

MPGD + Active媒質TPC2025研究会 @ 岩手大学

アクティブ媒質TPCへの Cryo-CMOS導入に向けた検討

森田歩, 宮原正也*, 坂下健*, 細川律也, 成田晋也

岩手大学, KEK*

2025/12/19-20

背景

粒子検出器用信号読み出しエレクトロニクスの特徴

- 低ノイズ、低電力、高集積
- 極限環境下での長期安定動作

信号読み出しエレクトロニクスは粒子検出器の性能に大きく影響し、重要な要素技術の一つとして研究・開発が進められている。



Cryogenic-CMOS(Cryo-CMOS)に着目

- 微細プロセスを使用することでエレクトロニクスの機能性向上
 - 液体ヘリウム検出器の実現
- } が可能になる。

Cryo-CMOS技術を利用した信号読み出しエレクトロニクスの開発はニュートリノ観測や暗黒物質探索などにおける新たな実験手法への応用が期待でき、物理課題解明に貢献できる。

液体ヘリウム検出器の可能性

He(原子番号2)：原子核構造が他の原子と比較して単純。

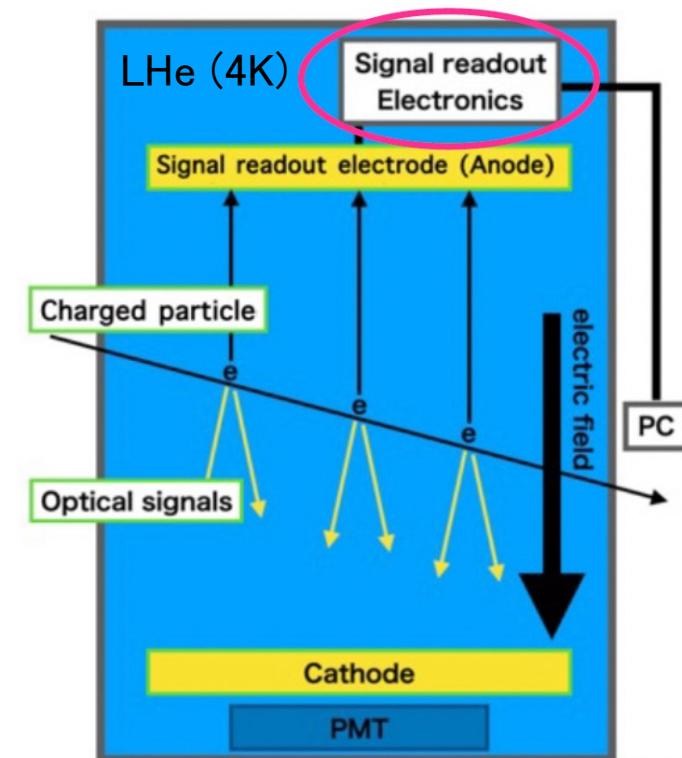
→ニュートリノ-原子核反応の系統誤差を最小化する。

長基線ニュートリノ実験における不確定性の要因の一つ。

Heを標的とした検出器：LHe-TPCを検討中

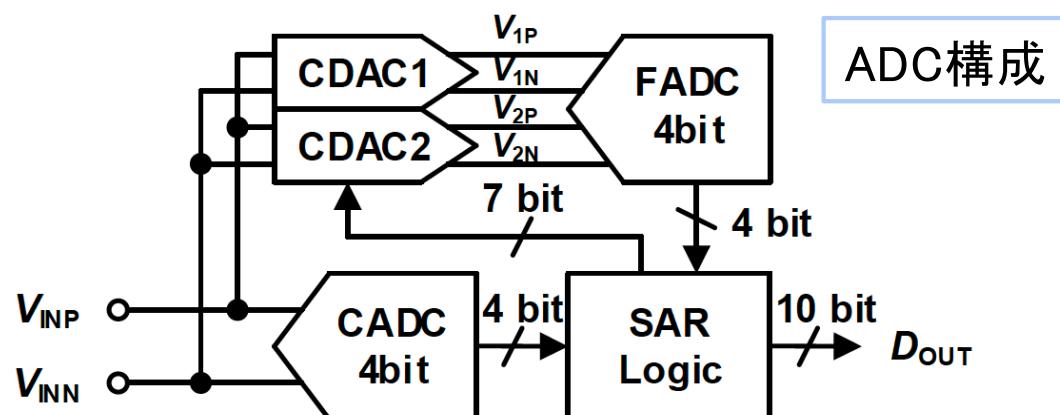
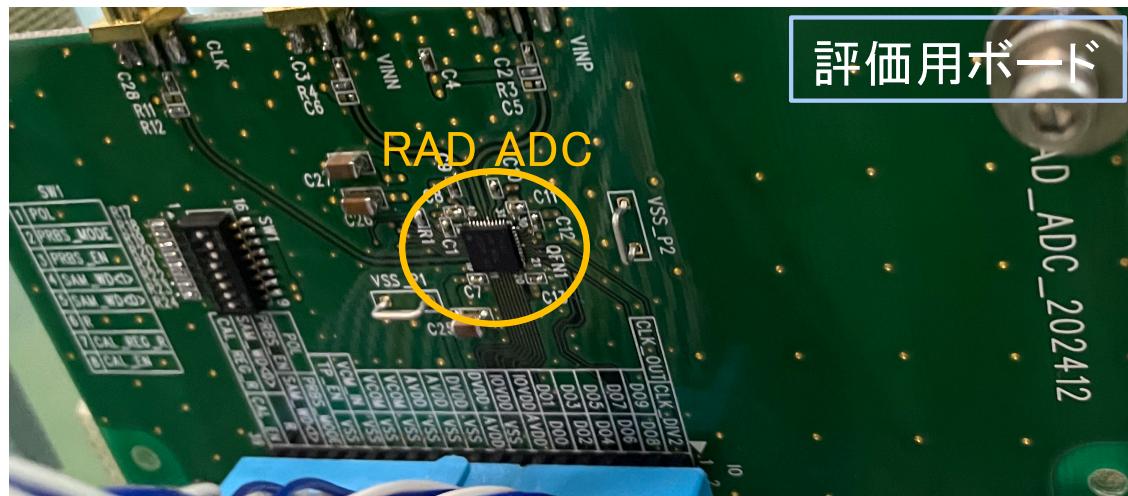
実現に向けての課題：

- ① LHe内での電離電子移動のための高電場形成方法の確立
- ② 低雑音読み出しのためのLHe中で動作する信号読み出しエレクトロニクスの開発



研究目的

Cryo-CMOSを使用したエレクトロニクス開発の設計・開発の指針を得るためにADCの動作特性を室温と液体He温度で測定し、素子の特性理解を目指した。

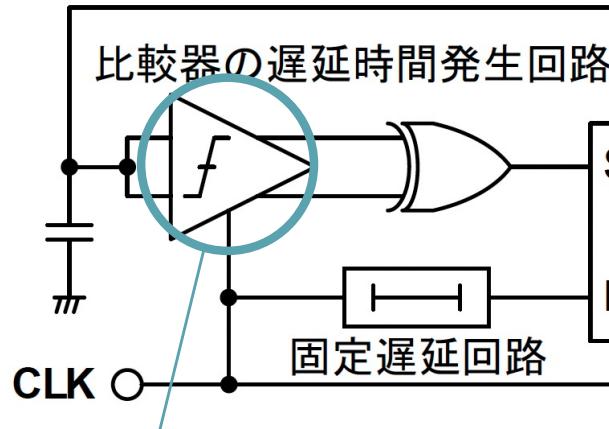


設計仕様

- 65 nmプロセスCMOS
- 10bit SAR ADC
- コンパレータ精度補償回路実装
- トランジスタの閾値電圧上昇による動作速度低下を補償する回路を実装。

速度補償回路

ADCのSAR Logicと同じcomparatorを使用した回路を実装し、動作速度の自己補償を行う。



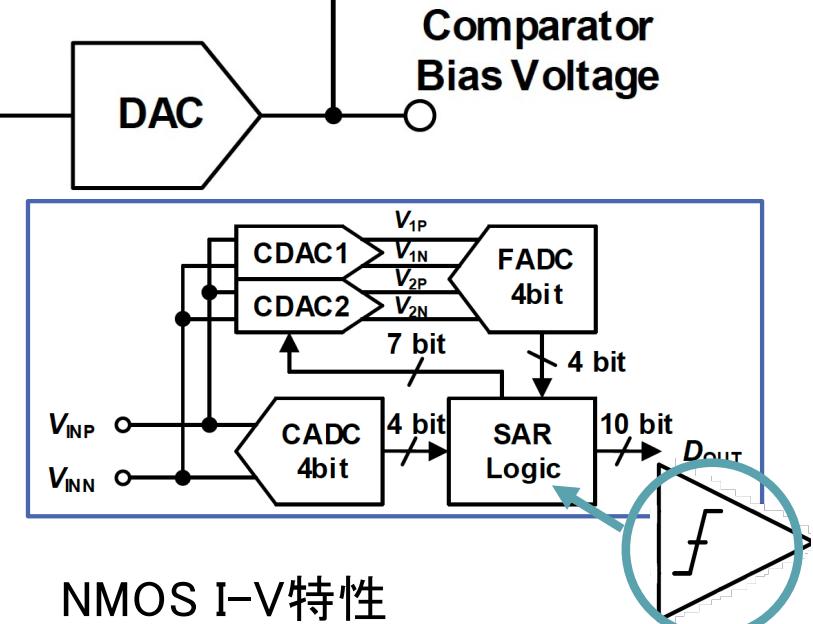
- ADCに搭載されているものと同一のcomparator
- ADCの動作速度の低下を検出し、ADCに印加するバイアス電圧を調整する。

放射線損傷により、トランジスタの閾値電圧が上昇し、動作速度が低下する。

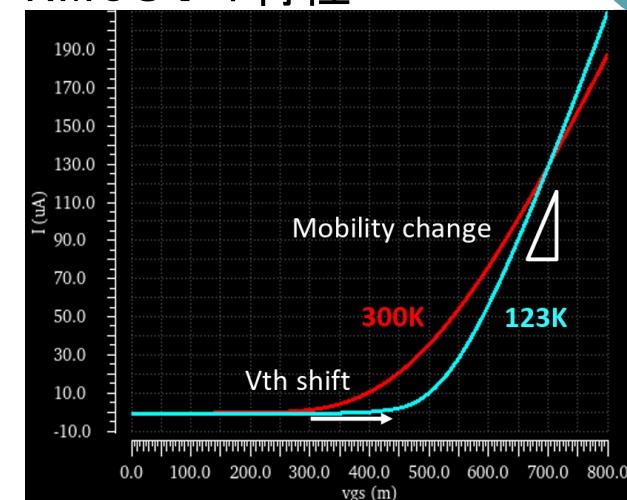
→低温環境下でもトランジスタの閾値電圧は上昇。

速度補償回路が、低温でのトランジスタの動作特性の変化に対しても有効なのではないか？

低温測定へ ➡



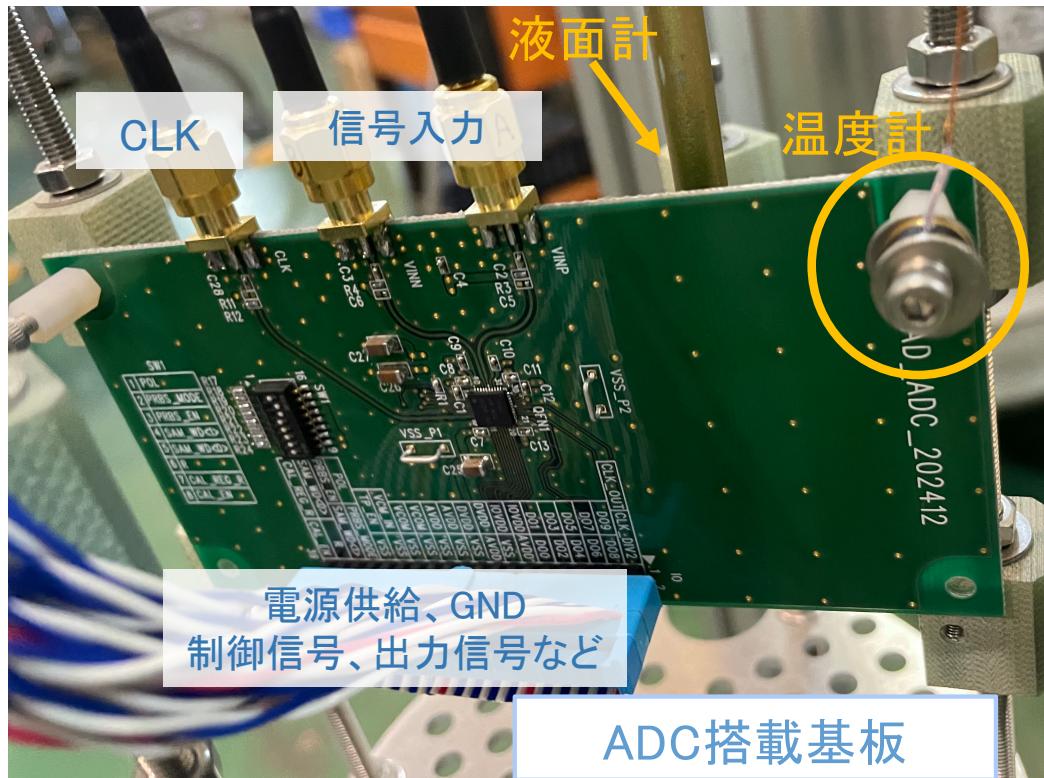
NMOS I-V特性



実験セットアップ : デュワー内へのADC基板設置

液体Heのデュワーに入れる専用の治具にチップを設置した。

- 信号はフラットケーブルでフィードスルーを通して送受信。
- ADCが搭載された基板の制御は外部からできるように設定。



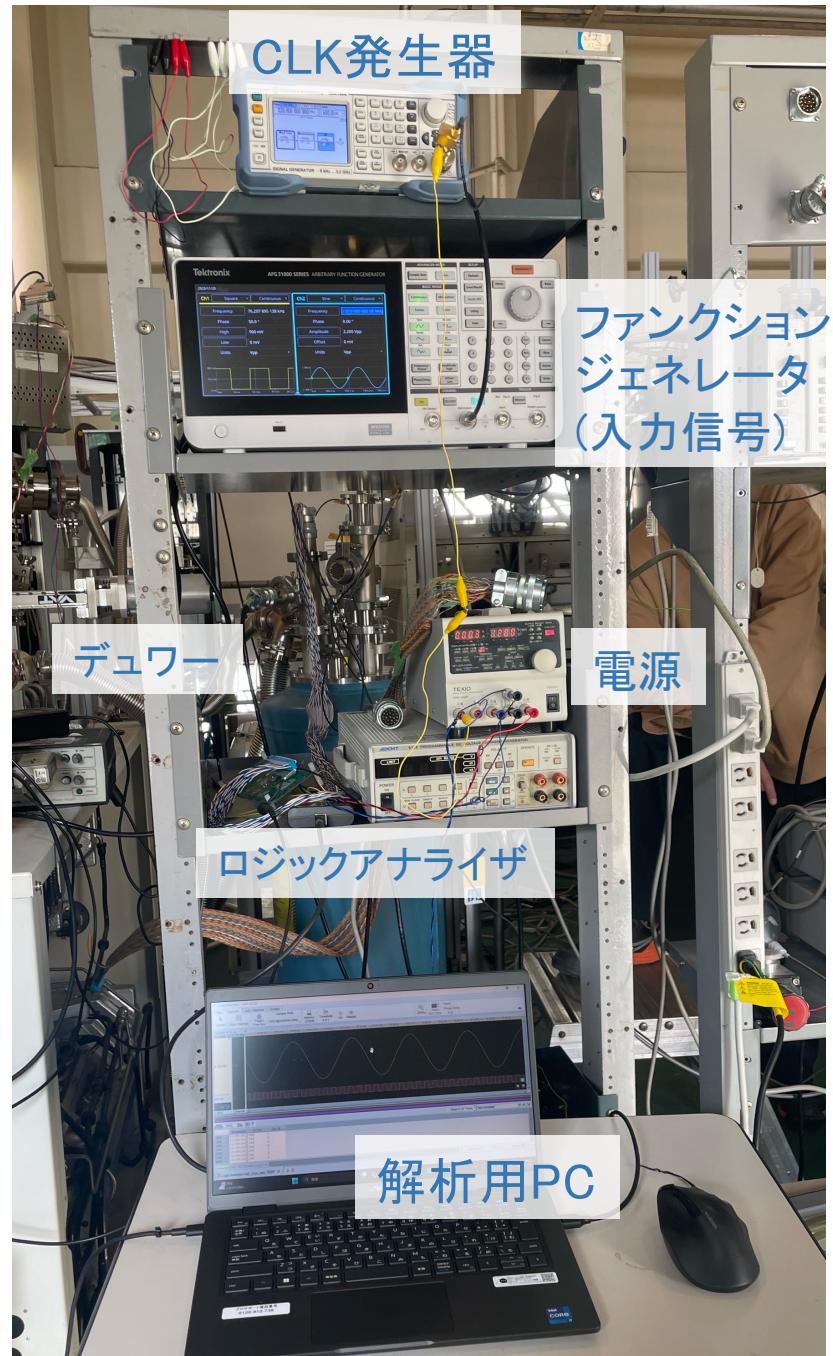
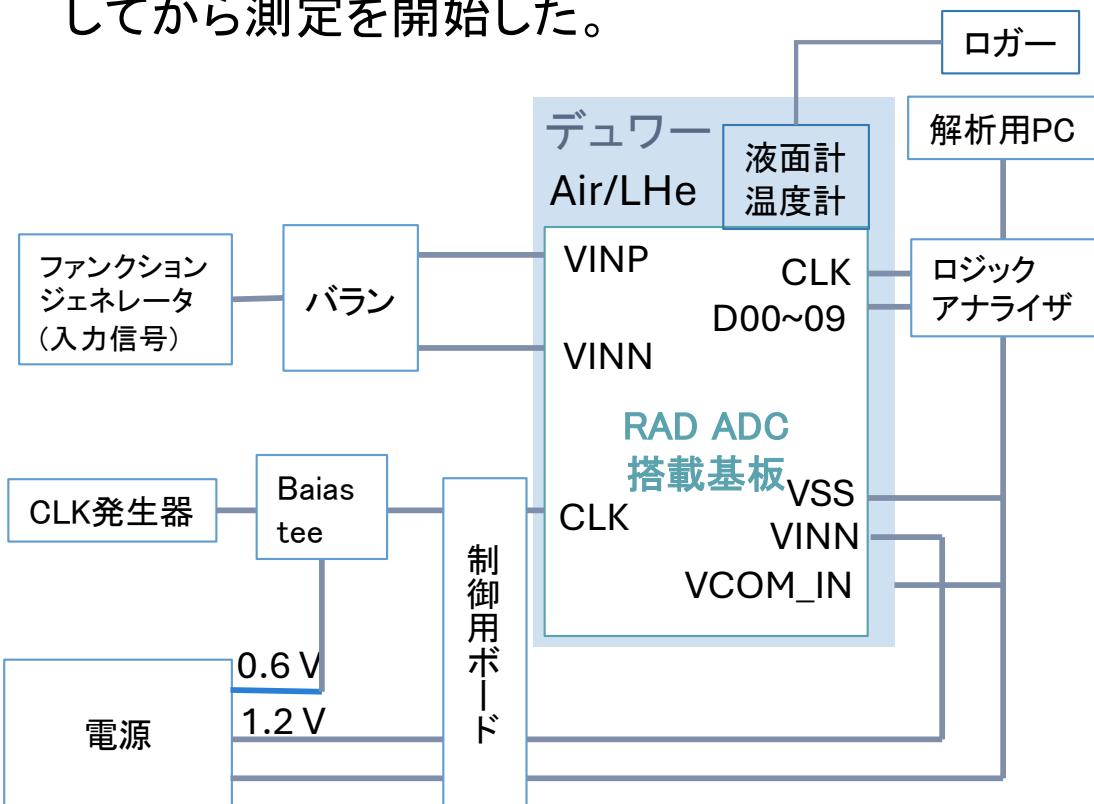
実験セットアップ：全体

室温試験

- デュワー内は空気で実施

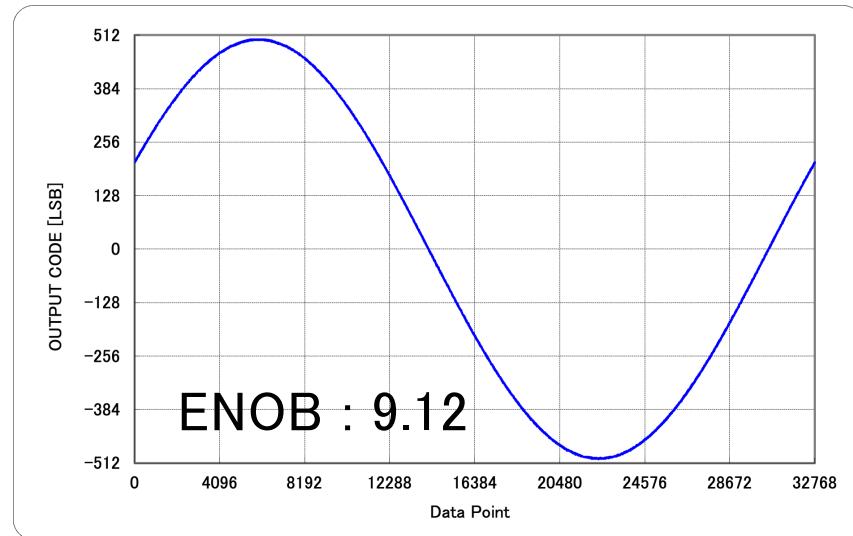
液体He温度試験

- 1時間程かけて液体ヘリウムを注入した。
- 液面計でADC搭載基板全体が液体ヘリウムに浸かり、温度計の表示が4Kになることを確認してから測定を開始した。

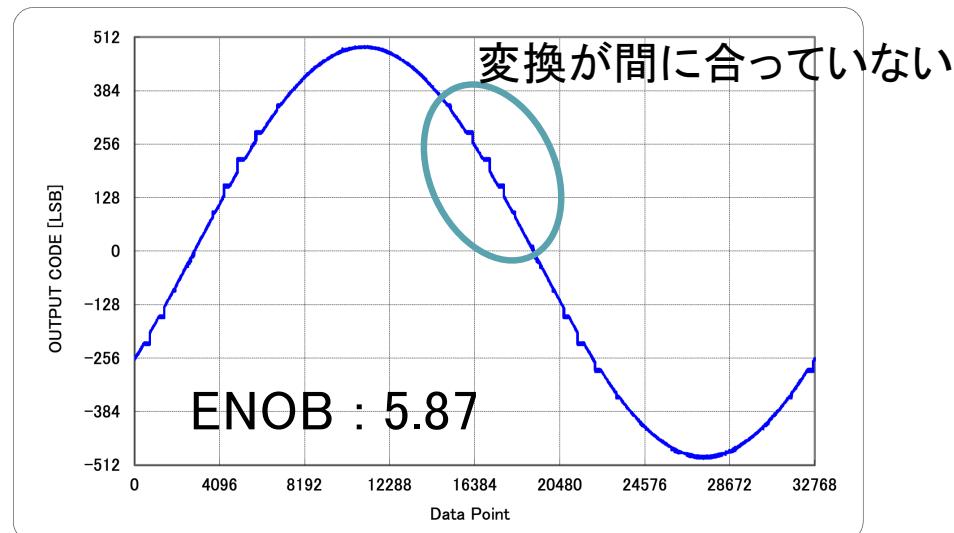


出力波形：室温

サンプリング周波数：80MHz



サンプリング周波数：150MHz



入力波形 : sin波
入力周波数 : 1 MHz

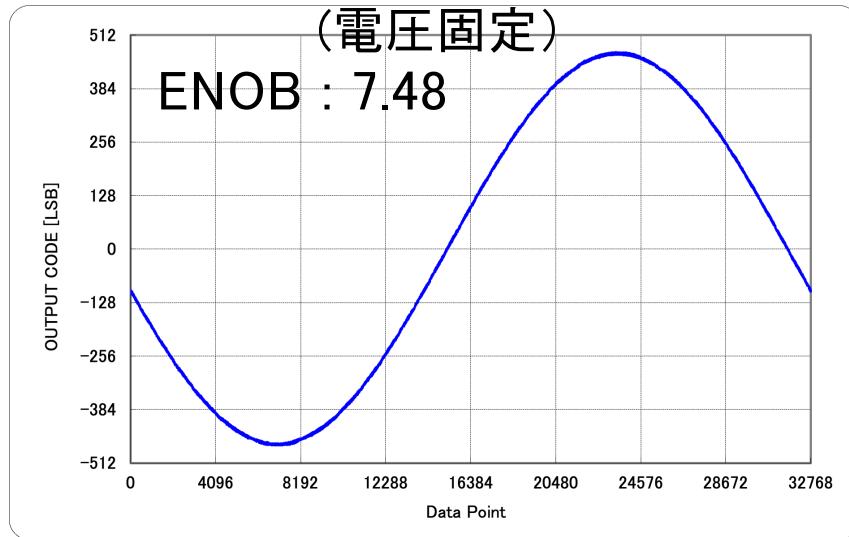
ENO (Effective Number Of Bit) :
ADCが持つノイズ、歪、非直線性などの誤差要因を考慮した、実際に有効に機能するbit数。

- サンプリング周波数80 MHzでは、ENO : 9.12と仕様から期待される性能に対して十分な結果を示した。
- 期待される性能が確認できたので、10MHzずつサンプリング周波数を速くしながら計測を実施した。
- サンプリング周波数が150 MHzになると、AD変換が間に合わず、精度が劣化する様子が見られたので、室温の測定は150 MHzで測定を終了した。

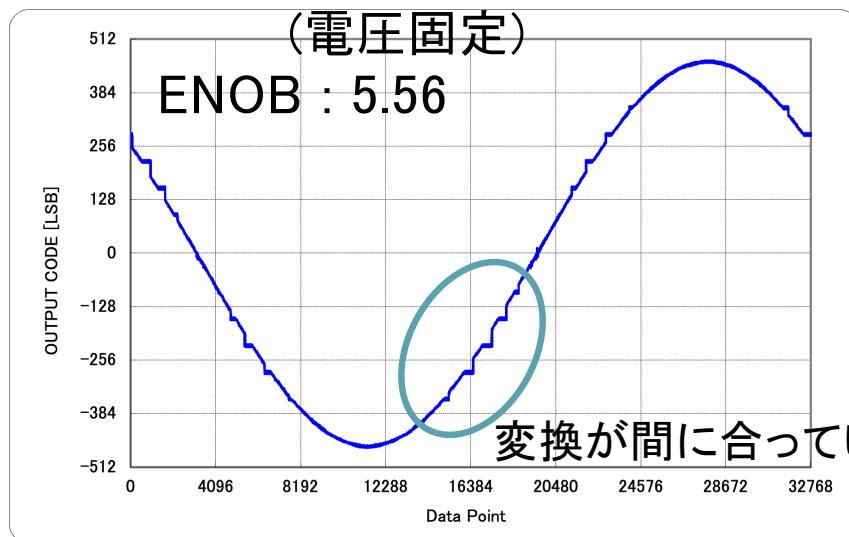
出力波形：液体He温度 (4K)

入力波形 : sin波
入力周波数 : 1 MHz

サンプリング周波数 : 80MHz



サンプリング周波数 : 180MHz



ENOB (Effective Number Of Bit) :
ADCが持つノイズ、歪、非直線性などの誤差要因を考慮した、実際に有効に機能するbit数。

- 室温と同様の設定では、信号の歪みが大きく、正常に動作しなかった。

設定を変更して測定

液体He温度でも動作可能な設定

- ▶ ADCのコンパレータに印加する電圧を外部から供給する動作。
- ▶ 速度補償回路を少し遅いモードに変更した動作。

- サンプリング周波数80 MHzでは、ENOB : 7.5 – 7.0と室温の結果より低下。
- サンプリング周波数が180, 190 MHzになると、室温と同様にAD変換が間に合わず、精度が劣化する様子が見られたので測定を終了した。

結果 : DNL, INL

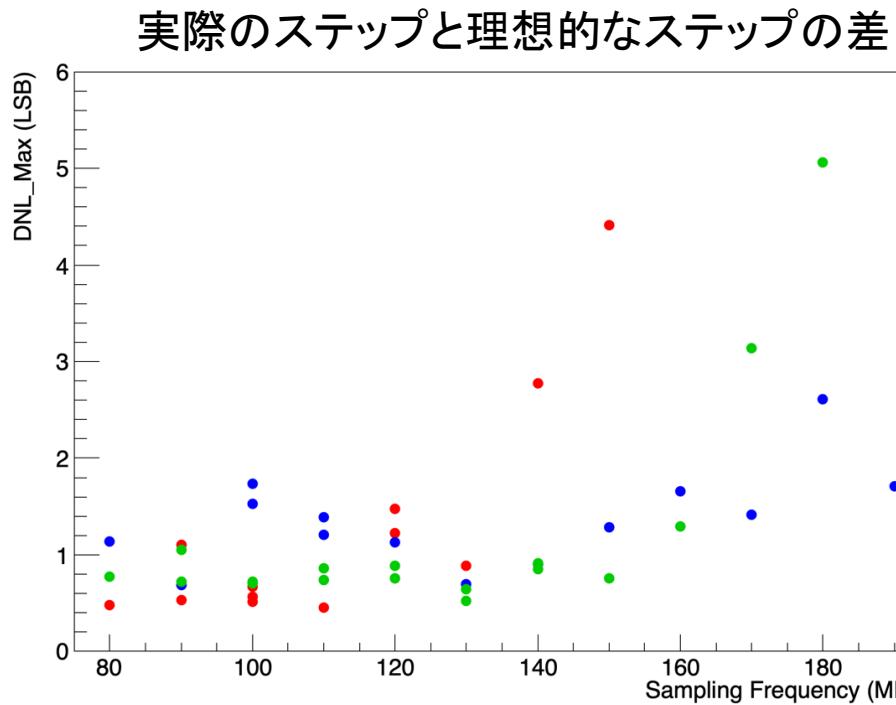
- 周波数に対するパラメータの変化を動作温度で比較

● 室温 : 80 – 120 MHz

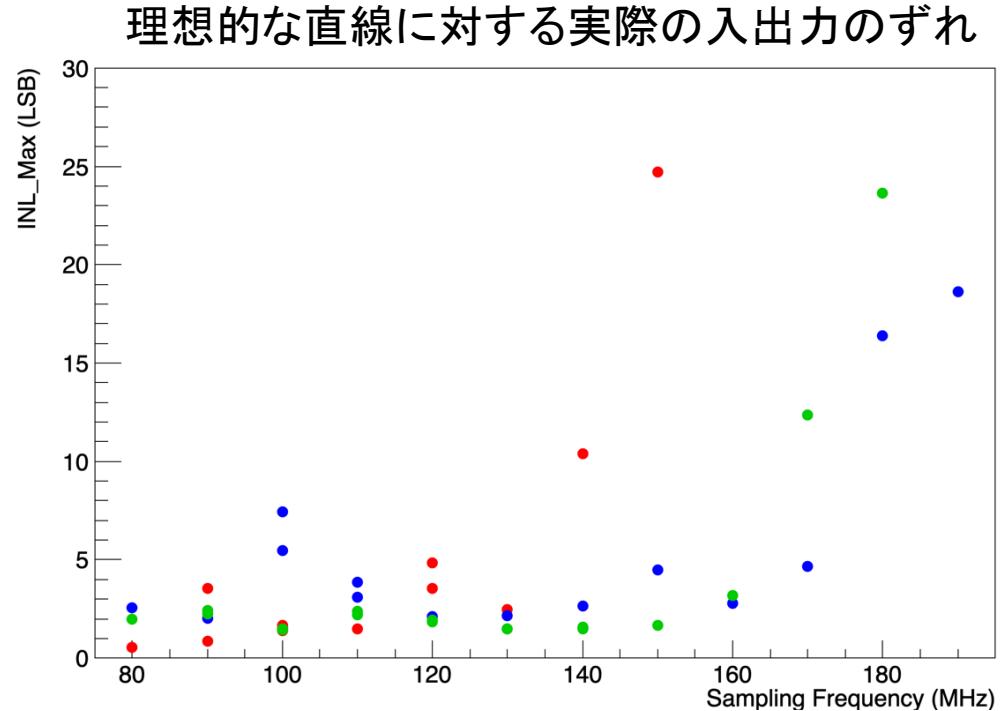
● 4K : 80 – 180 MHz (電圧固定)

● 4K : 80 – 190 MHz (補償速度変更)

DNL



INL

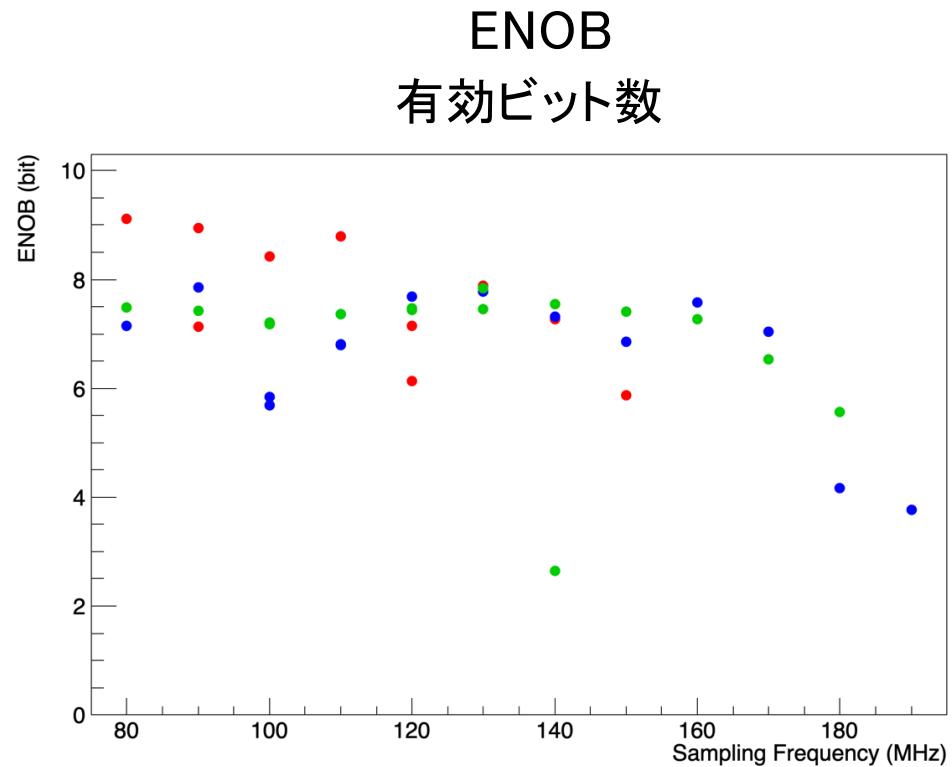
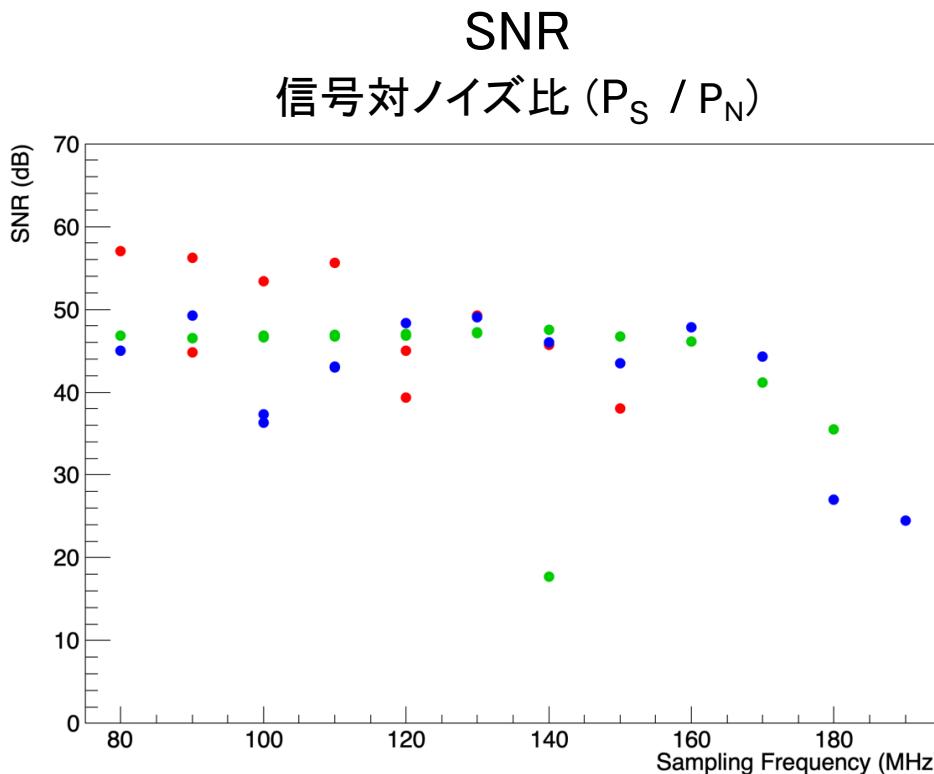


- サンプリング周波数80から120 MHzの範囲では液体He温度で線形性の劣化が観測された。
- サンプリング周波数を大きくすると、線形性が悪くなっていく様子が確認できる。
- 液体He温度では、130 MHz以上のより高サンプリング周波数帯でも線形性を維持している。(動作速度については問題ないと考えられる。)

結果 : SNR, ENOB

- 周波数に対するパラメータの変化を動作温度で比較

- 室温 : 80 – 120 MHz
- 4K : 80 – 180 MHz (電圧固定)
- 4K : 80 – 190 MHz (補償速度変更)



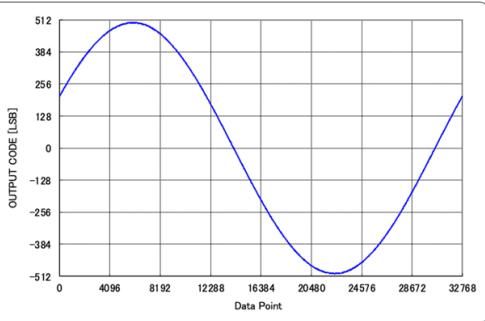
- 室温と比較して低温ではS/N比が悪くなっている。
- 室温ではENOB 9 bitを超えていたのに対して、液体He温度では最良でも8 bitに到達しておらず、AD変換の精度に劣化が生じている。
- 線形性と同様に130 MHz以上の高サンプリング周波数帯では液体He温度のほうが精度を維持している。(動作速度については問題ないと考えられる。)

液体He温度での特性変化

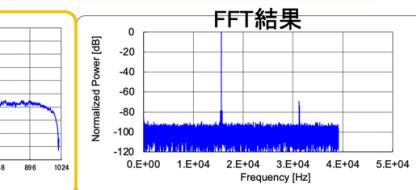
サンプリング周波数 80 MHz の
取得波形とパラメータの比較

室温

コヒーレントサンプリング並び替え波形

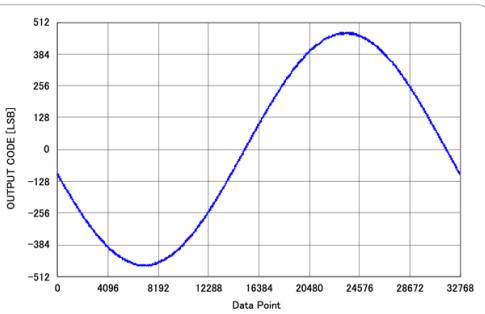


DNL_Max	1.3793
DNL_min	-0.9985
INL_Max	4.7438
INL_min	-3.2923
SNR	57.03
SFDR	69.10
THD	-67.71
SNDR	56.68
ENOB	9.12

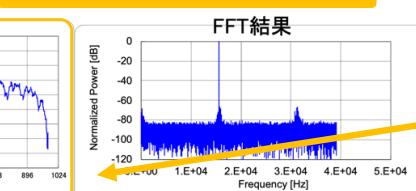


液体He温度 (電圧固定)

コヒーレントサンプリング並び替え波形



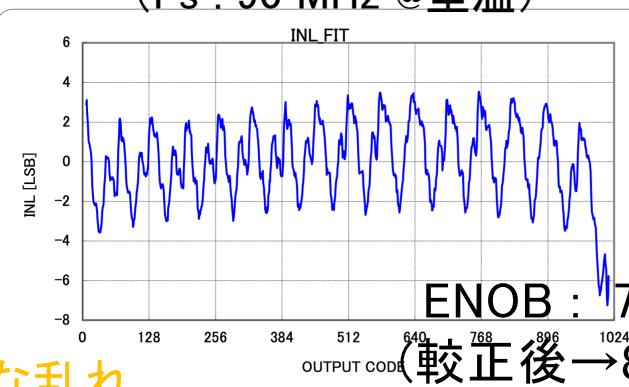
DNL_Max	1.1590
DNL_min	-0.9971
INL_Max	5.7369
INL_min	-7.4356
SNR	46.86
SFDR	65.09
THD	-64.80
SNDR	46.79
ENOB	7.48



液体He温度でのS/N比低下が、ADC精度低下に大きく影響していると考えられる。

- ENOBの値で、低温で精度が落ちているのがわかるが、解析結果を比較すると、INLが周期的に乱れていることが確認できる。
- この乱れは、コンパレータのキャリブレーション回路の動作が正常ではない際に生じ、ENOBも~7 bit程度に下がる。

キャリブレーションが正常に機能していない例
(Fs : 90 MHz @室温)



ENOB : 7.13

(較正後→8.95)

周期的な乱れ

特性変化の原因考察

ADCの性能劣化の原因

コンパレータの精度キャリブレーション回路の不具合

低温で生じるトランジスタの特性変化

- 閾値電圧(V_{TH})の上昇
- キャリアの移動度の増加
→トランスクンダクタンスが上昇

考えられる理由

1. *ランダムテレグラムノイズ(RTN)の影響の可能性。

* RTN: 低温環境下でトランジスタのキャリアがトラップ後、放出されにくくすることで生じるノイズ

2. トランジスタのトランスクンダクタンスが大きくなることで、キャリブレーションが効くトランジスタの範囲が狭くなっている可能性。

3. キャリブレーション回路のトランジスタの V_{TH} が高くなりすぎてしまい、正常に動作しなくなっている可能性。

今後の開発方針

まずはRTNが特性変化に与える影響の度合いを確認する。

→ 緩やかな V_{TH} の変化として現れるので、測定できるセットアップの用意が必要。

→ もしも支配的な要因であれば、低温ADCの動作自体について根本から設計を変え、対策する必要がある。

まとめ

- Cryo-CMOSを使用した信号読み出しエレクトロニクスの開発の準備段階として、液体He温度における素子特性理解のためのADC特性評価を実施した。
- 液体He温度では、室温と同じADCの設定では動作しなかった。
- 設定を変更して測定したが、室温に対して、液体He温度ではADCの精度の劣化が確認された。
 - コンパレータの精度キャリブレーション回路の不具合を原因と考えている。
- 一方動作速度については問題ないと考えられる。
- 今後は性能低下の原因と推測している現象に対して検証を進めていく。
 - まずは、RTNの影響がどの程度支配的なのか確認する。
 - 他の原因についてもシミュレーションや動作条件を変えた測定を行うことで原因特定を目指す。