部氏開発 32チャンネルKID読み出し論理回路



100Hz以下のDC読み出し

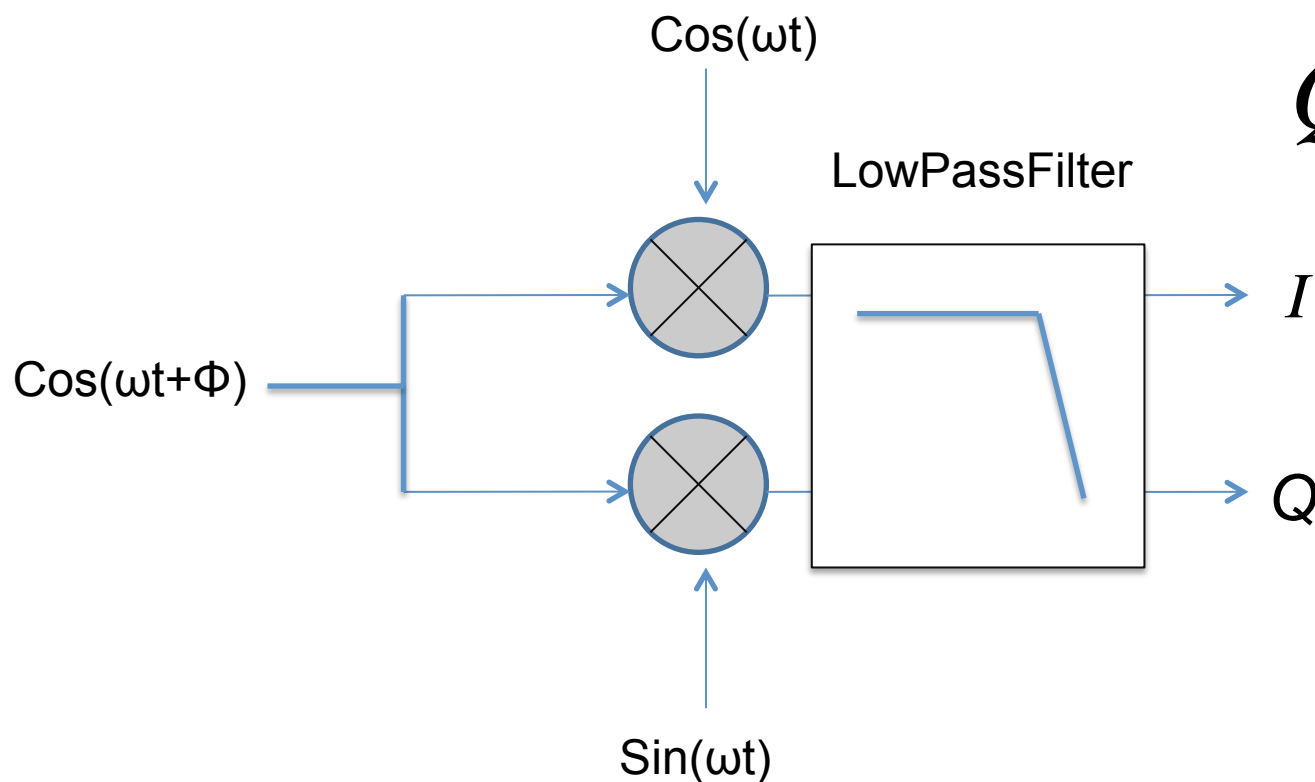


Kintex-7 DSP評価KIT

# ホモダイナ読み出し機能

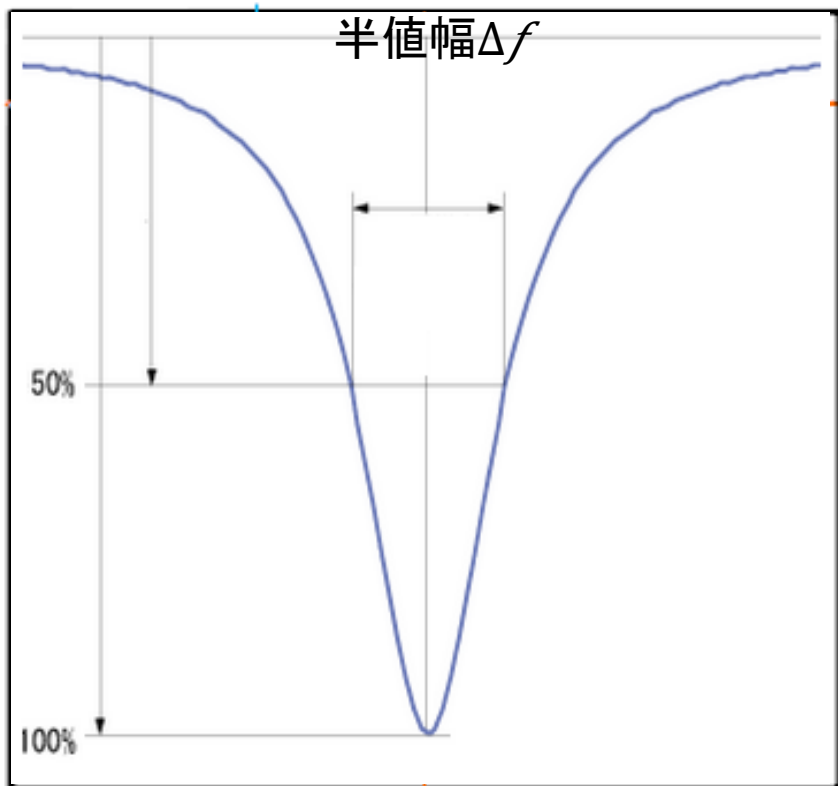
$$I = \cos \phi$$

$$Q = \sin \phi$$

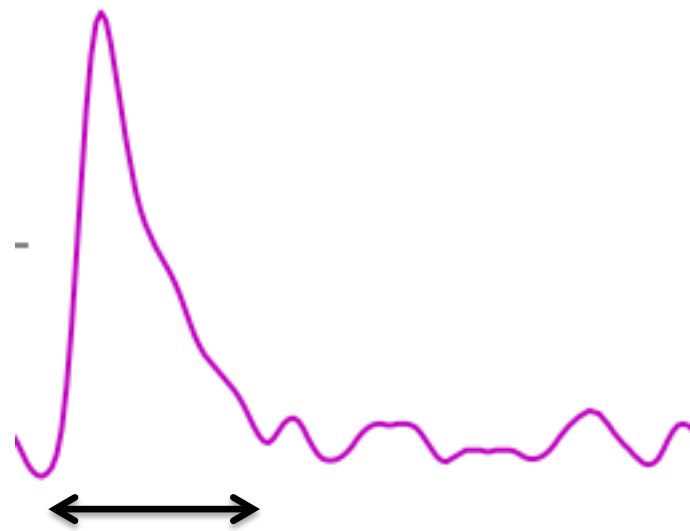


- 高周波成分と同じ周波数の信号を混ぜあわせ低周波成分を取り出す機能
- 各KIDに対応した共振信号から振幅と位相を抽出する

# KIDのパルス信号



- 周波数帯域は4~6GHz
- 応答信号は2.5 $\mu$ s程度 (6GHz, Q値5万)の時定数



$$Q \text{ 値} = f_0 / \Delta f$$

$$Q \text{ 値} = f_0 / \Delta f$$

共振ピークの鋭さを表す

共振器によるエネルギー損失を示す値

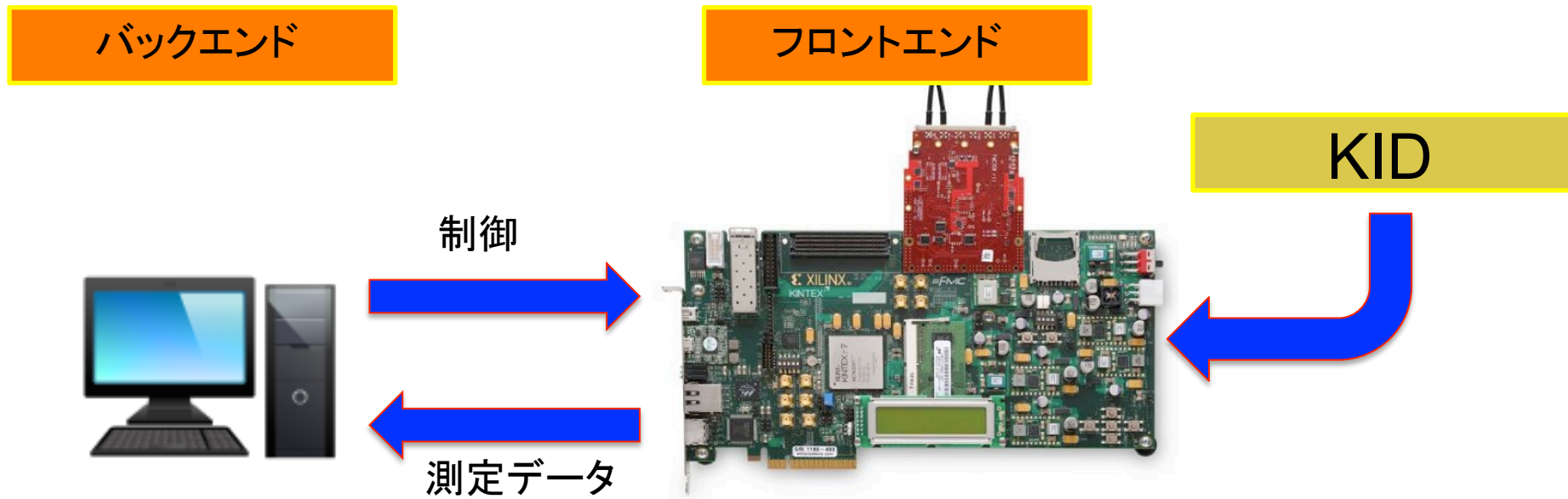
$$\text{時定数 } \tau = Q / \pi f_0 \text{ [sec]}$$

# 20チャンネル多重同時読み出し

- ボード1枚につき20チャンネル
  - ADCの帯域幅120MHz
    - ADCのサンプリング周波数範囲最大250MHz
  - KIDの共振周波数間隔6MHz
    - 共振ピークの帯域幅2MHzと見積
    - 余裕を持って3倍離す
- 最終的には2枚以上のボードの動作を同期させ250チャンネルを同時に読み出す

# SiTCP通信による測定データの保存

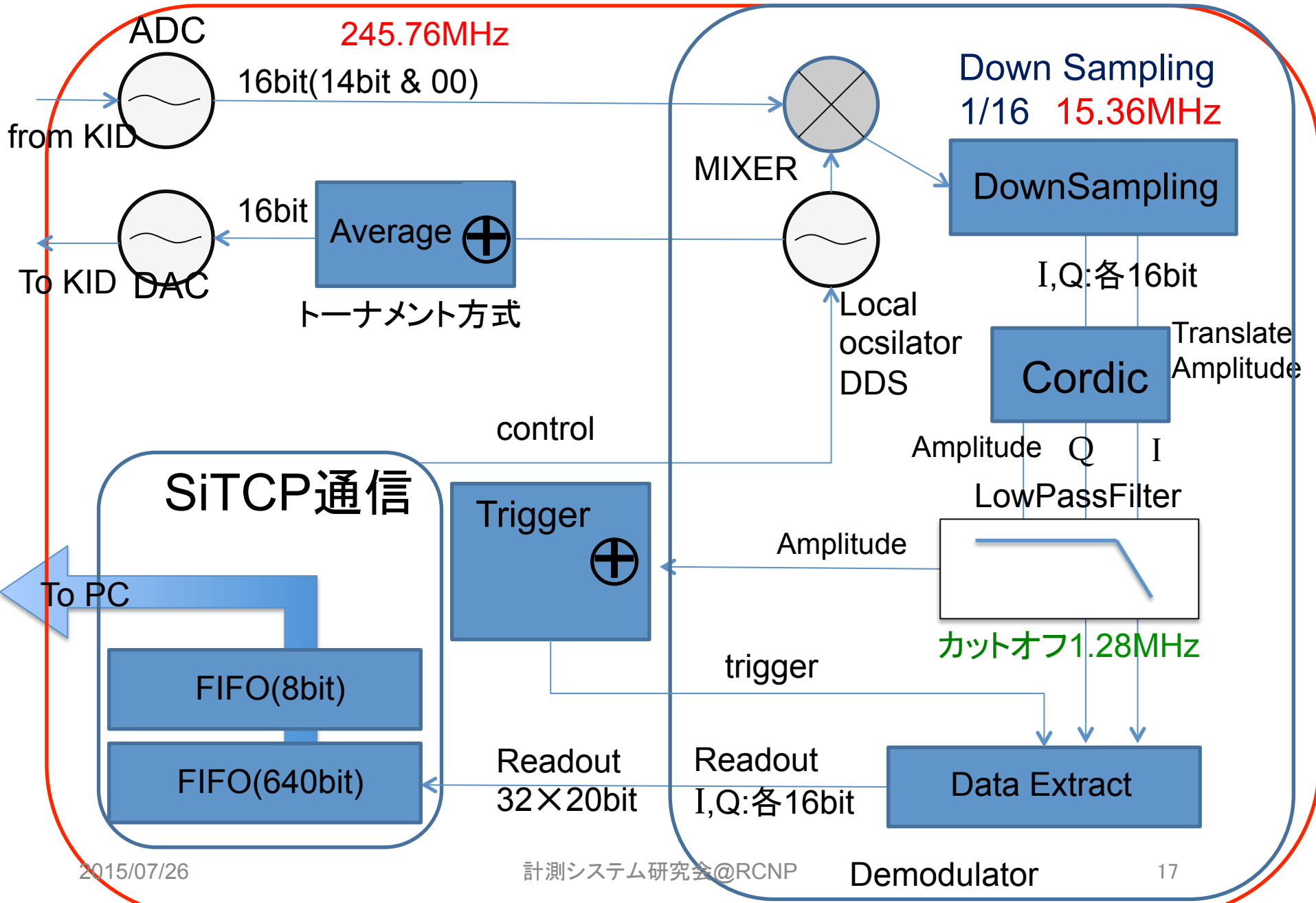
- SiTCP通信によりFPGAをフロントエンド、PCをバックエンドとして測定する



# 現在の状況と遭遇した問題

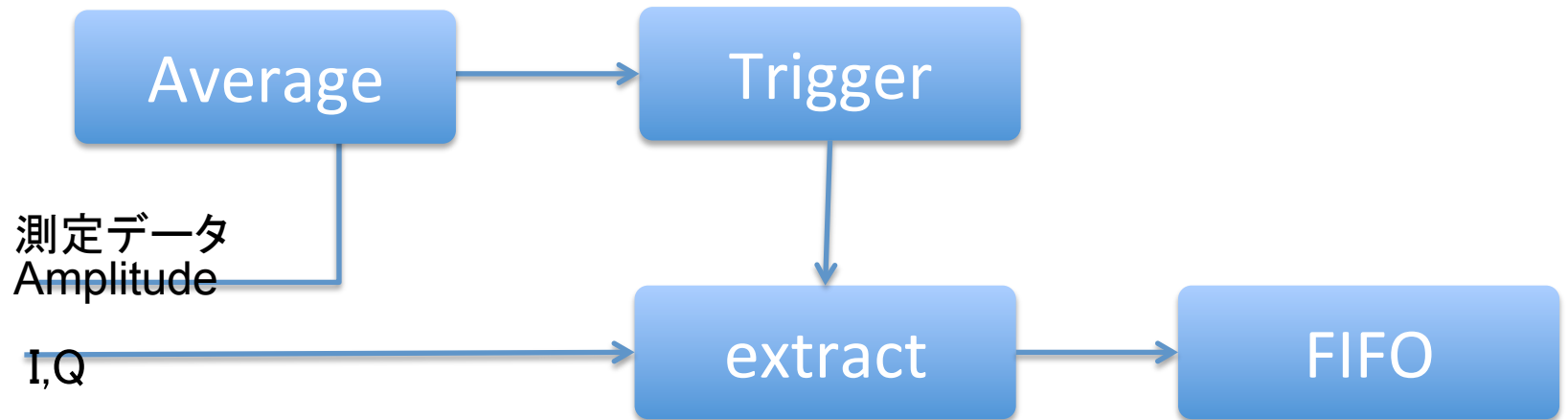


# 現在のデータ収集システム論理回路



# トリガー生成

- 各チャンネルのAmplitude測定データ(16bit,unsign)のAverageを基にトリガを生成

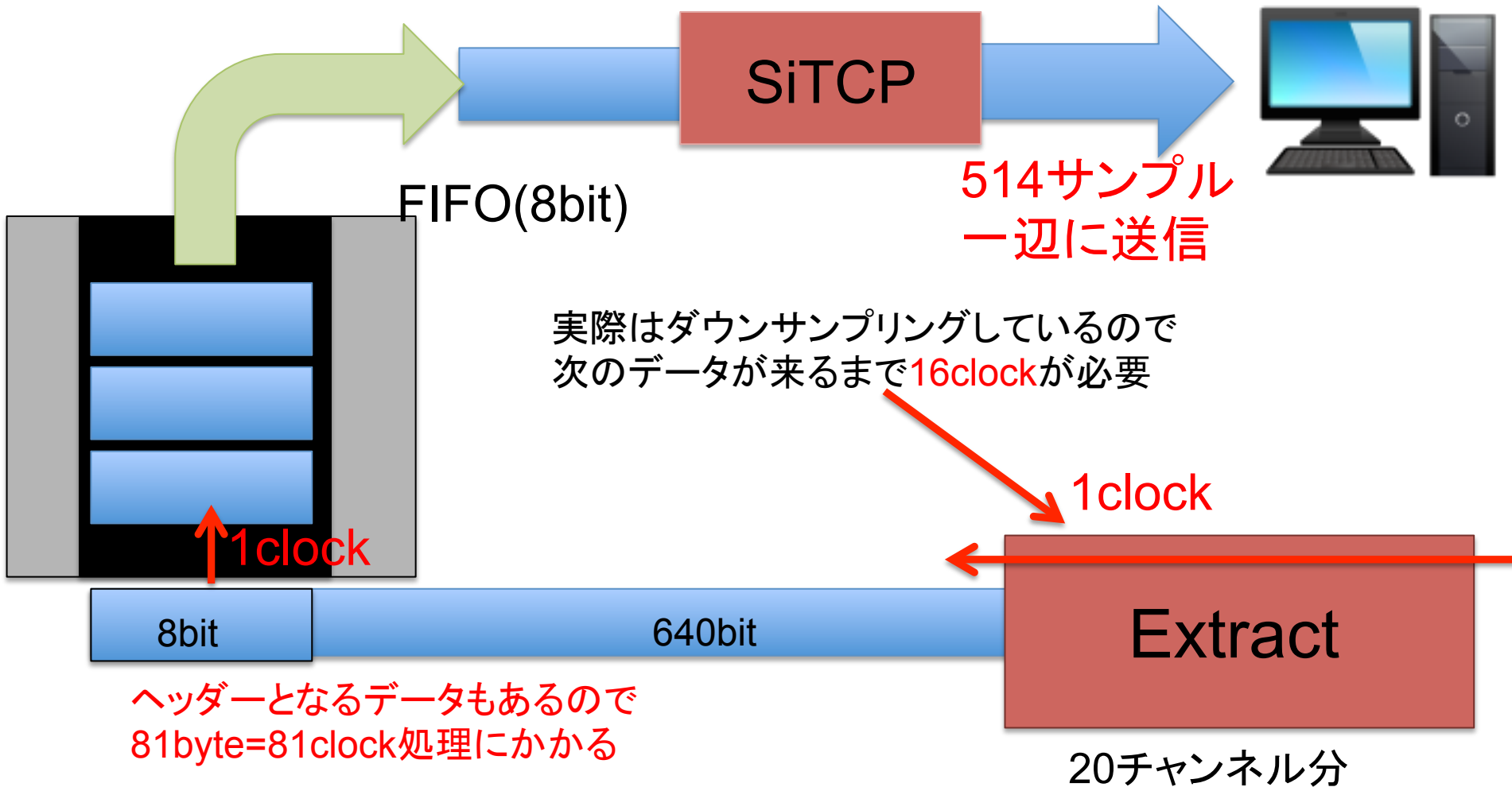


512サンプルのデータを抽出  
ヘッダーフッターを各1サンプルを追加して  
ひとつなぎ514サンプルのデータを出力

# SiTCPモジュール

- 1サンプルあたり80byteの測定データに通信用ヘッダー1byteを加えてSiTCPからPCへ送信する
- 発生した問題(バグ)
  - Extractデータ処理とSiTCPのデータ処理の差
    - Extract 1サンプル/16clock
    - SiTCP 1サンプル/81clock (正確にはFIFO)
  - PCへ送信されるデータのズレ
    - PC側のソフトウェアが514サンプル一辺に吸い出す仕様
    - FIFO(640bit)で消えるヘッダー
    - FIFO(8bit)への書き込み中に強制中断

# データ処理速度差による問題



# 修正後



SiTCP

514サンプル  
一辺に送信

FIFO(8bit)

FIFO(640bit)でワンクッション置くことで  
処理速度差を解消

FIFO(640bit)

1clock

8bit

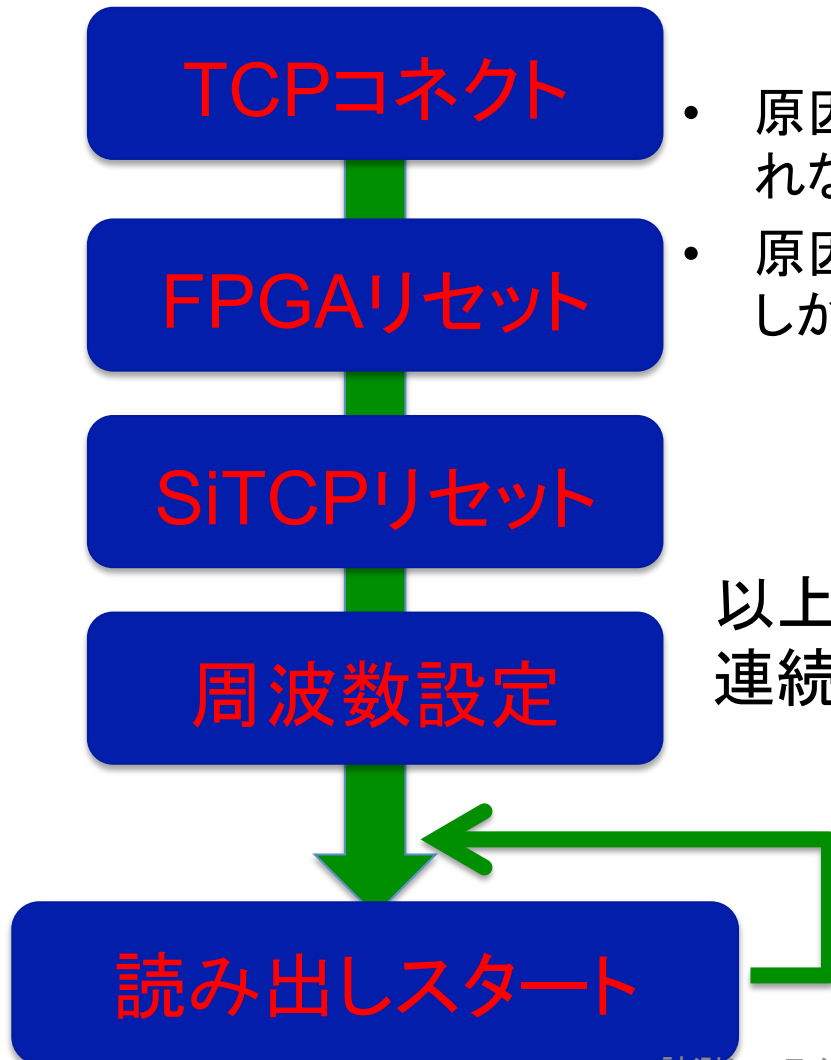
640bit

1clock

Extract

20チャンネル分

# PC側ソフトウェアフロー



- 原因1 : FPGAリセットでFIFO内のデータリセットされないバグ
- 原因2 : SiTCPリセットではSiTCPに送られたデータしかリセットしない

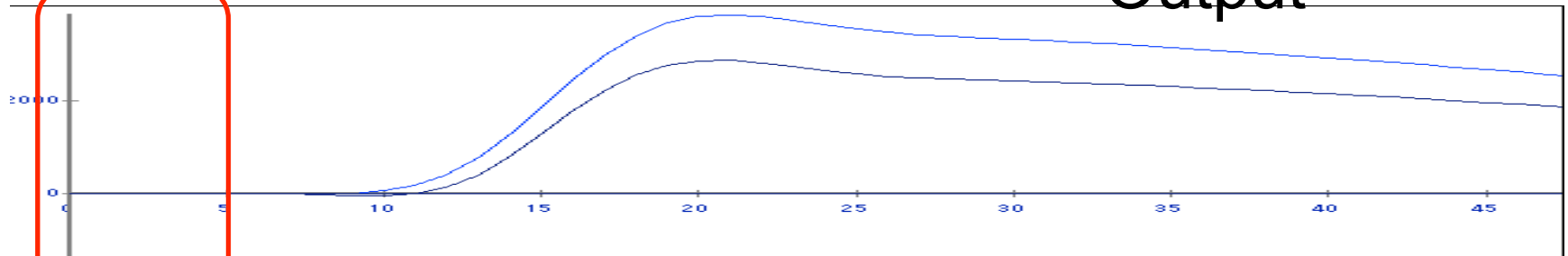
以上2つの理由により動作が不安定  
連続でデータを読み出せない

# FIFO(640bit)

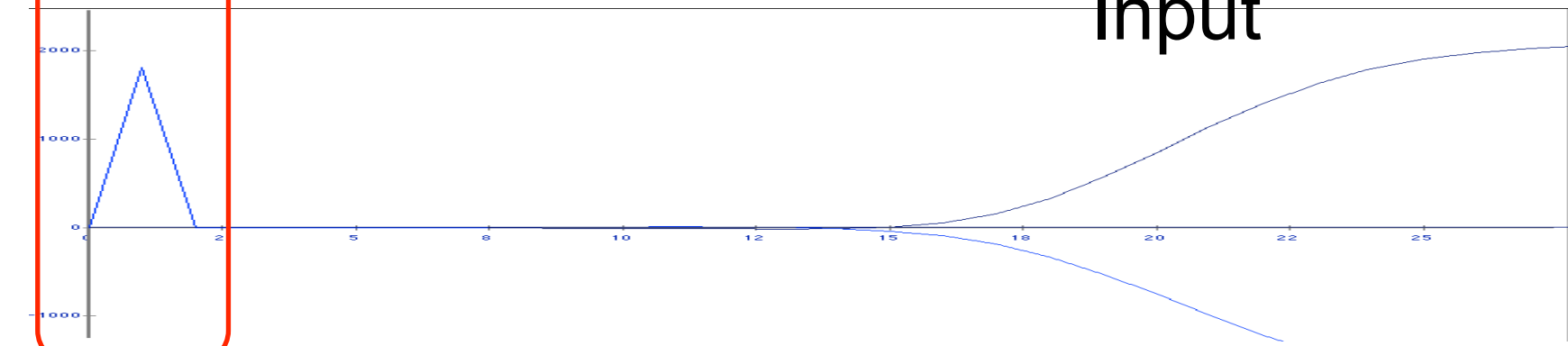
- データを送信するのに1サンプル足りなくなる
- FIFOへのwrite enableでサンプリングを行っているのでFIFOへの書き込みはされているはず
- Extractがトリガ待ちの状態になった後に起きる
- トリガがかかる間隔が短くなったり常時トリガがかかっている状態だと1event目でしか発生しない

ヘッダーが消失

Output

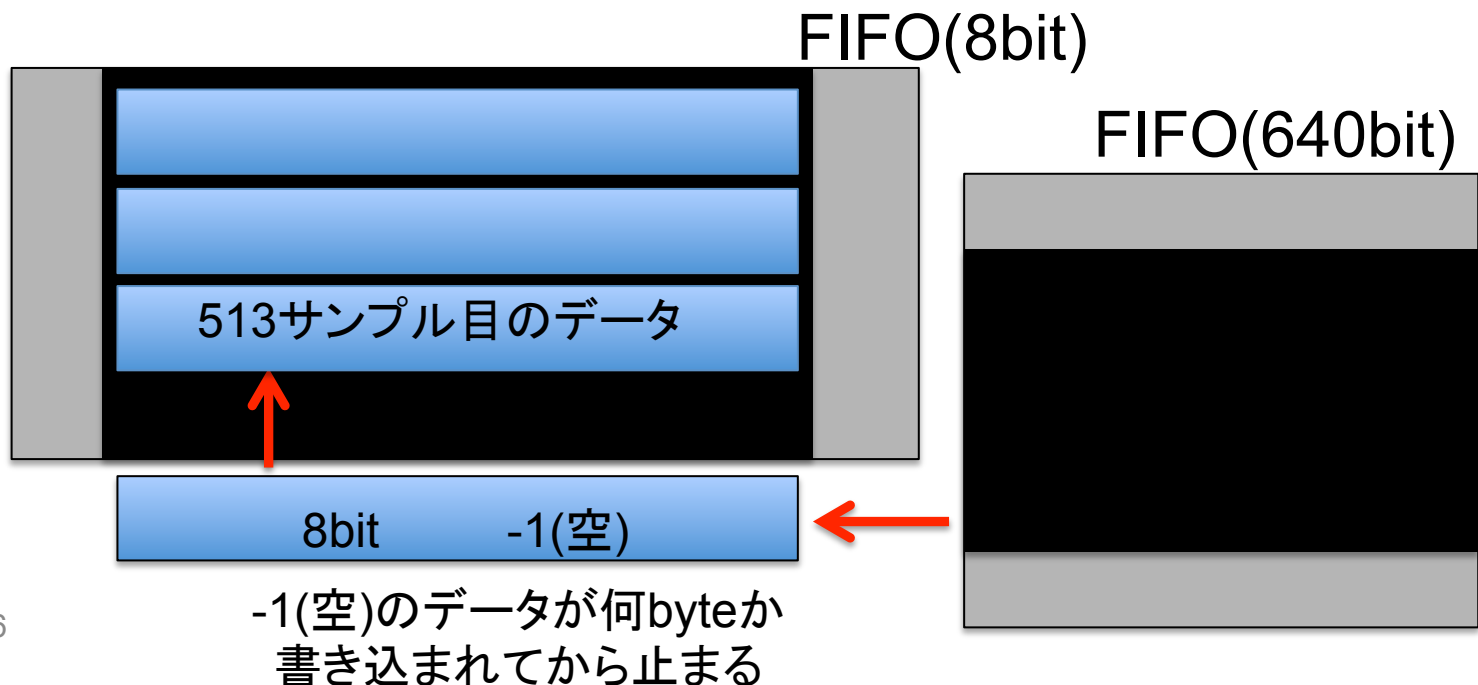


Input



# 書き込み中断バグ

- FIFO(640bit)がEmptyになるとFIFO(8bit)に81byteのデータを書き込みする作業が中断される
- 次の読み出されるイベントまで待機する機能が1サンプルデータが足りなかったせいで514サンプル目に中途半端に-1(DataEmpty)の数値を書き込んで中断するバグになった



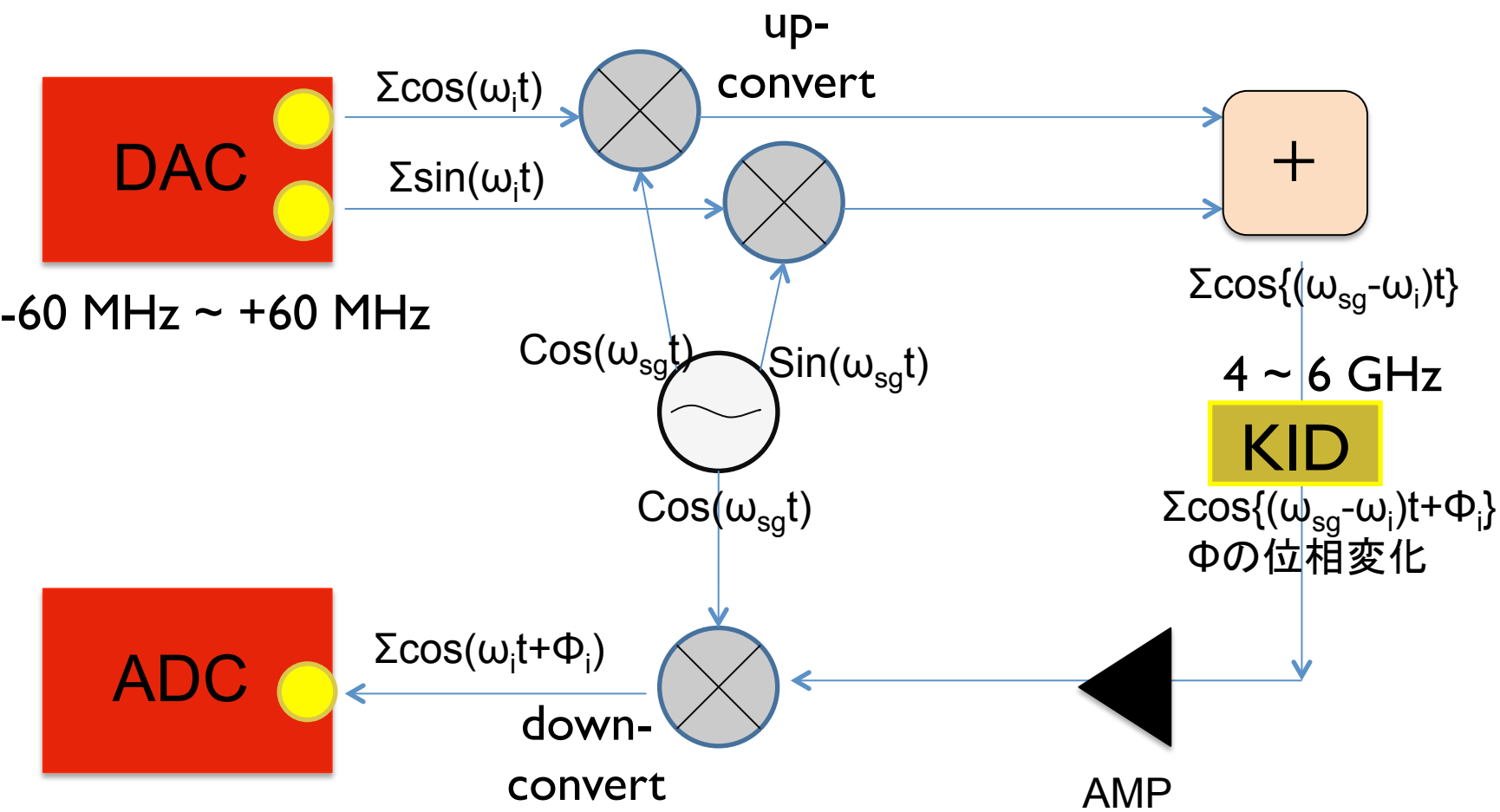


# 応急処置

※ヘッダー消失の原因が特定できていないので応急処置

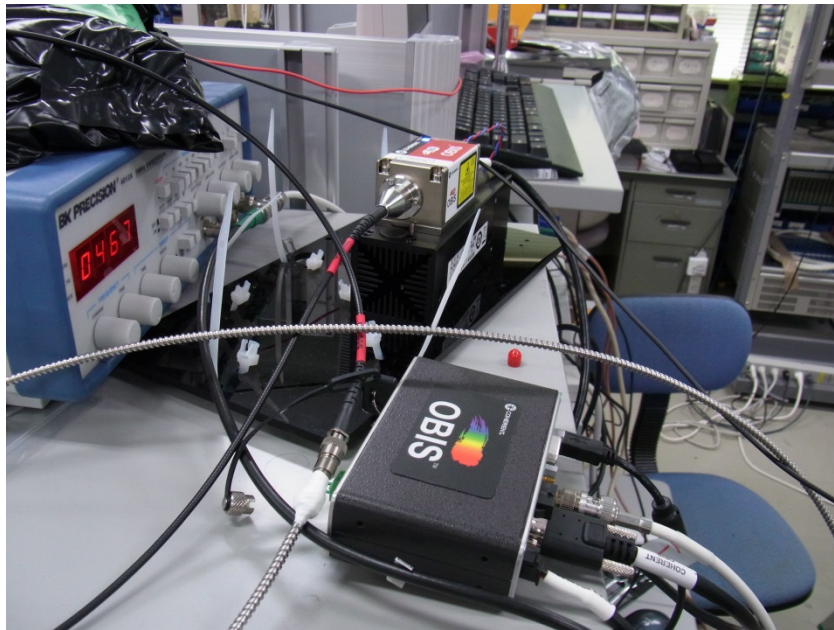
- FIFOのデータがリセットされないバグ修正
- 514サンプルデータ無い時足りない分に-1の入ったデータを埋める機能
- ヘッダー消失が現在原因特定中

# 読み出し系アナログ回路

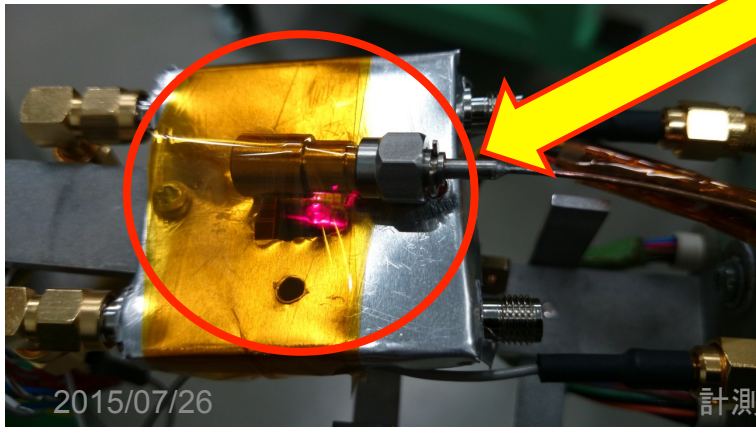
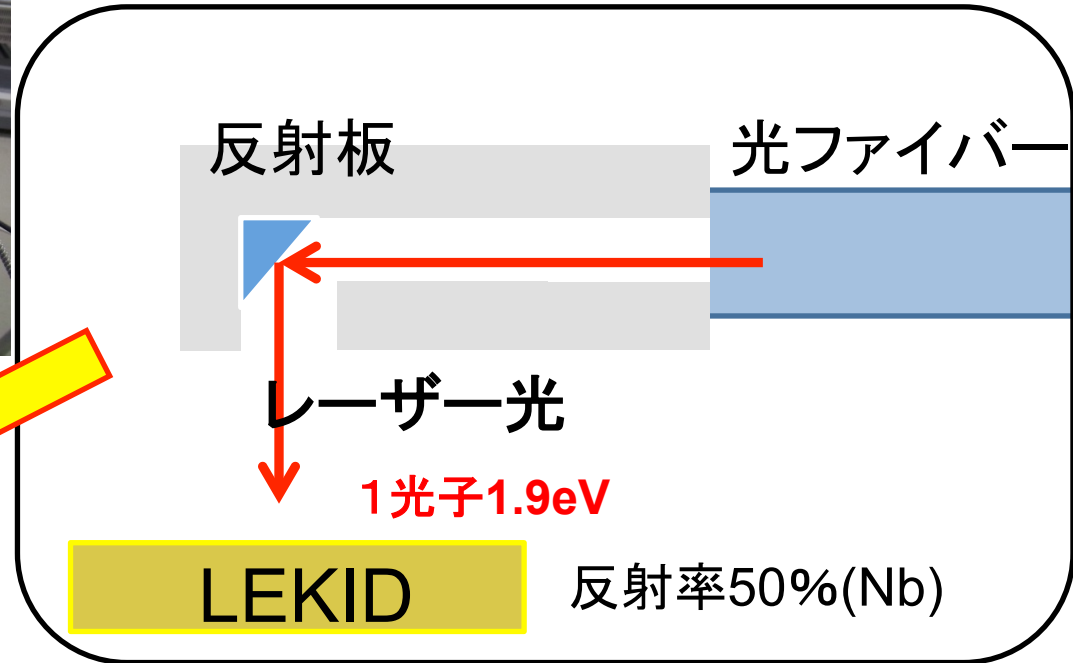


# レーザー照射実験

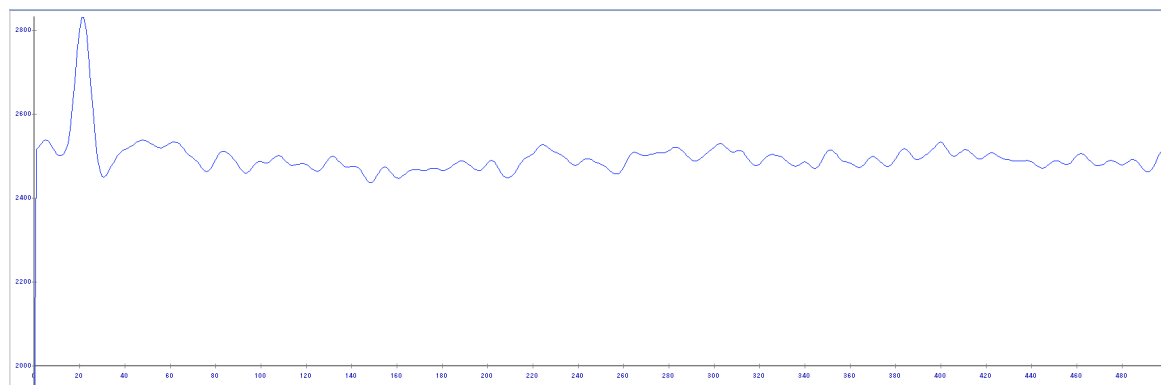
## 開発したDAQシステムの測定テスト



波長660nm・パルス幅10nsec  
の光を放つレーザーシステム

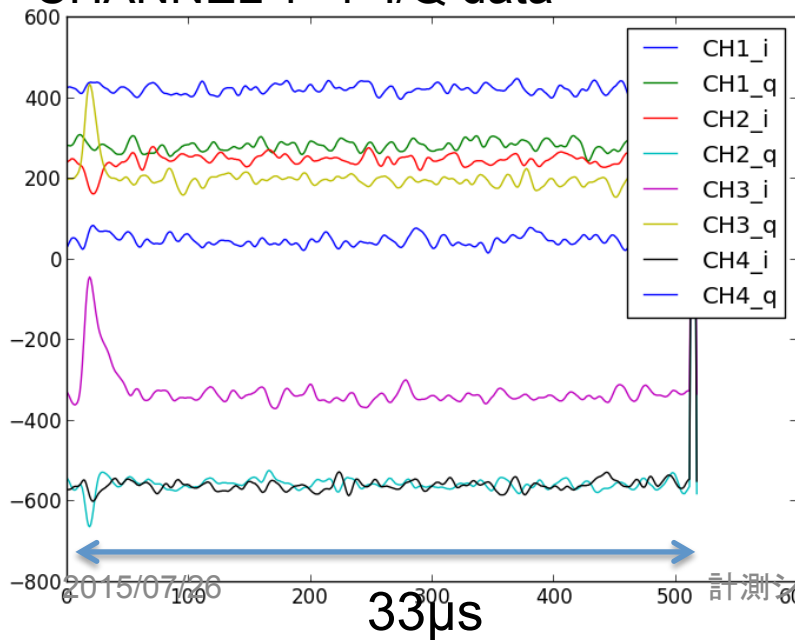


# 8ch Pulse multi Readout

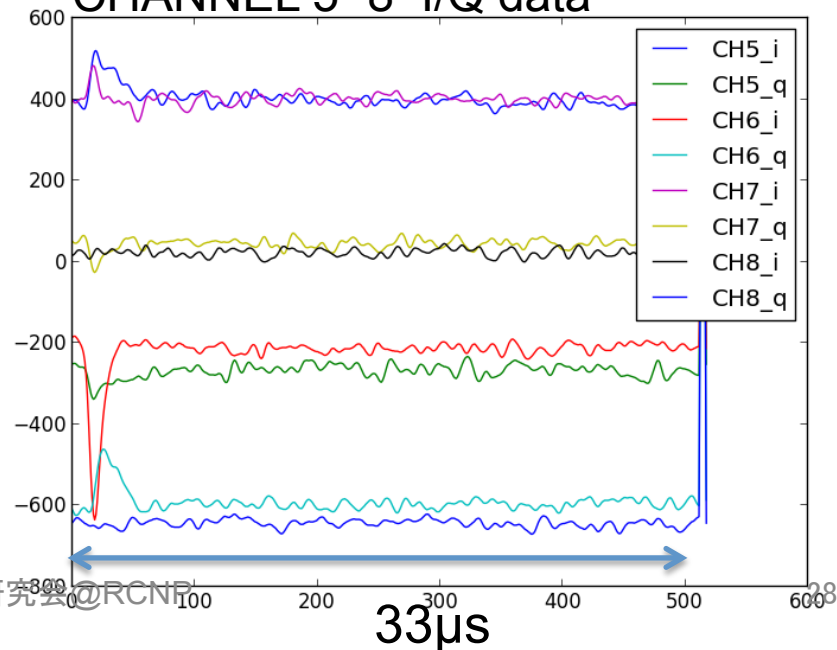


summing 8ch amplitude data

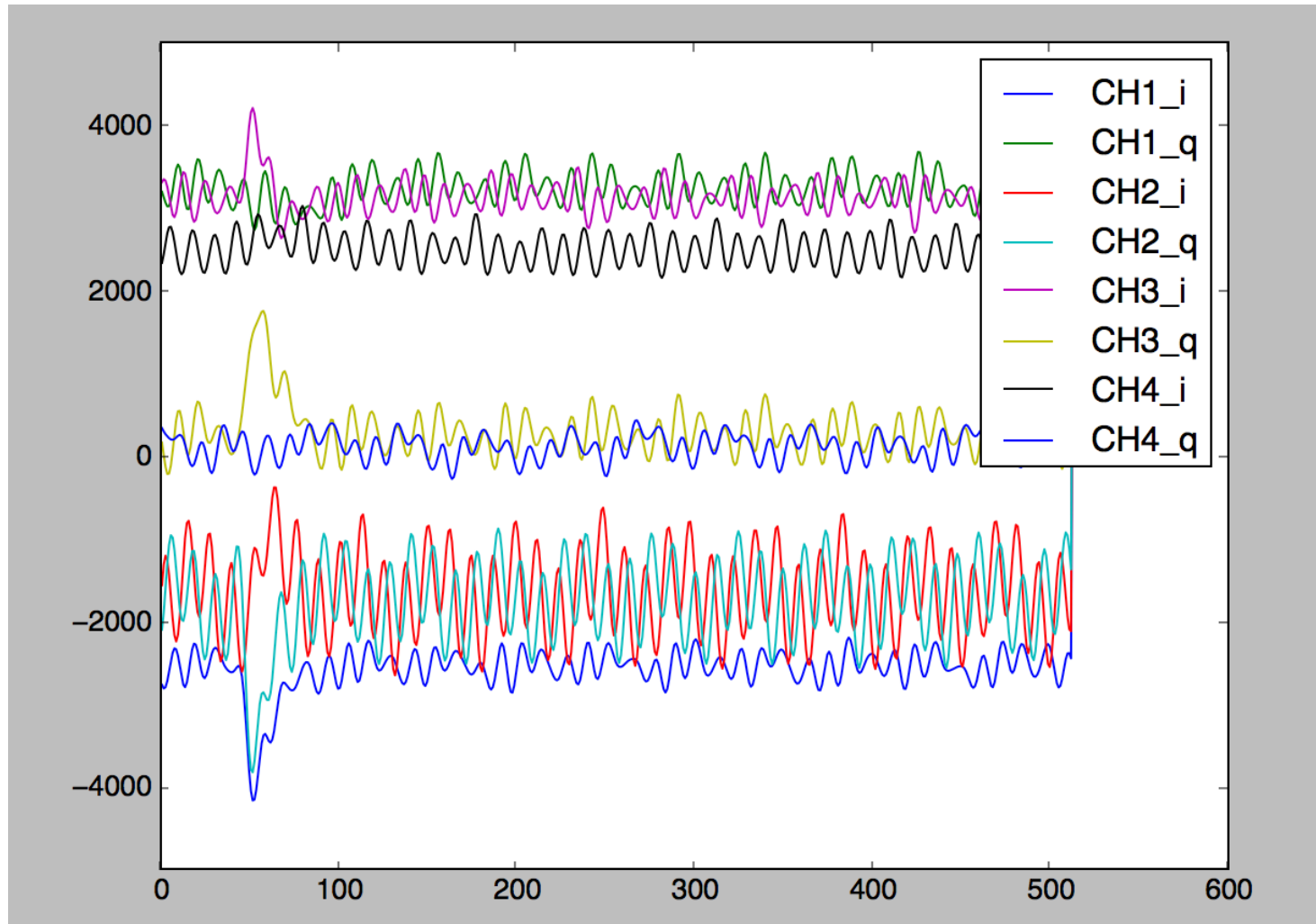
## CHANNEL 1~4 I/Q data



## CHANNEL 5~8 I/Q data



# 4チャンネル(6MHz)

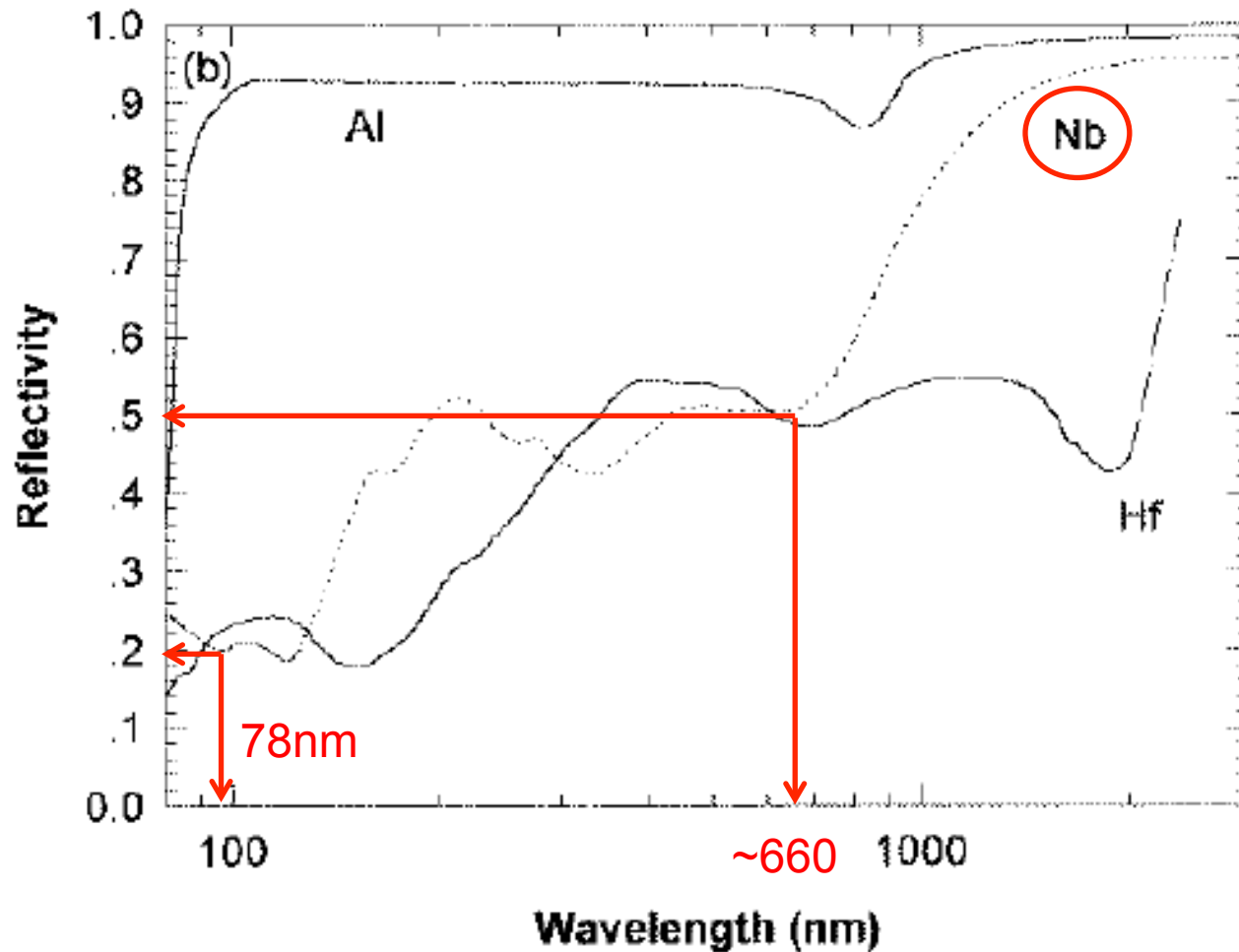


# まとめと今後

- 暗黒物質探索のためにKID用DAQシステムの開発を行っている
  - FPGAを用いて開発
  - パルス信号の多重同時読み出し
- 発生した問題
  - SiTCP通信で送信データのズレ(解決済み)
  - 測定データの一部消失(解決中)
- 現在パルス信号同時読み出し、8チャンネルまで成功
- 今後の課題
  - 1万eventの測定を行いシステムを評価する
  - 32チャンネルに拡張
  - 2枚のボードの動作を同期させて64素子を測定
  - 放射線源を利用した液体ヘリウム気液に装型検出器の測定テスト

# Back up

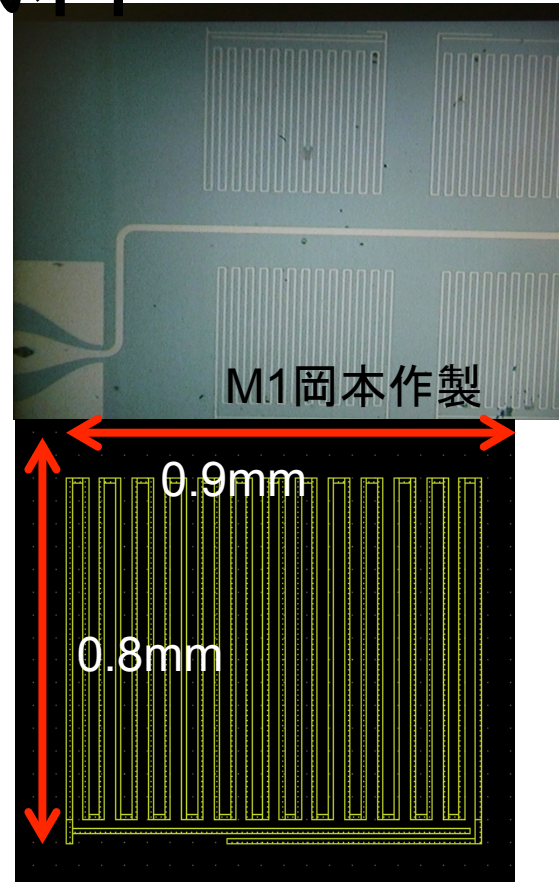
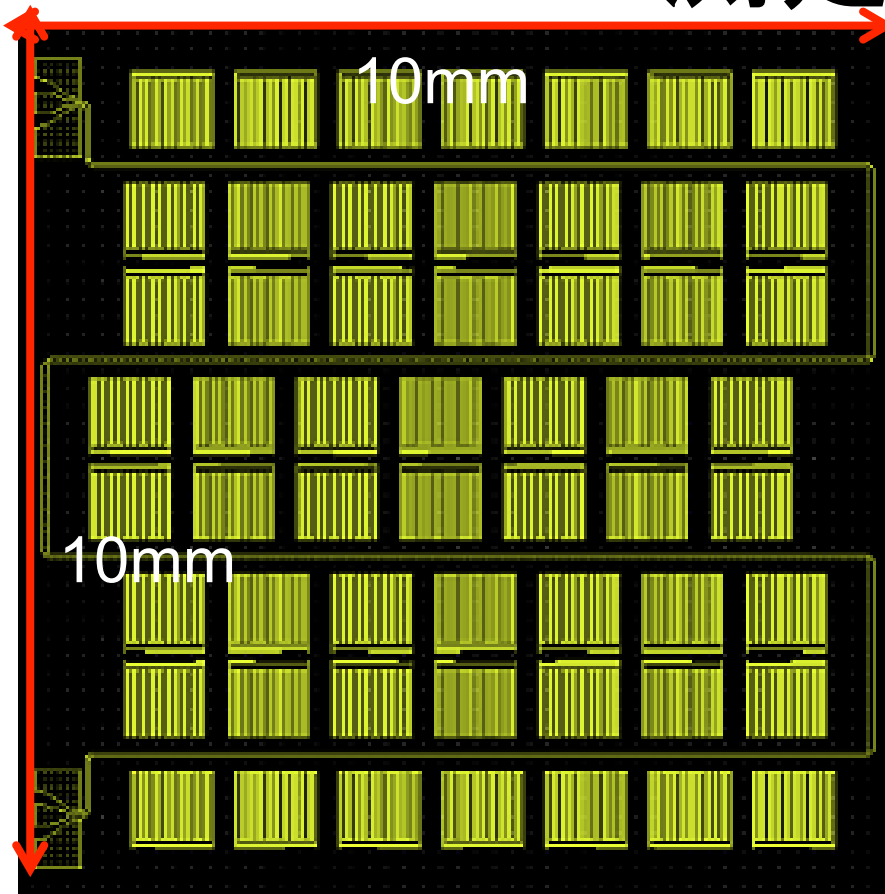
# 反射率(超伝導状態での理論式)



Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 123, 581-587 (1997)



# 測定試料



共振器面積 :  $2.4 \times 10^{15} (\mu\text{m}^2)$

厚み : 300nm

金属薄膜 : ニオブ ( $T_c=9.2\text{K}, 2\Delta=3.1\text{meV}$ )

共振器の数 : 56個

# 測定共振器 (5MHz)

