

HL-LHC ATLAS実験用ピクセルモジュールの 70 MeV陽子線照射環境下での 放射線耐性評価 TCHoU Work Shop

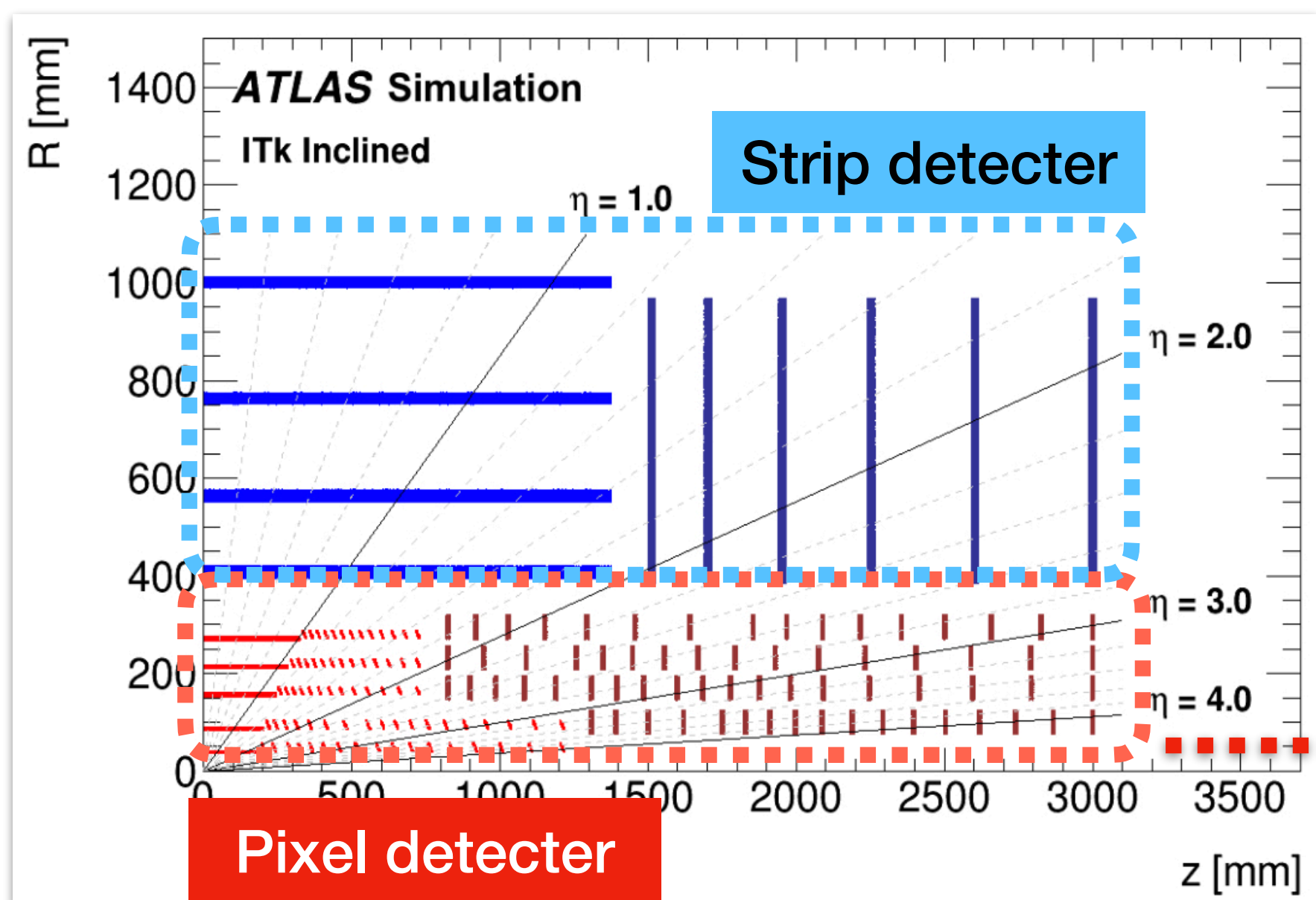
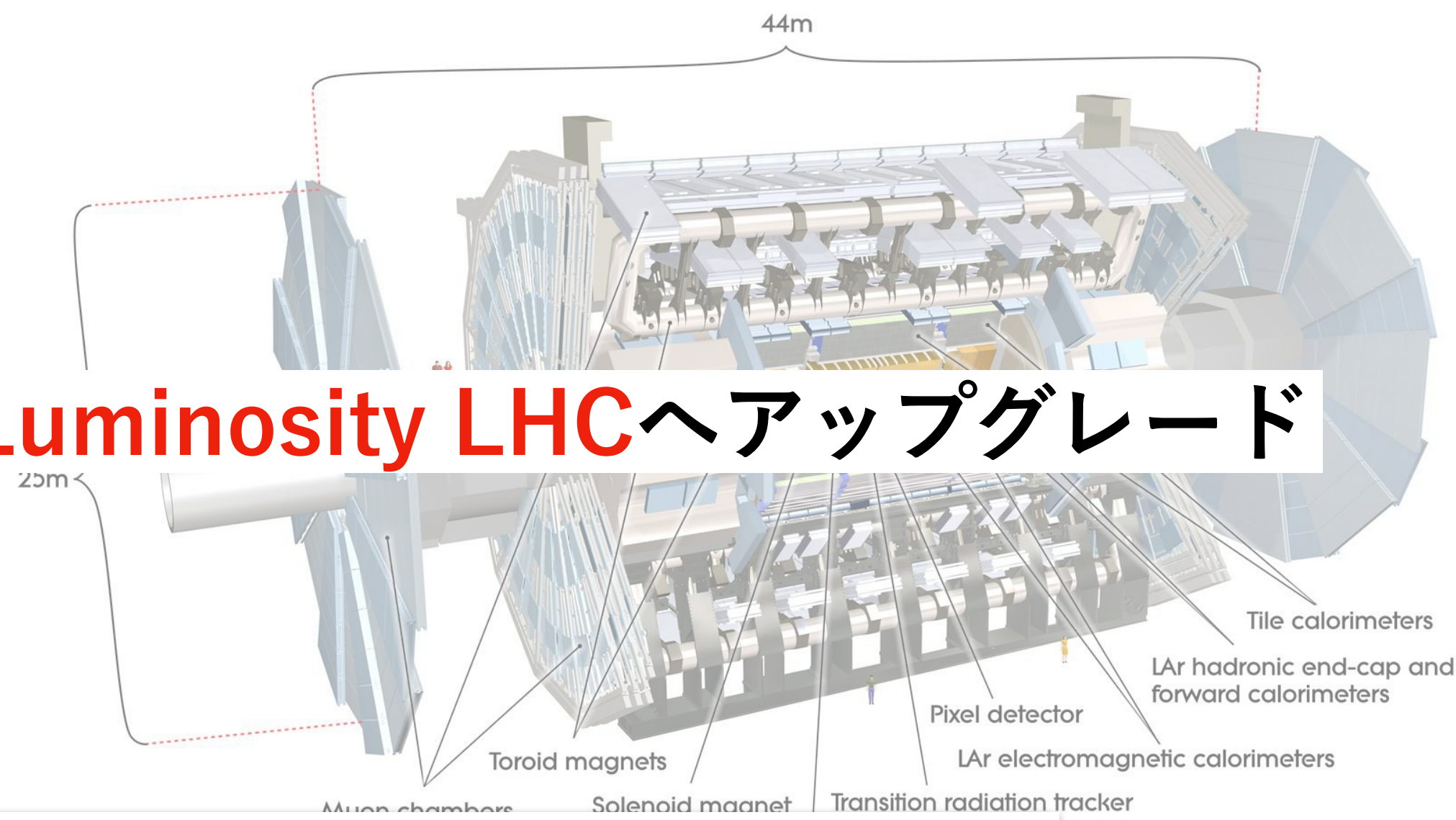
筑波大学理工学群物理学類/素粒子実験研究室/比江森友太

中村浩二^{^A^}, 原和彦, 廣瀬茂輝, 齊藤功太, 熊倉泰成, 花垣和則^{^A^}, 外川学^{^A^}, 他ATLAS日本シリコングループ
筑波大学, KEK^{^A^}

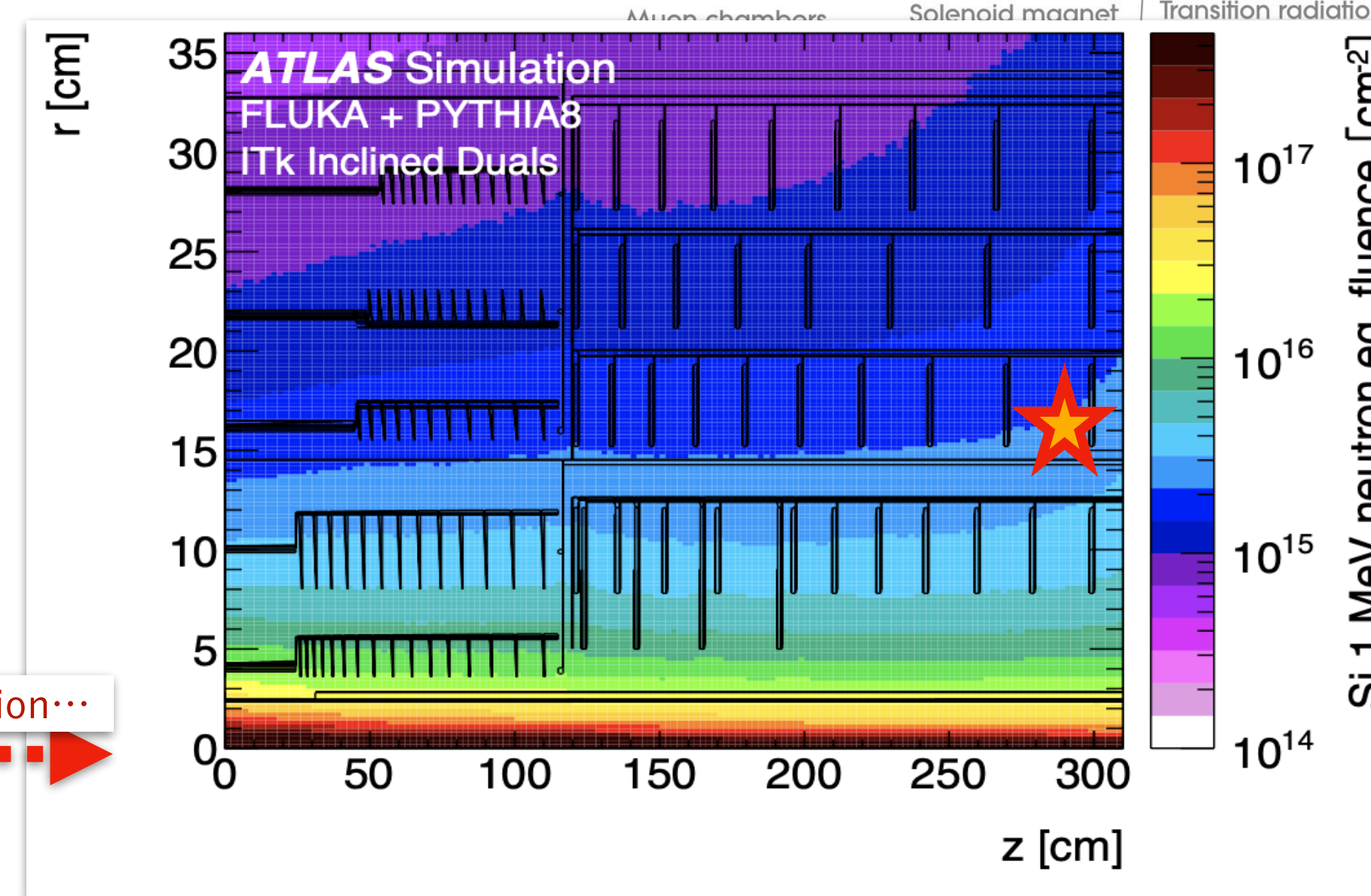
HL-LHCとATLAS検出器

2029~: Large Hadron Collider @CERN → **High-Luminosity LHC**へアップグレード

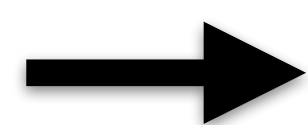
- ▶ ビームの高輝度化：ATLAS検出器でより精密な物理測定が期待
 - 最内層の内部飛跡検出器も新型（ITk）へ刷新



Radiation Damage Simulation...



日本グループが量産するPixel検出器も
高い放射線損傷が想定 ($\sim O(10^{15}) n_{eq}/cm^2$)

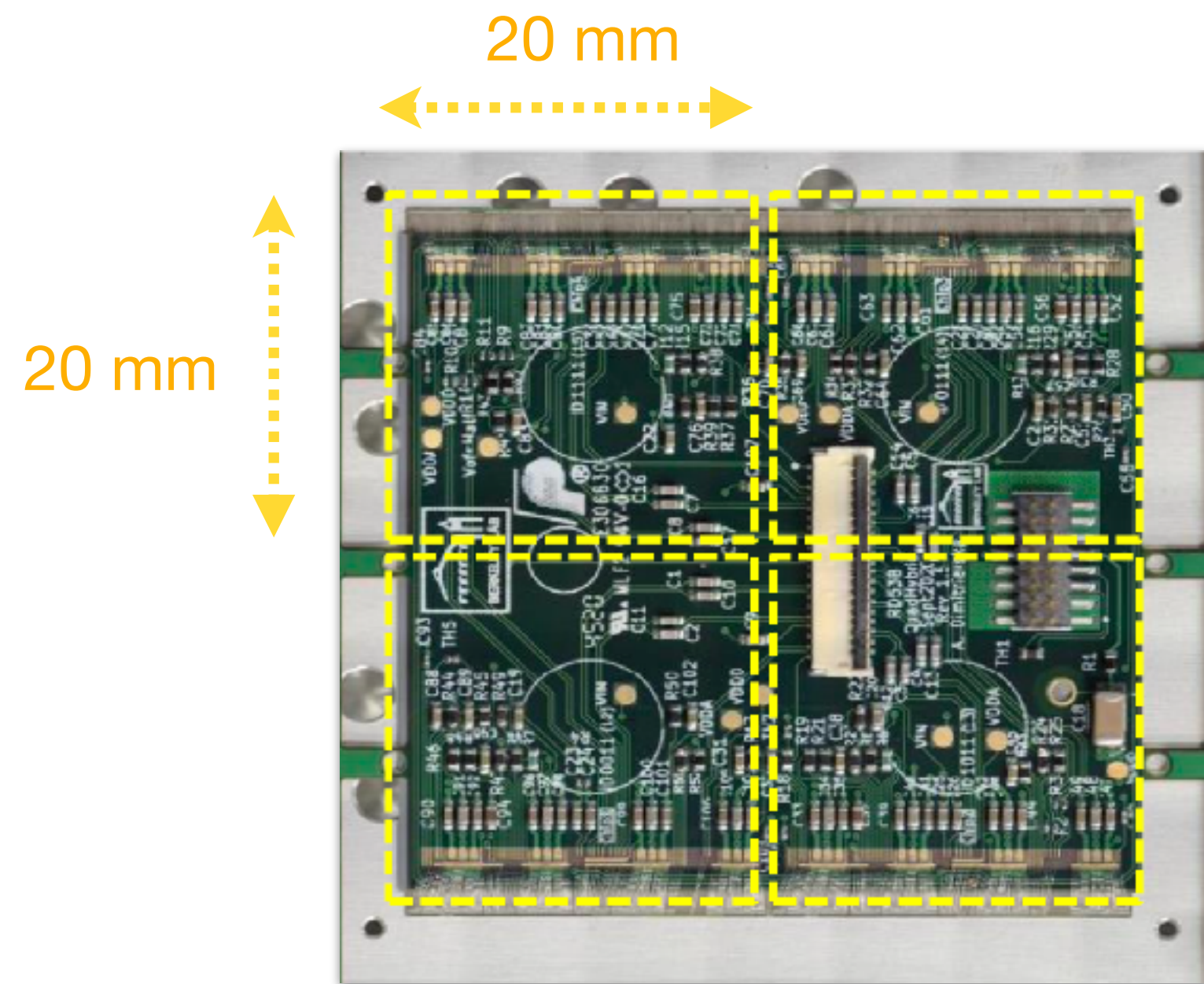
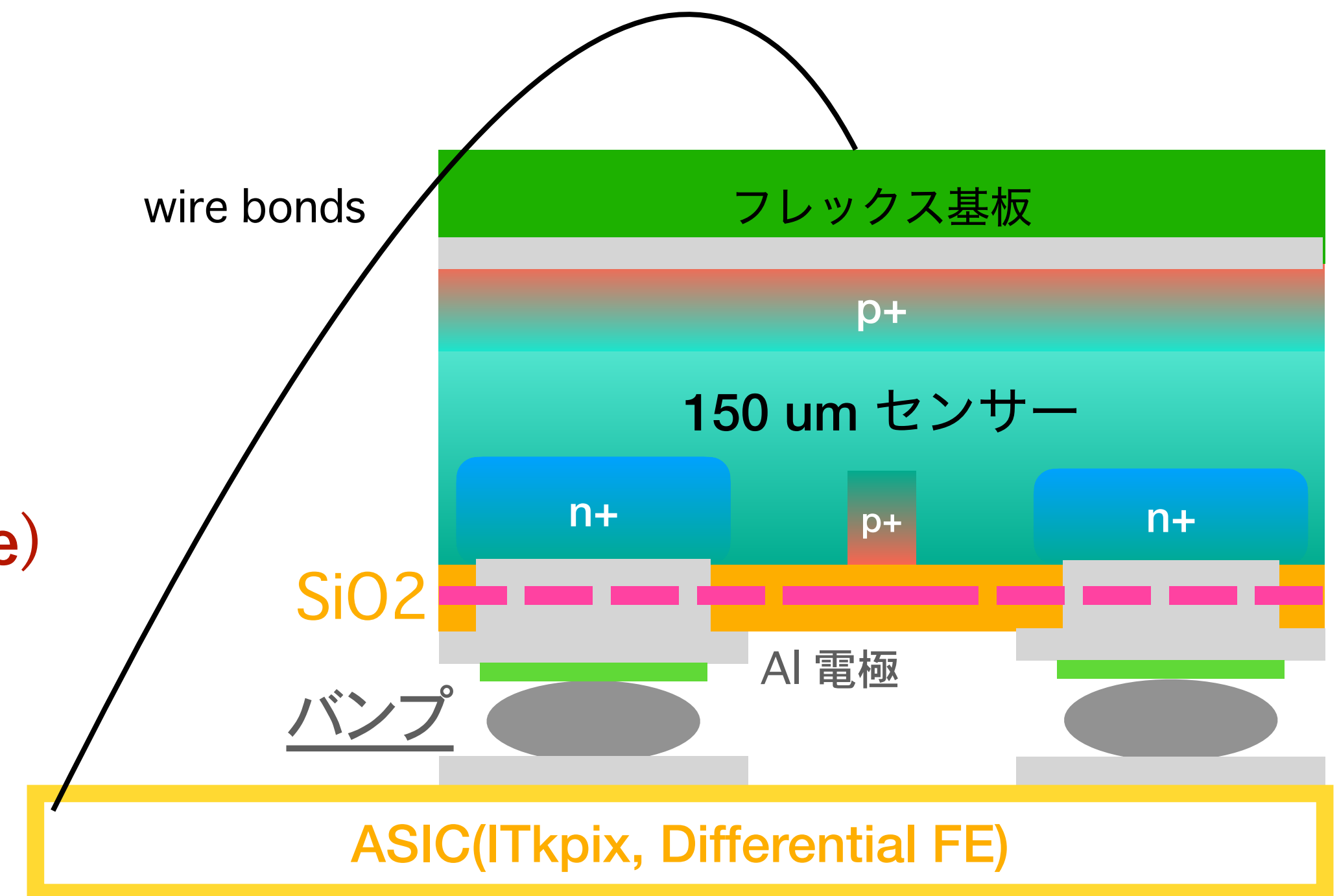


高放射線耐性の ITk が HL-LHC に必須！

新型ピクセル内部飛跡検出器

▶ ITkpix (差動動作型信号読出し回路)

- 1枚のセンサーに**4枚の ITkpix がフリップチップ(Quad module)**
- ITkpixはセンサー電極と bumps (金属球) で接合
- センサーからの信号をデジタル信号に変換



ITkpix v1.0 Quad モジュール

- 現在2つのプロトタイプバージョンが存在
- **ITkpix v1.0 Quadモジュール**
 - 実機と同サイズのセンサーとASICを持つ初めてのモジュール
 - デジタル回路に軽微なバグを持つ
- **ITkpix v1.1 Quadモジュール**
 - 上記のバグを修正したバージョン

ITkpix の特徴

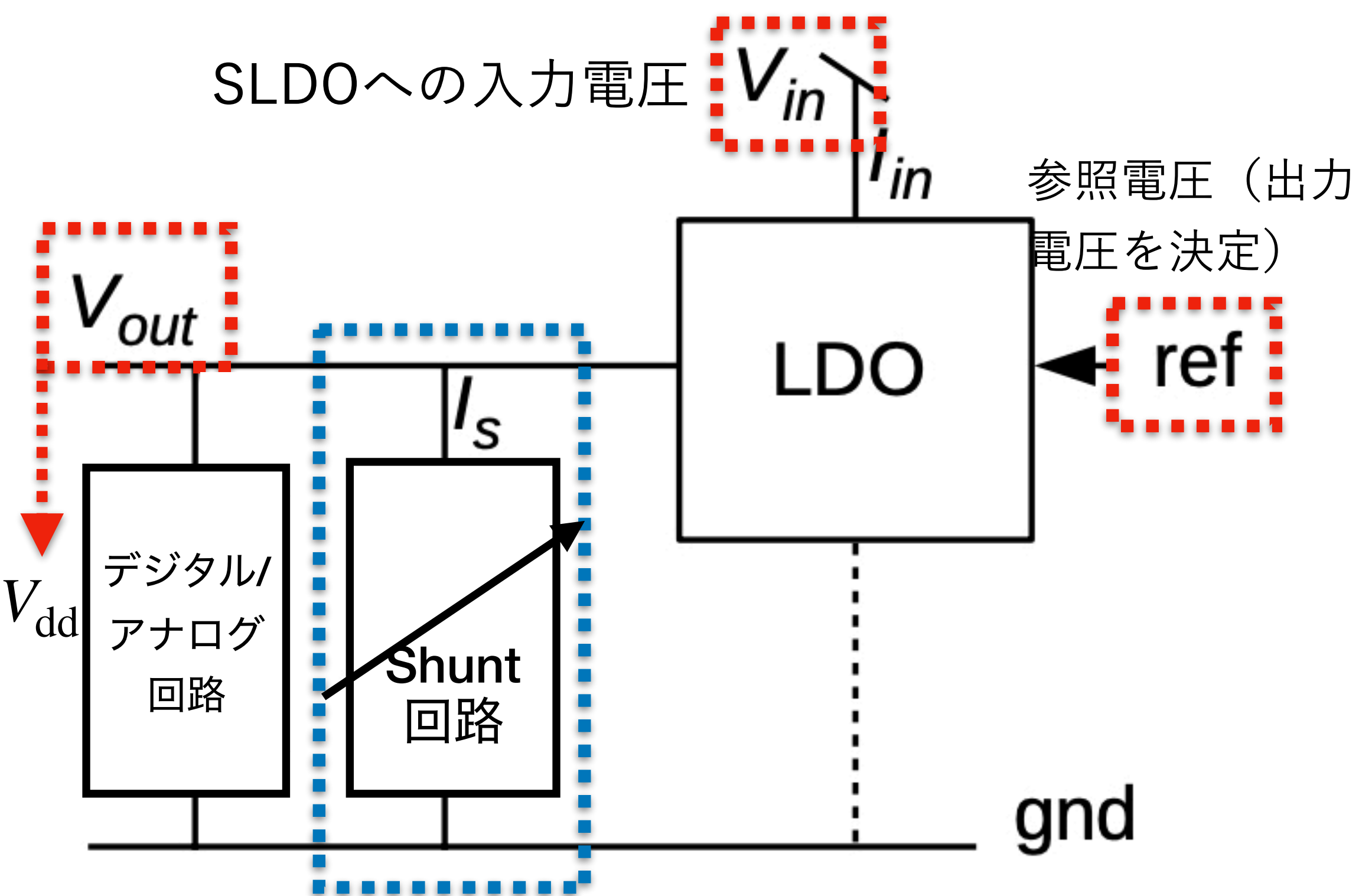
電源機構

- ▶ モジュールへ常に安定した電力が供給される必要

➔ Shunt Low Drop Output regulator (SLDO)

- 回路へ流れる電流・電圧を一定にする機構
- アナログ & デジタル回路ごとに搭載

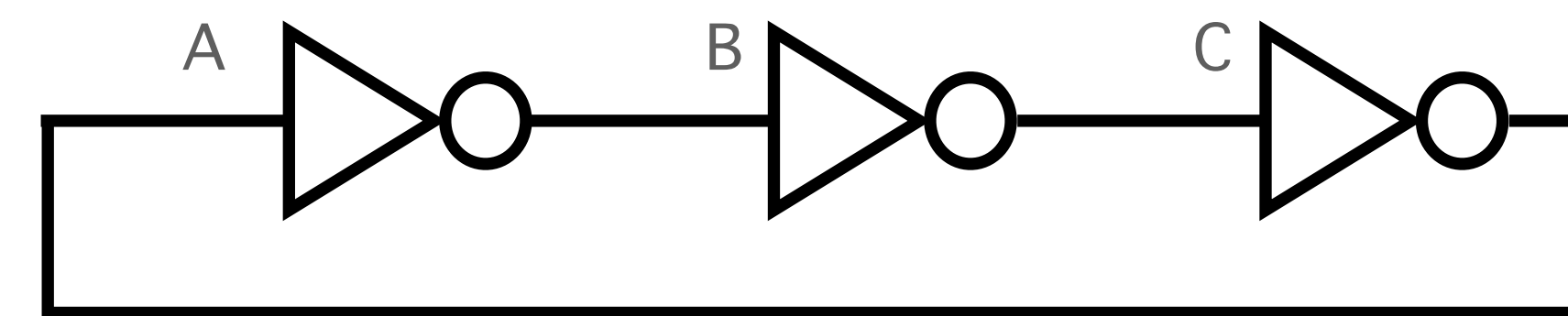
ドレイン電圧 V_{dd}



リングオシレータ

- ▶ 特定の周波数を発する発振回路
 - 論理回路を奇数個ループ状に連結：遅延時間により発振
- 照射量の蓄積に従いMOSFETが遅延し，周波数が低下する性質

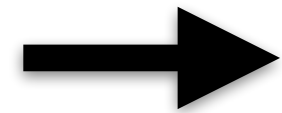
➔ 論理回路の寿命を示す間接的な目安として有用



3-inverter Ring Oscillator

本研究の目的

- ▶ ITkpix v1.0 & v1.1 Quadモジュールにおいて,
 1. SLDO (V_{dd} , V_{in} , V_{ref}) が, 放射線照射中であっても安定した電力供給を行いうるか?
 2. リングオシレータ周波数: 蓄積照射量の間接的な指標となりうるか?



**Cyclotron and Radiolotope Center(CYRIC, 東北大学)にて,
70 MeV陽子線照射環境下での作動試験を
2021年12月(v1.0), 2022年3月(v1.1)の計2回実施**

陽子線照射環境下での v1.0 モジュール作動試験

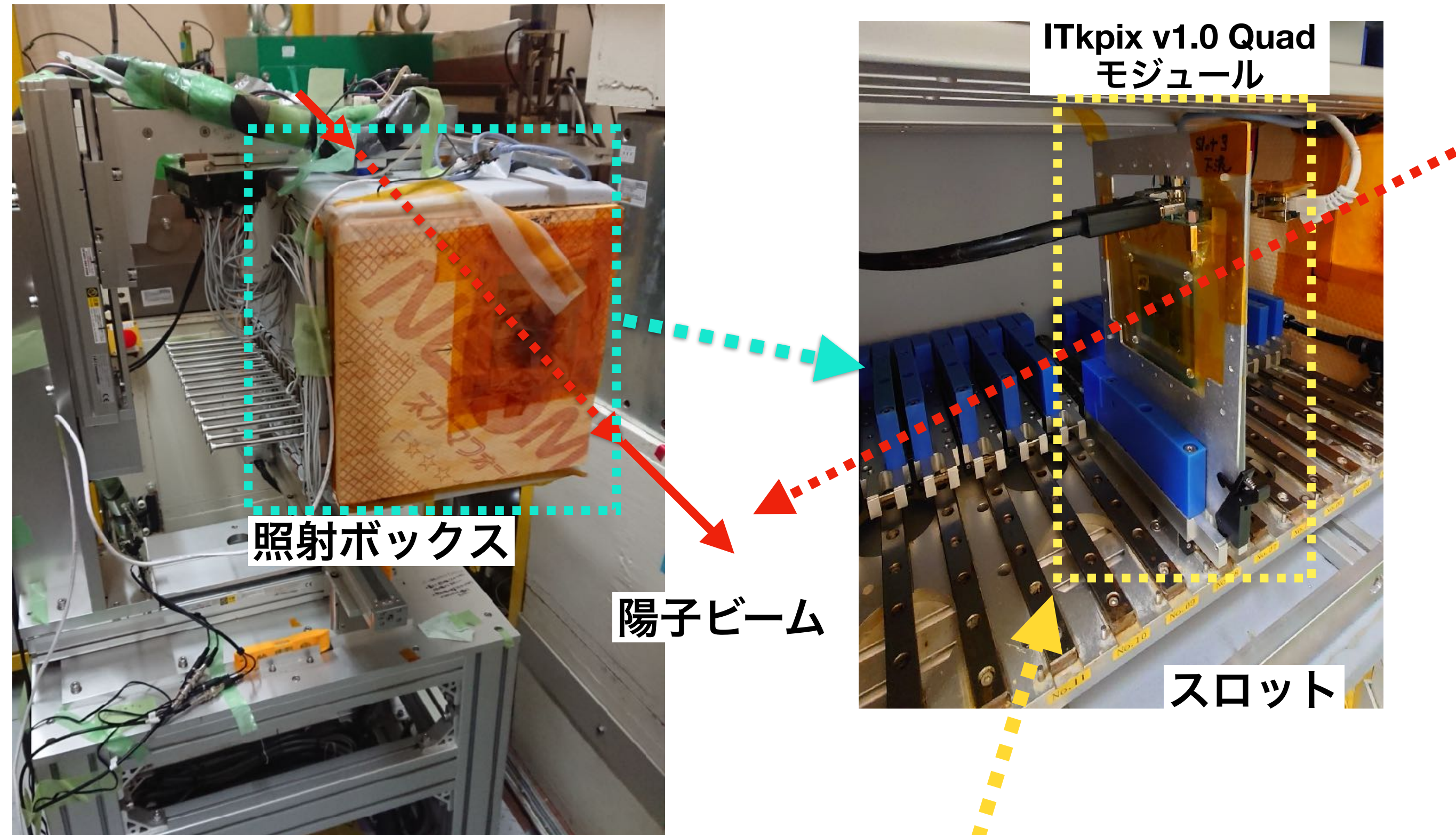
▶ 1 uA / 70 MeV陽子ビームを，ITkで想定されるTID 5.0 MGyに相当する $\sim 6.3 \times 10^{15} n_{eq}/cm^2$ まで照射

▶ 照射ボックス内部のスロットにモジュールを固定して照射を実施

- 照射量の一様性を担保するため照射ボックスを動かしながら照射

▶ 電源投入時，モジュールは $\sim 10 W$ ほど発熱

- Raspberry Pi制御による窒素ガスを用いた冷却システムを導入

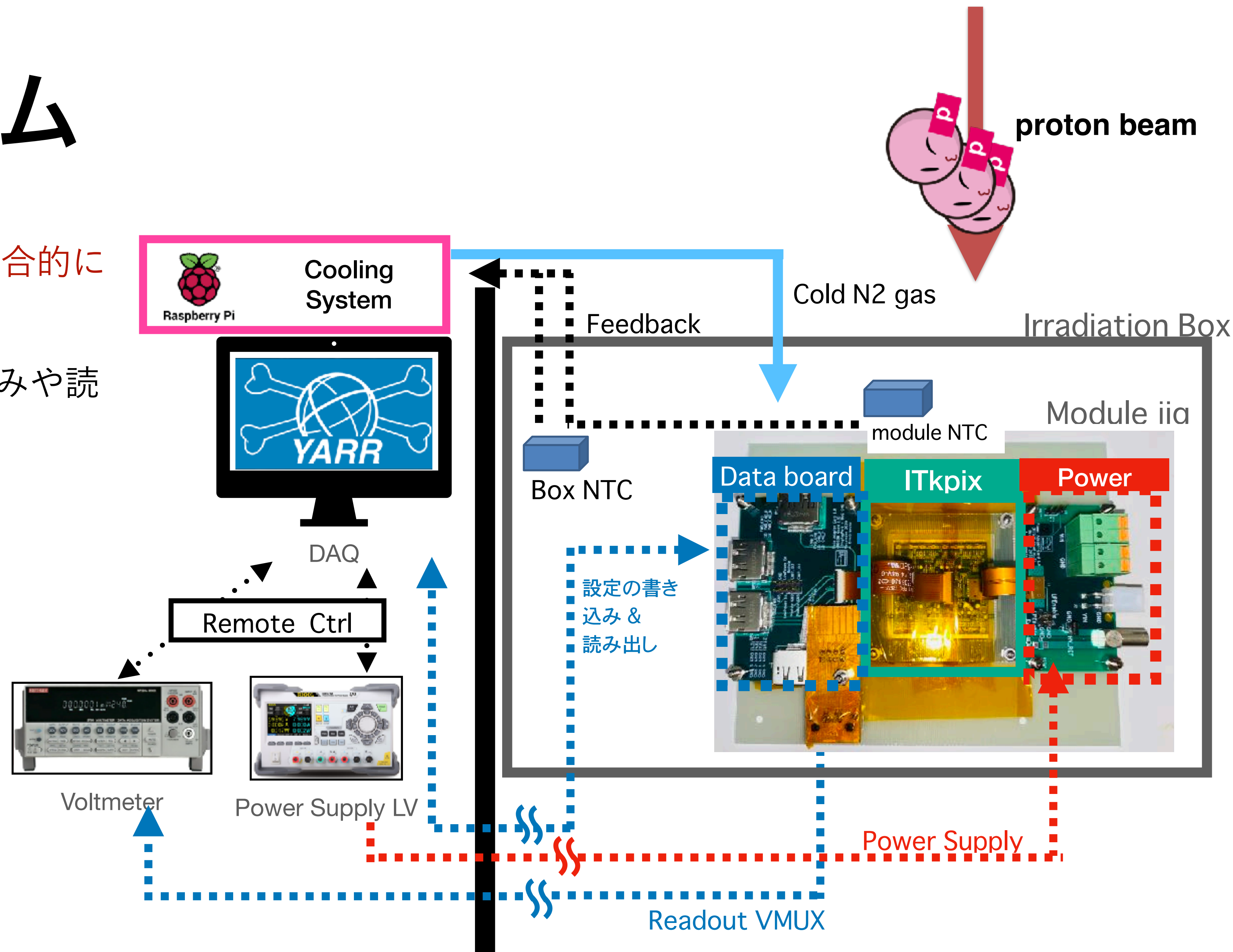


ボックス内部のスロットに
ピクセルモジュールを固定

データ収集システム

▶ 電源と電圧計: DAQプログラムによって統合的に操作し, 測定データを収集

- モジュールへの設定ファイルの書き込みや読出しを全自動で実行



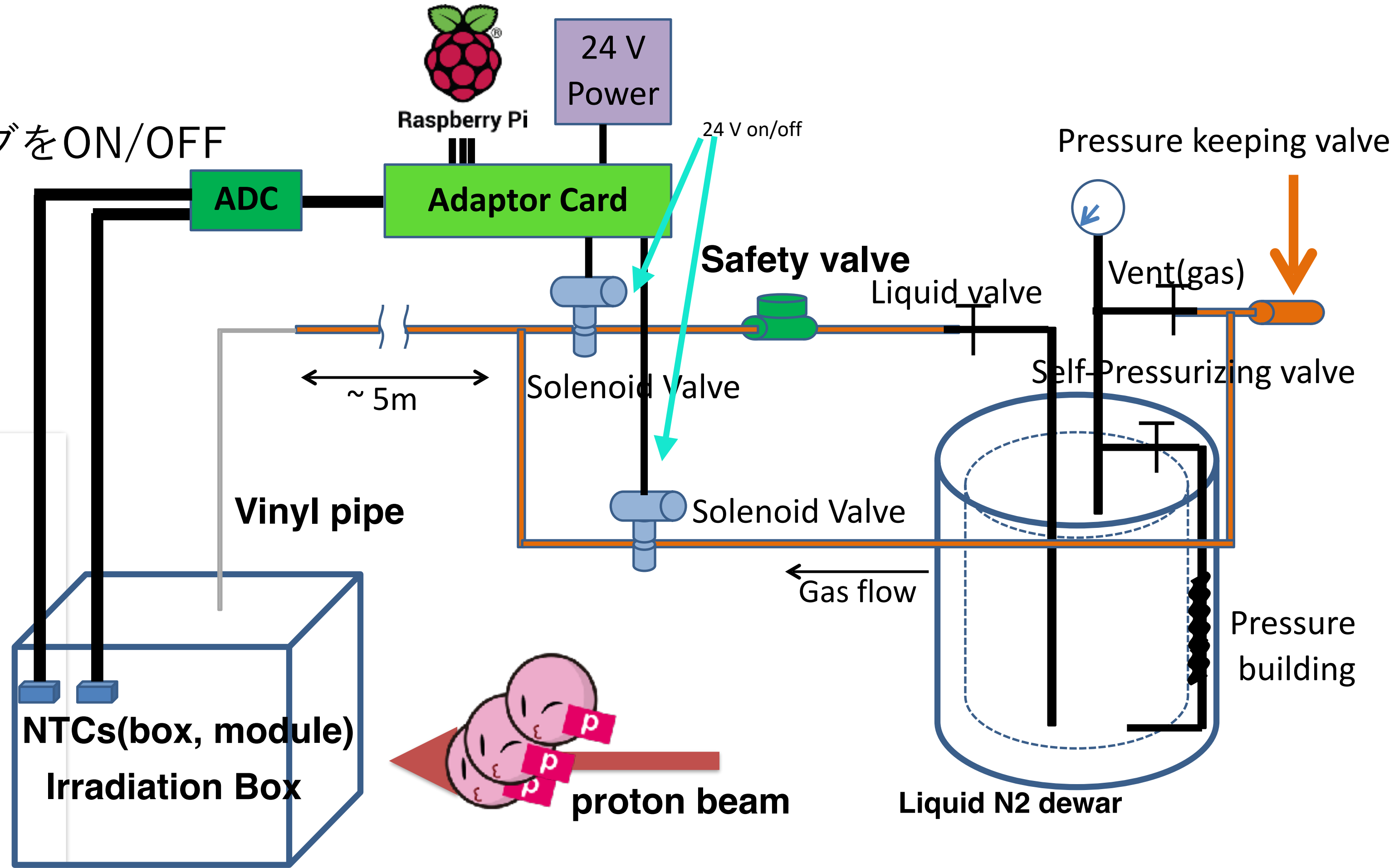
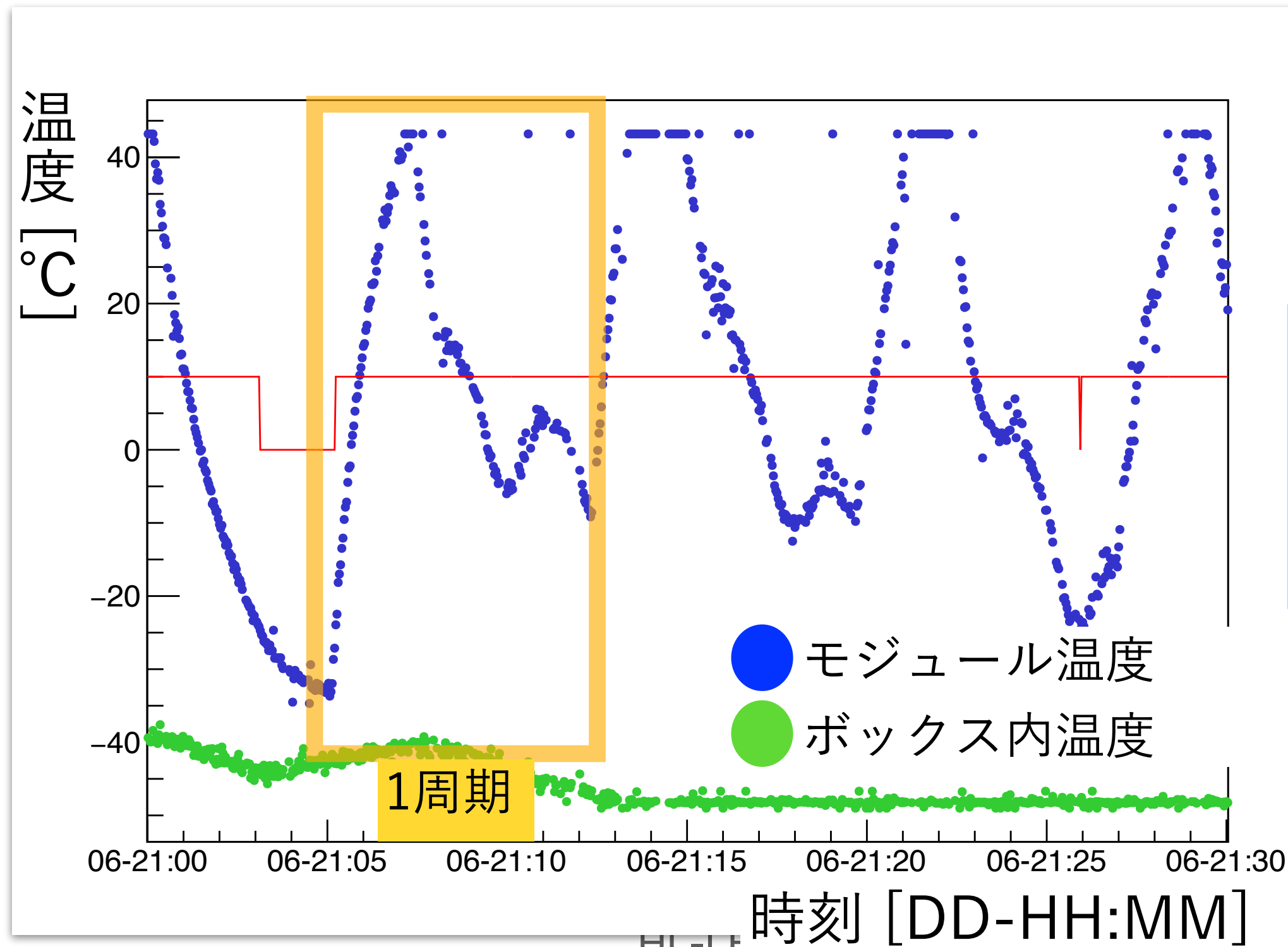
冷却システム

▶ 窒素ガスによる冷却システム

- モジュール温度をフィードバックしてバルブをON/OFF

➔ 冷却が不十分と判明

- 電源投入後，2分程度で40°C以上に到達
- 測定時以外は5分間冷却で対処



v1.0モジュール: ASIC電圧のモニター

▶ 瞬間的な電圧低下が測定点全体の **5%** ほどで見られた

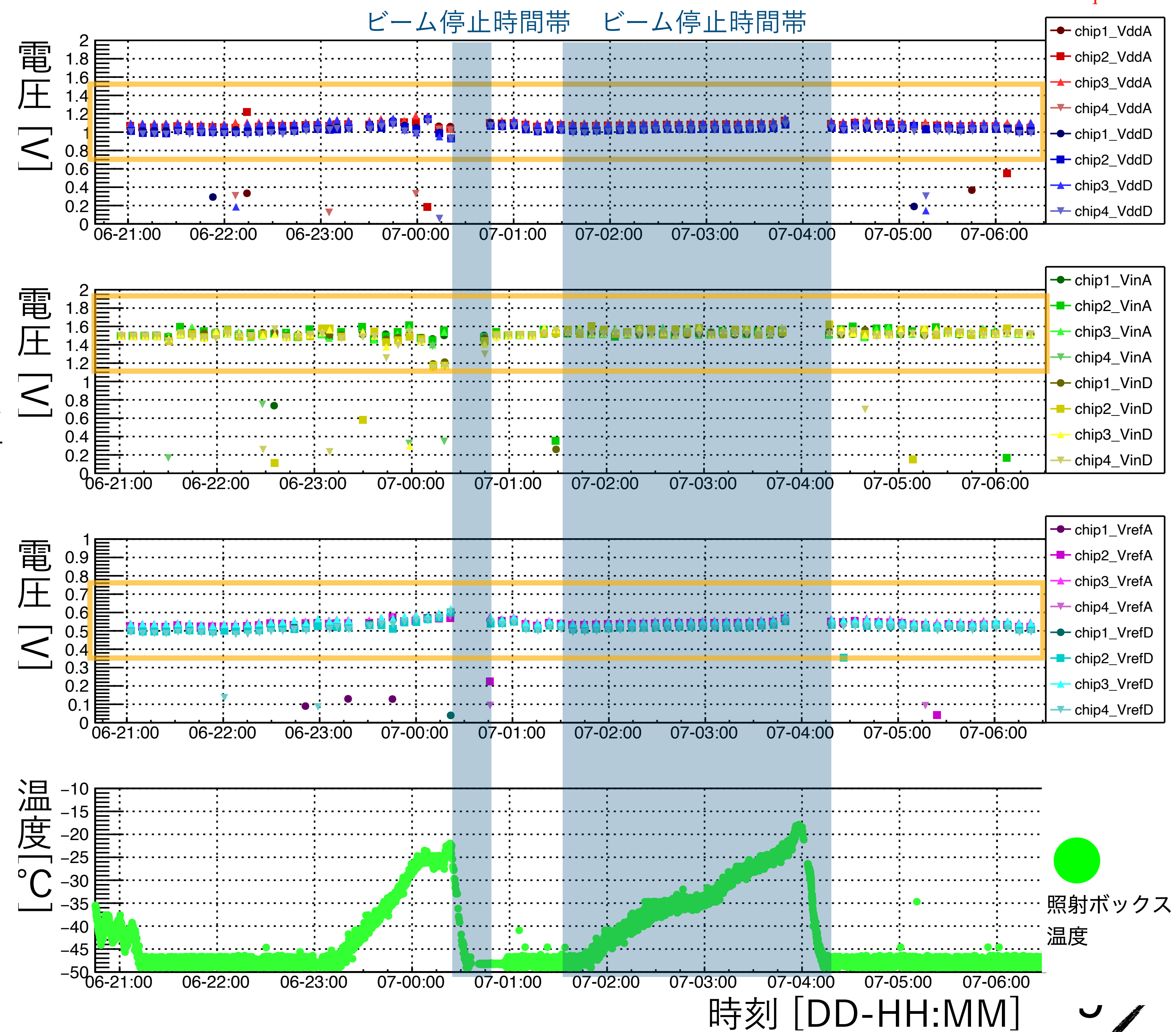
1. ビームタイムのみ発現
2. タイミングがランダム

➡ Single Event Effectにより電圧を読み出せず

▶ 安定している部分に着目：

- ボックス内温度が安定しているとき，照射中の電圧変化は最大でも2%以下

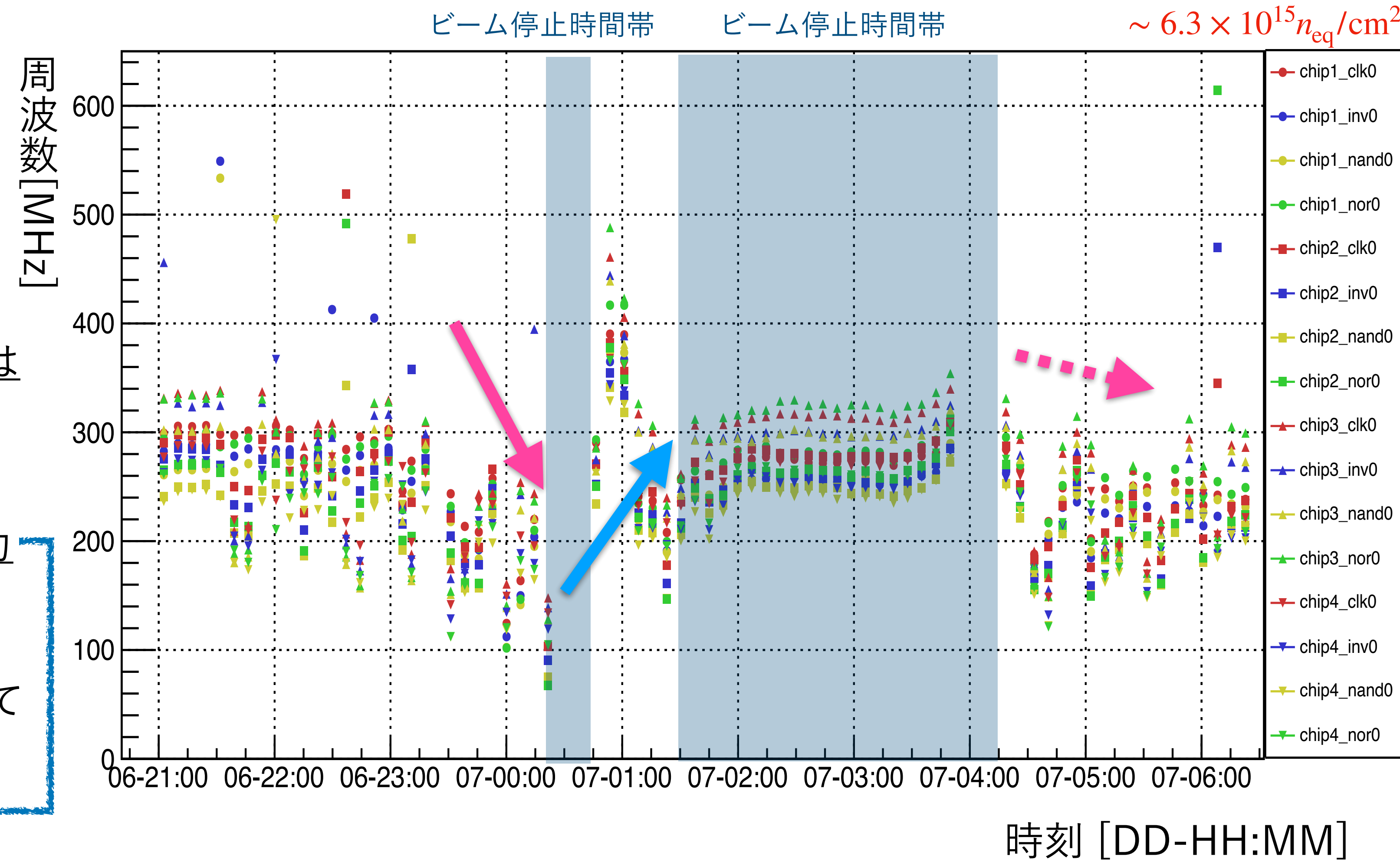
➡ 照射中においても安定した電力供給がなされることを確認



v1.0モジュール: リングオシレータ周波数のモニター

- ▶ 4種類のリングオシレータをプロット
 - 周波数 \propto ドレイン電圧: 補正
- ▶ 照射時: 周波数は減少するものの、照射停止後に回復する傾向
 - 照射全体を通して継続的な周波数低下は見られず

考えられる原因: 冷却システムの冷却能力測定時に高温下に曝したことでアニーリングが進み、放射線損傷が回復してしまった可能性

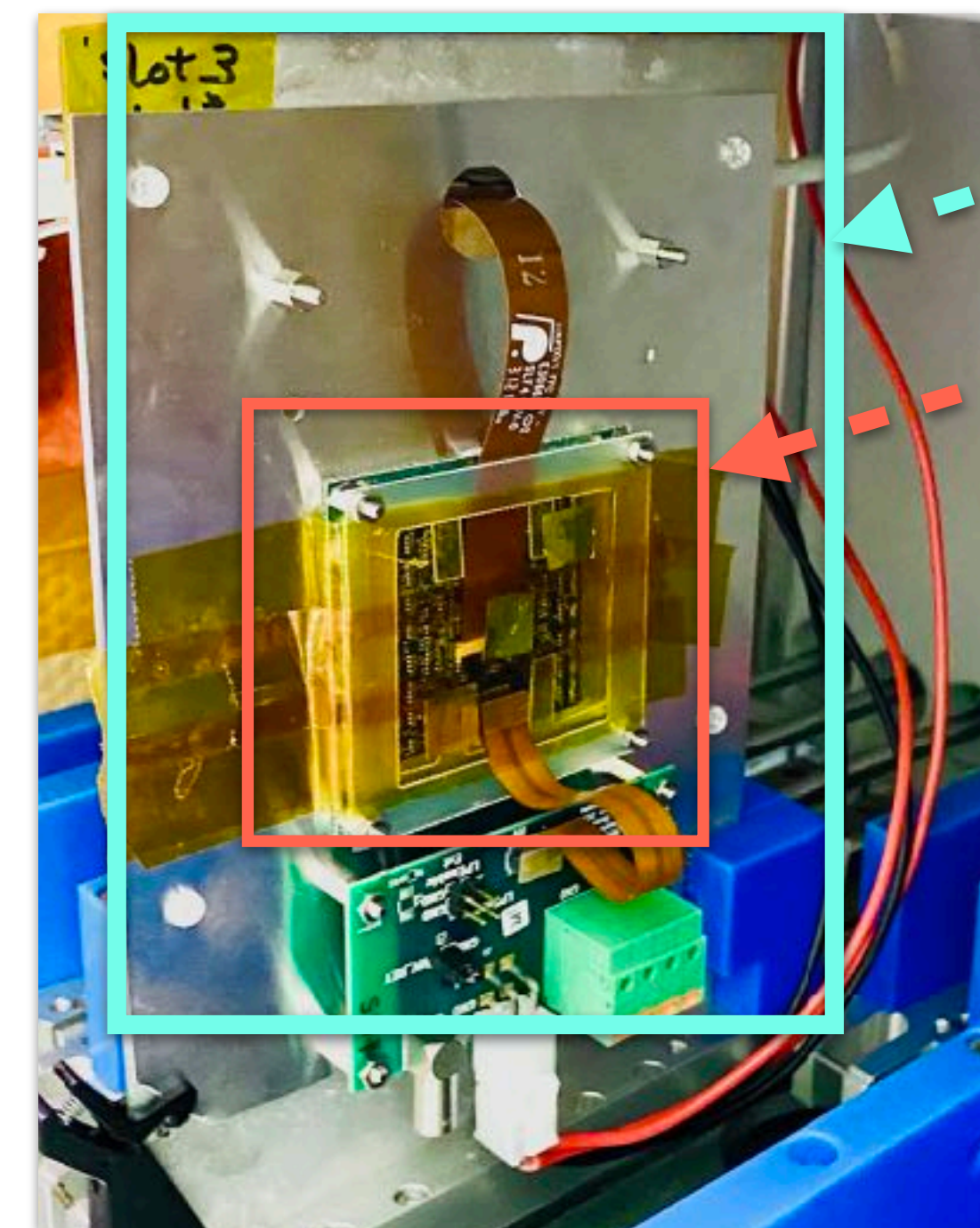
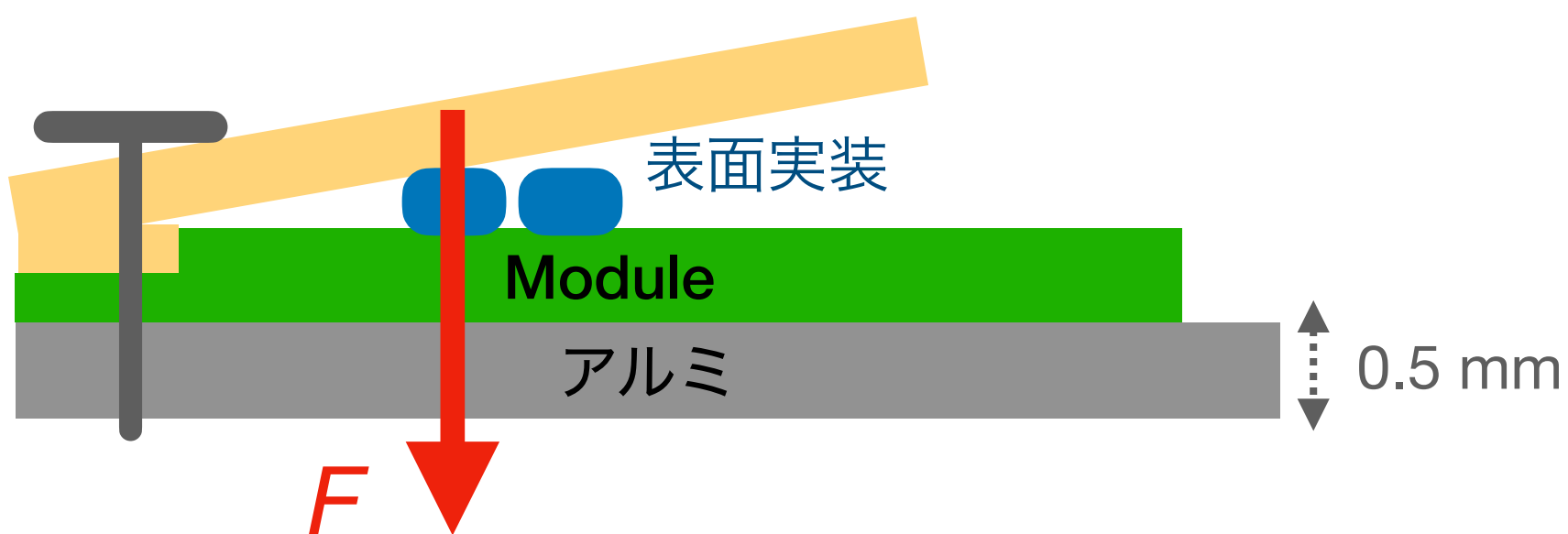


➔ v1.1 モジュールの照射試験に向けて、冷却システムを改良

v1.1モジュール作動試験に向けた冷却システムの改良

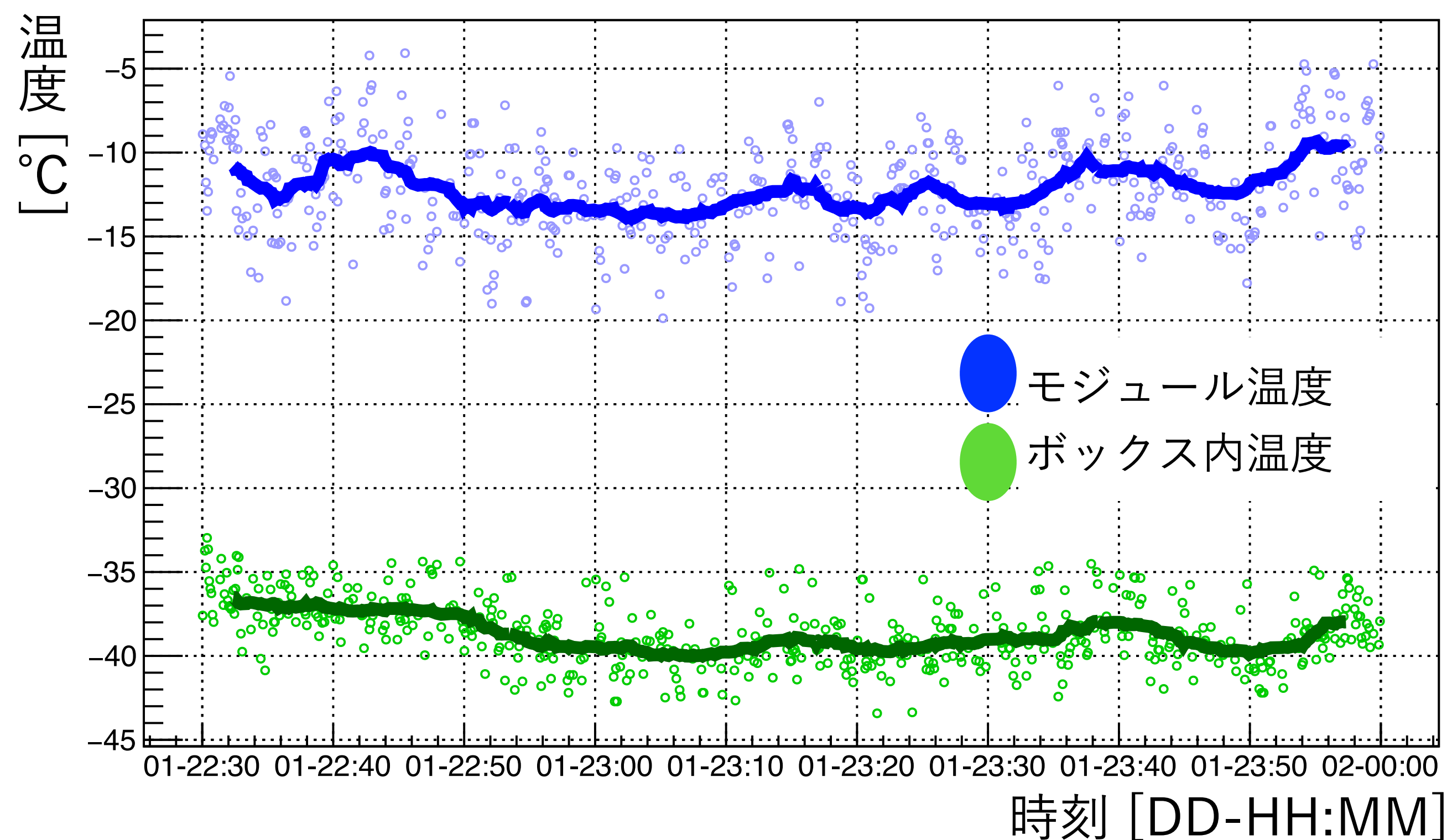
▶ 0.5 mm厚の高純度アルミ (A1050) 治具にv1.1モジュールを密着固定

- 窒素ガスに接する表面積を増やし, 冷却促進を期待



0.5 mm厚アルミ治具

v1.1 モジュール



電源投入時,

-15°C ~ -10°Cの範囲で安定冷却されることを確認

v1.1照射試験をこの温度環境下で実施

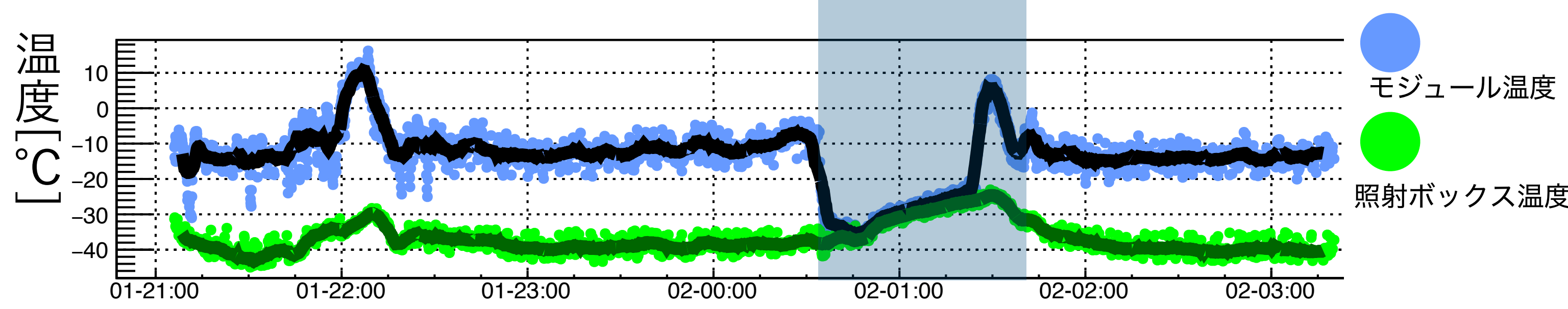
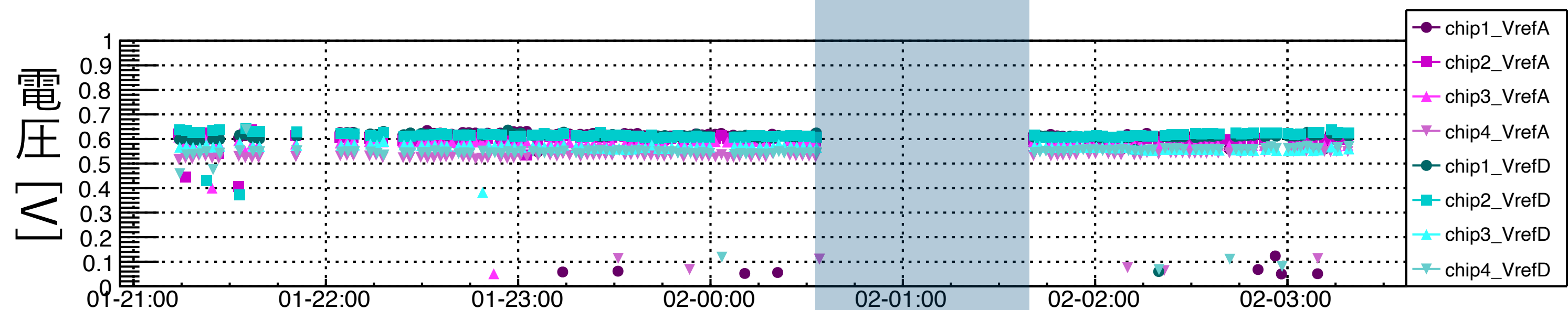
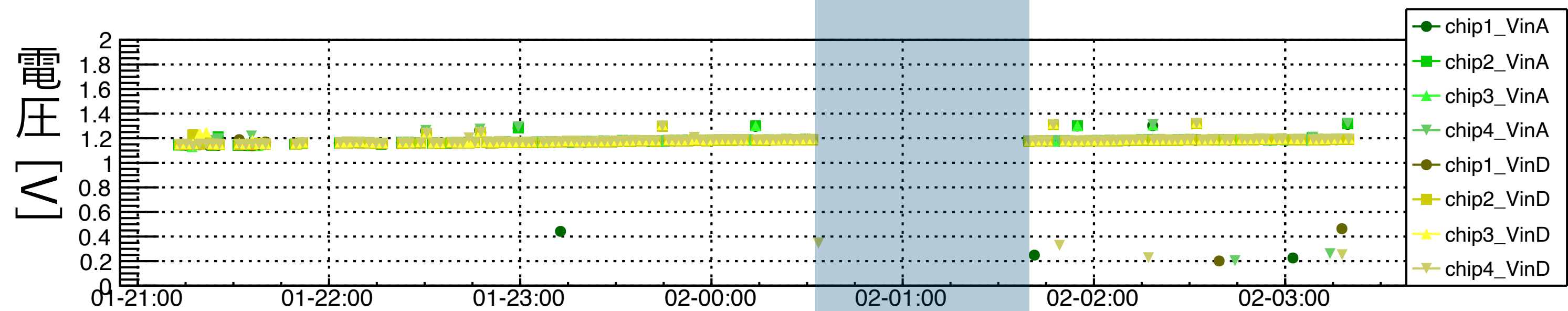
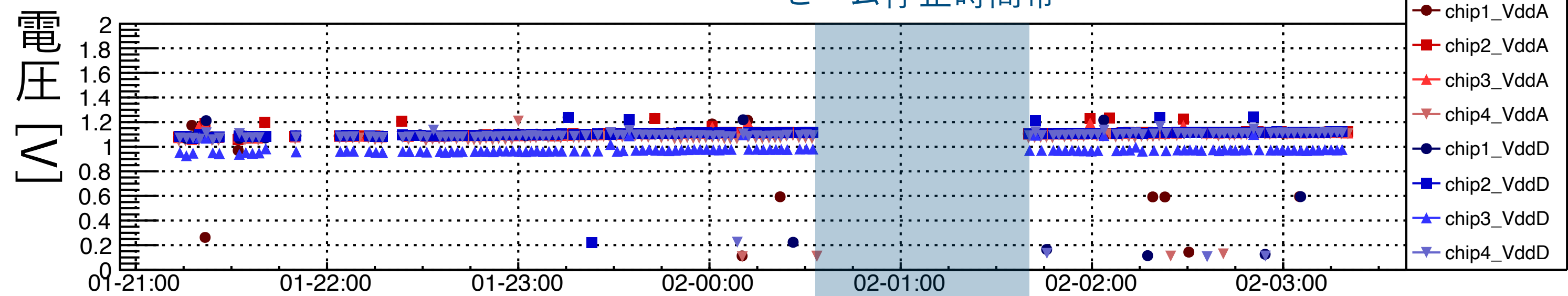
v1.1 : ASIC電圧のモニター

▶ 電圧の安定性

- 照射の進行に伴いVin, Vddが最大5%ほど増加する傾向
- チップ3のデジタル回路ドレイン電圧VddDのみ, 他チップVddDより10%ほど低く推移
- 照射中は定電流モードで電力供給
- チップごとのインピーダンスの違いが原因か

➡ 運転稼働には支障が無い程度の変化
であることを確認

ビーム停止時間帯



時刻 [DD-HH:MM] 12 / 14

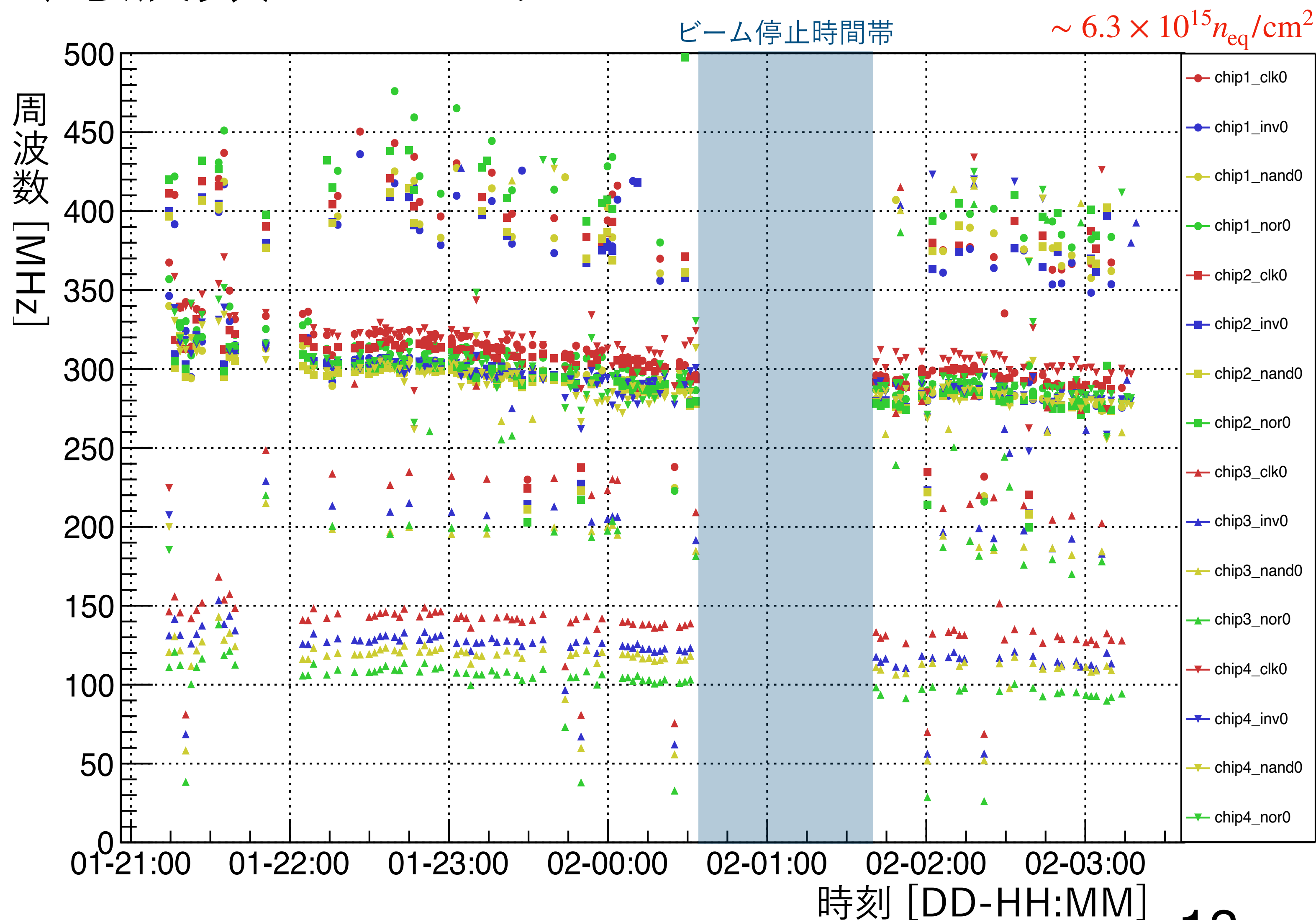
v1.1：リングオシレータ周波数のモニター

▶ 4種類のリングオシレータをプロット

- ドレイン電圧で補正
- チップ3のみ低い周波数：チップ3のVddDが他チップと比較して低いため

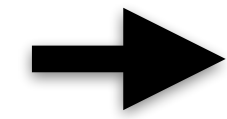
▶ 照射量蓄積に応じ最大およそ50 MHz周波数が減少

モジュール冷却方法の改良により
照射量蓄積に伴うリングオシレータ
周波数減少を確認できた



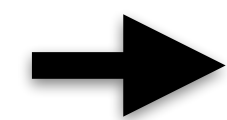
本研究のまとめ

- ▶ 2029年~HL-LHC ATLAS実験. 高放射線耐性ITkピクセル検出器の実装が予定
- ▶ 70 MeV 陽子線照射環境下でのITkpix v1.0 & v1.1 Quadモジュール作動試験
 - ASIC電圧：照射の進行に伴う，SLDO電圧値の著しい変化傾向は見られず



HL-LHCで想定される照射量を受けても，SLDO電力供給によるピクセルモジュールの稼働安定性に支障はない

- リングオシレータ
 - v1.0 モジュールの読み出し試験において 周波数が回復する傾向
 - 測定中高温下に曝したことによる アニーリング の影響
 - 冷却システムを改良した v1.1 モジュール照射試験
 - 周波数の減少傾向を確認



論理回路の寿命を評価する指標として有用である可能性を示唆

BackUp

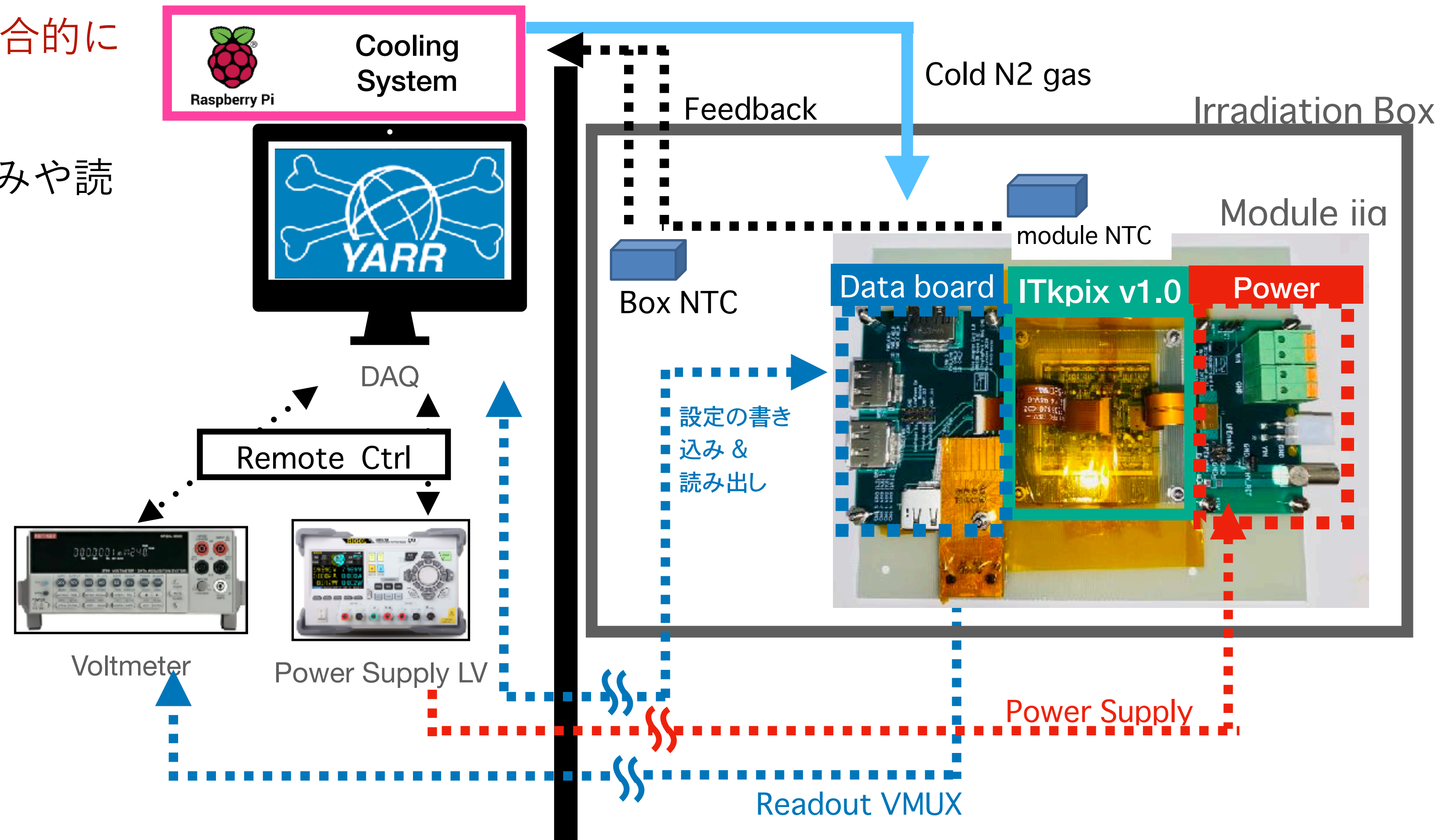
データ収集システム

▶ 電源と電圧計: DAQプログラムによって統合的に操作し, 測定データを収集

- モジュールへの設定ファイルの書き込みや読み出しを全自動で実行

▶ 電力供給中, モジュールは発熱

- Raspberry Piを用いた新たな冷却システムを構築



70 MeV陽子線照射環境下での照射試験 モチベーション

▶ **Shunt LDO**:対象回路に流入する電流・電圧を安定化させる回路機構

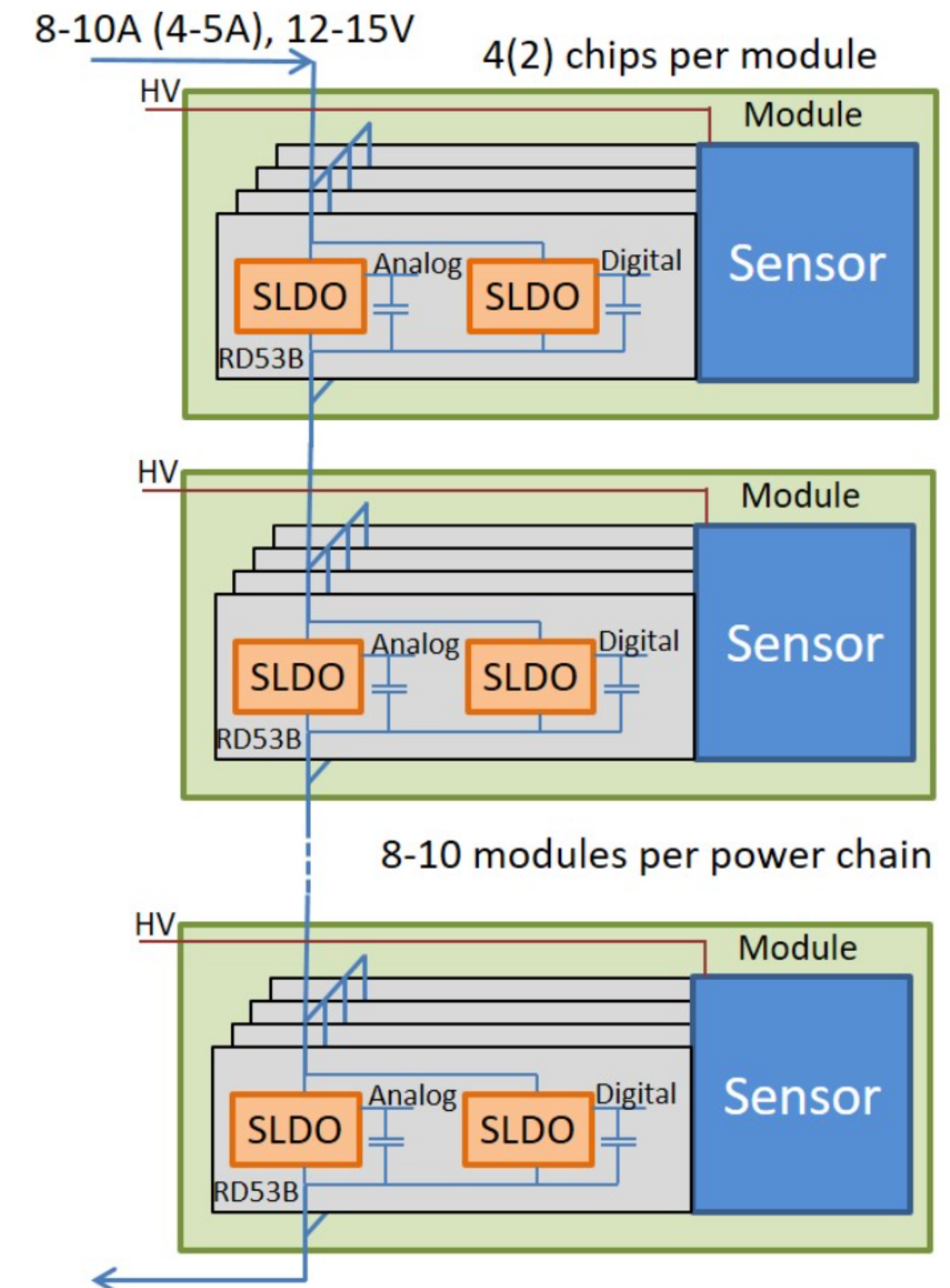
- シリアルパワーリング
- 物質量の低減

➡ 故障などを想定した設計

- デジタル・アナログ回路ごとに搭載

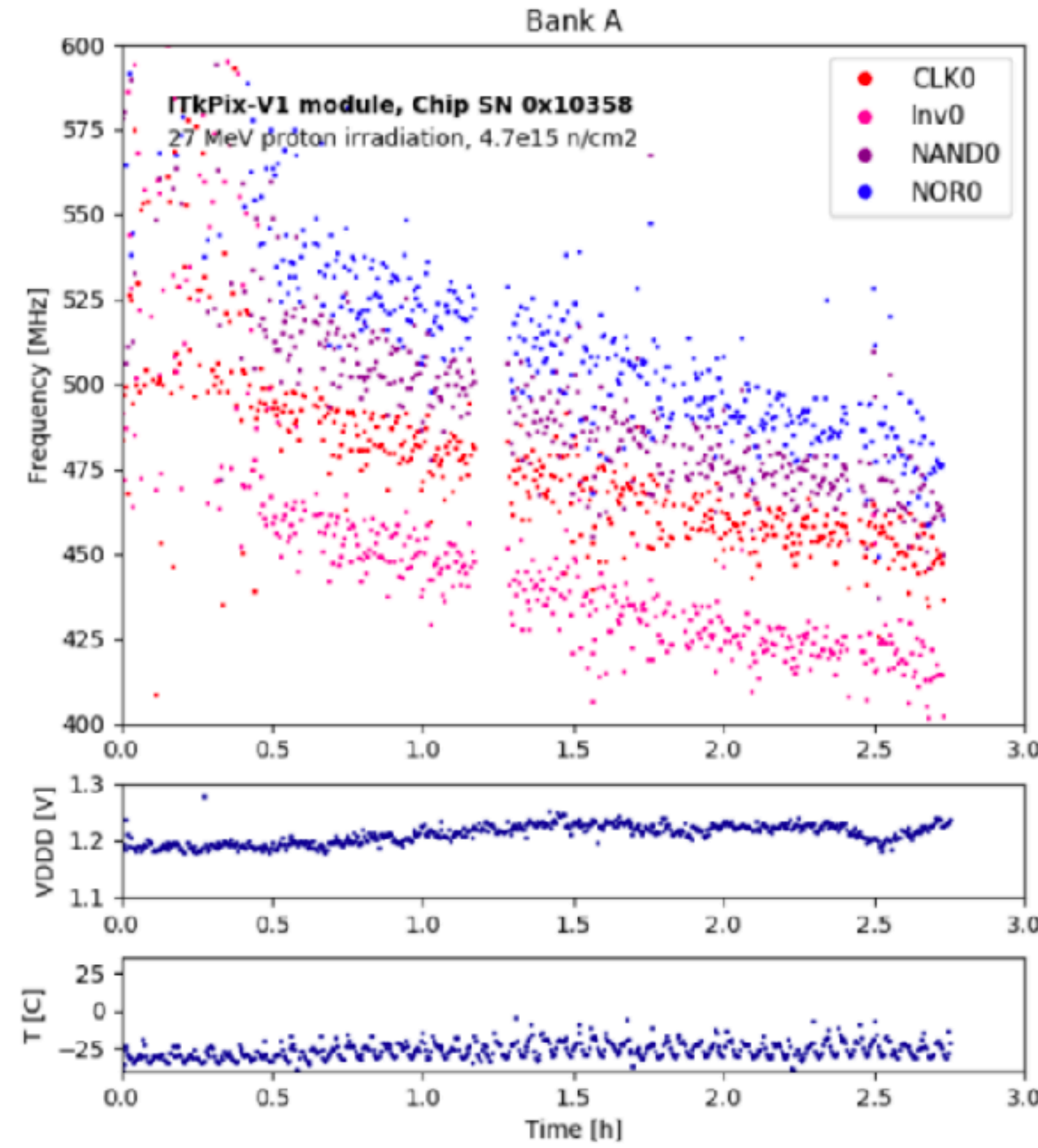
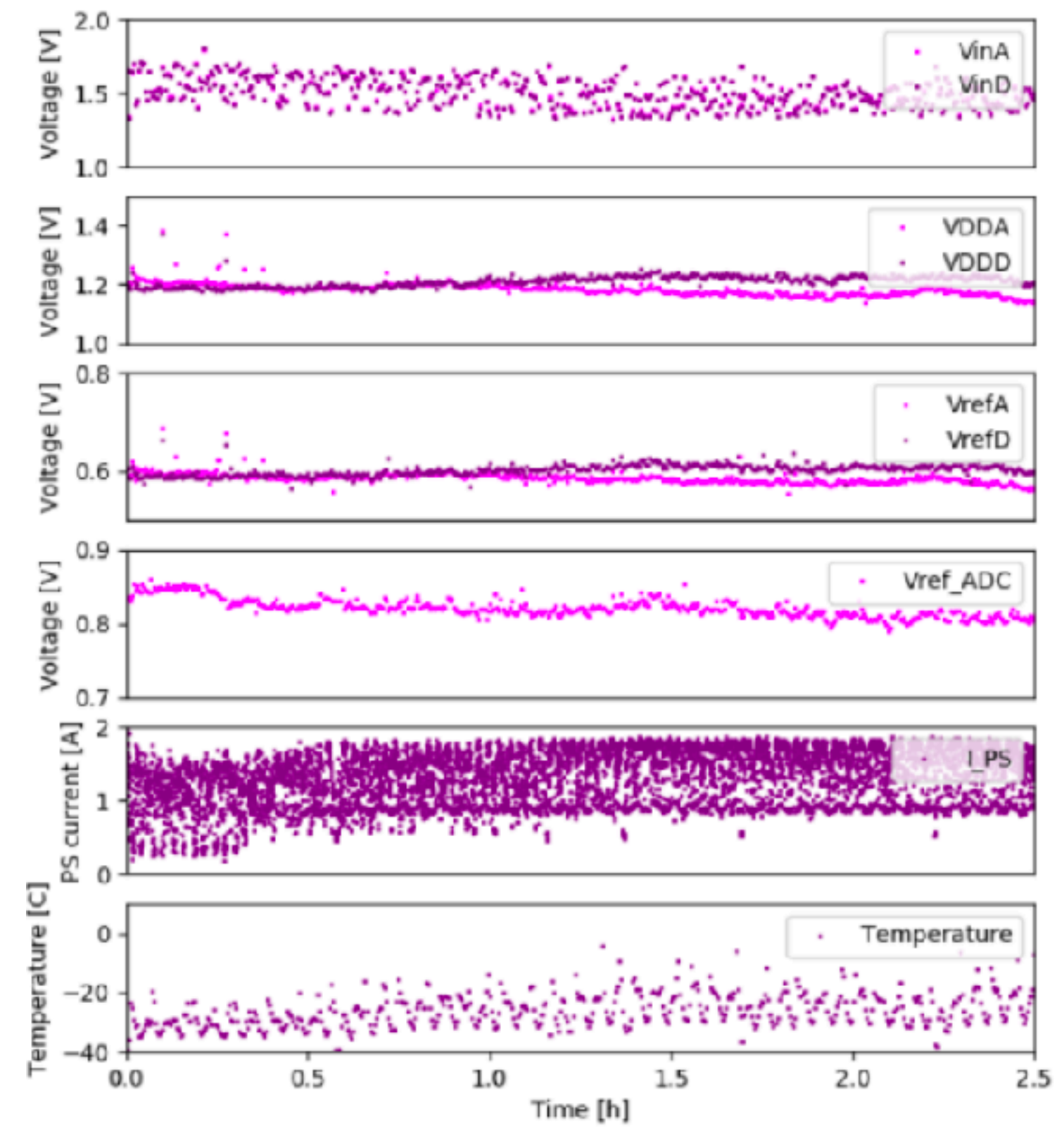
▶ 照射中は以下のSLDO電圧・ASIC電圧をモニター：

- VinA/D: Input voltage of A/D circuit,
- VrefA/D: Referential voltage of **Shunt LDO regulator**
- VddA/D: Drain voltage of MOSFET



Irradiation Test @Birmingham

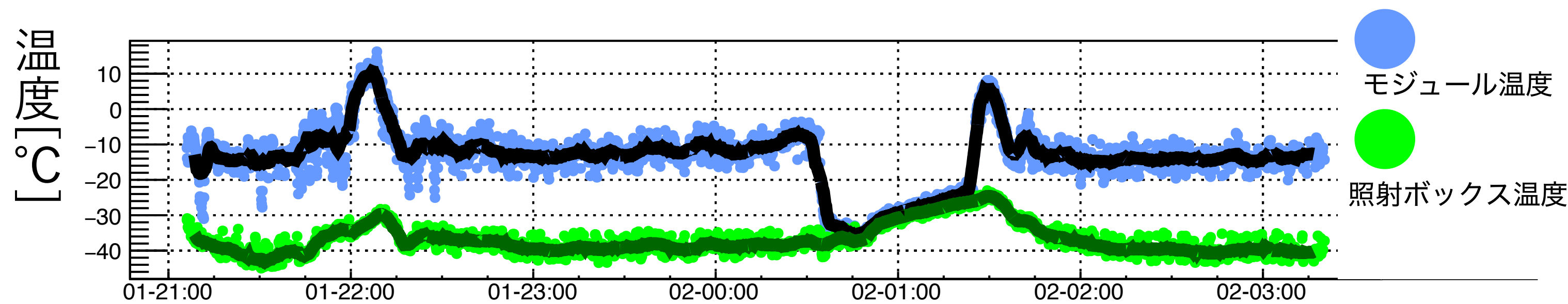
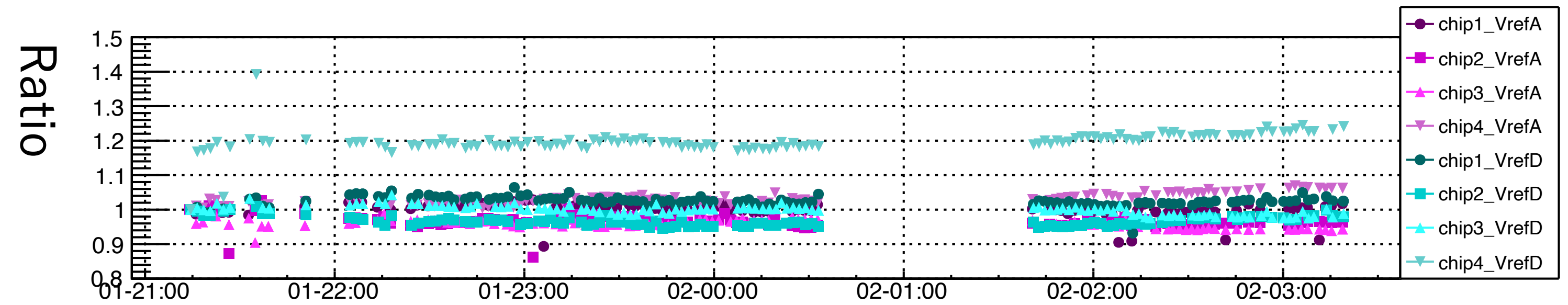
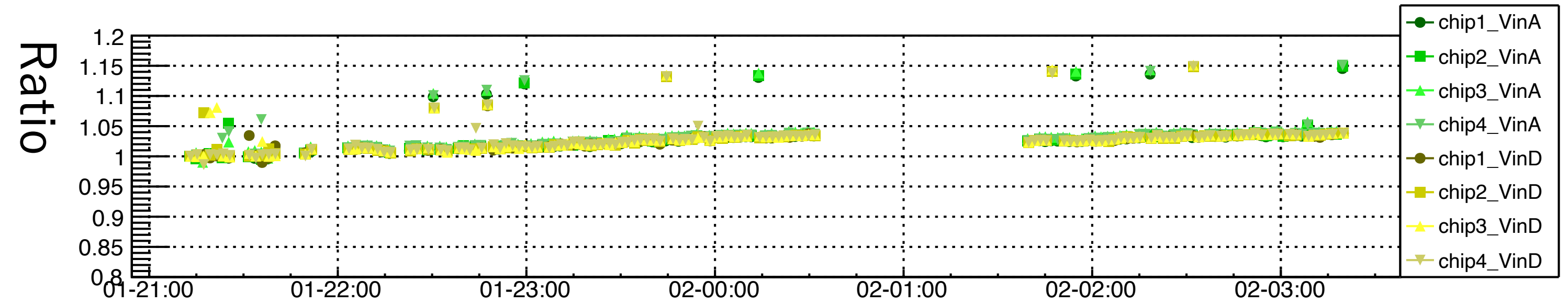
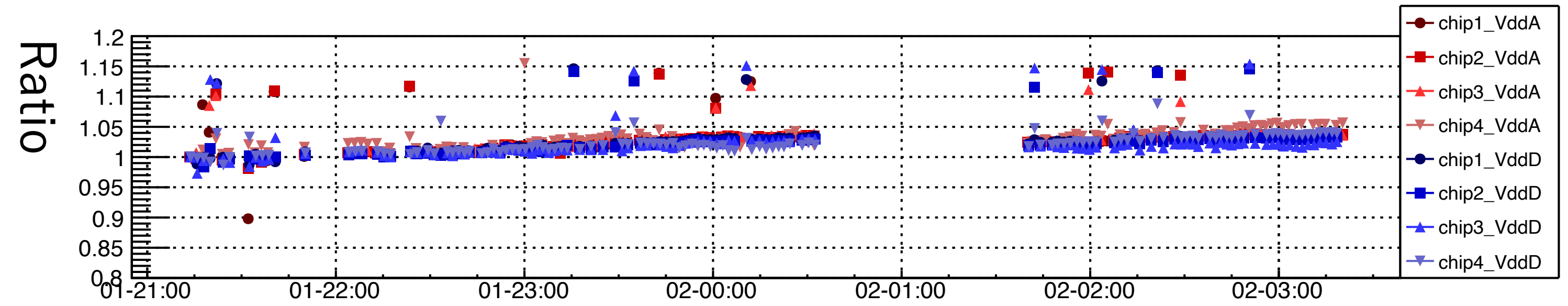
- ▶ ITkpix v1.0 Irradiation test with Single chip:@Birmingham 27 MeV 陽子線
- ~ $4.7 \times 10^{15} n_{eq}/cm^2$
- 500 Mradの照射で50 MHz減少



ITkpix v1.0 Single Chip Card irradiation @Birmingham(27 MeV proton), <https://indico.cern.ch/event/1073358/>

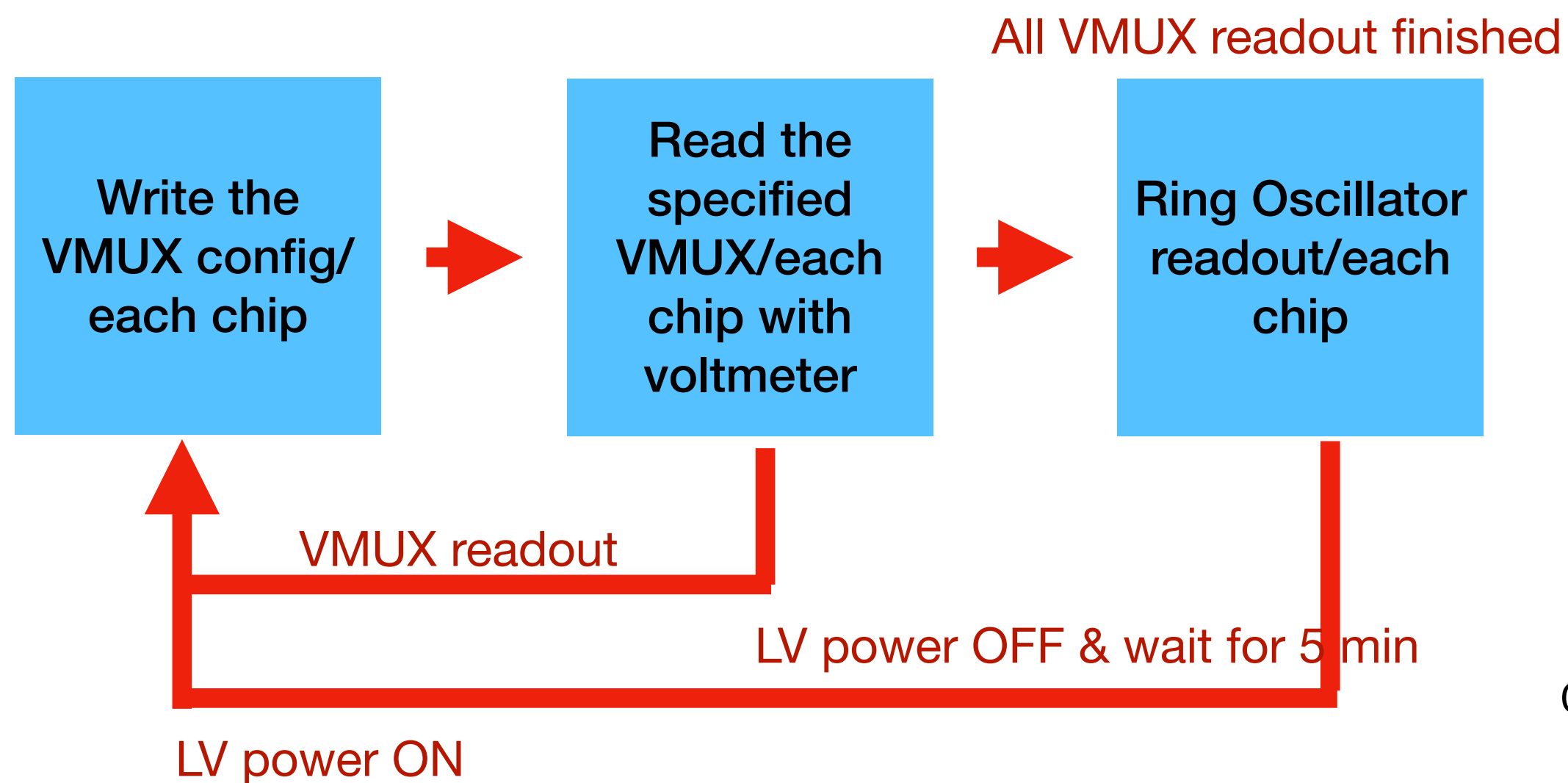
v1.1 : ASIC電圧のモニター

- ▶ 照射の進行に伴いVin, Vddが最大5%ほど増加する傾向
 - 最初の測定点を基準にして比を取った
 - Vref が変化していたため, これらも同様に变化した

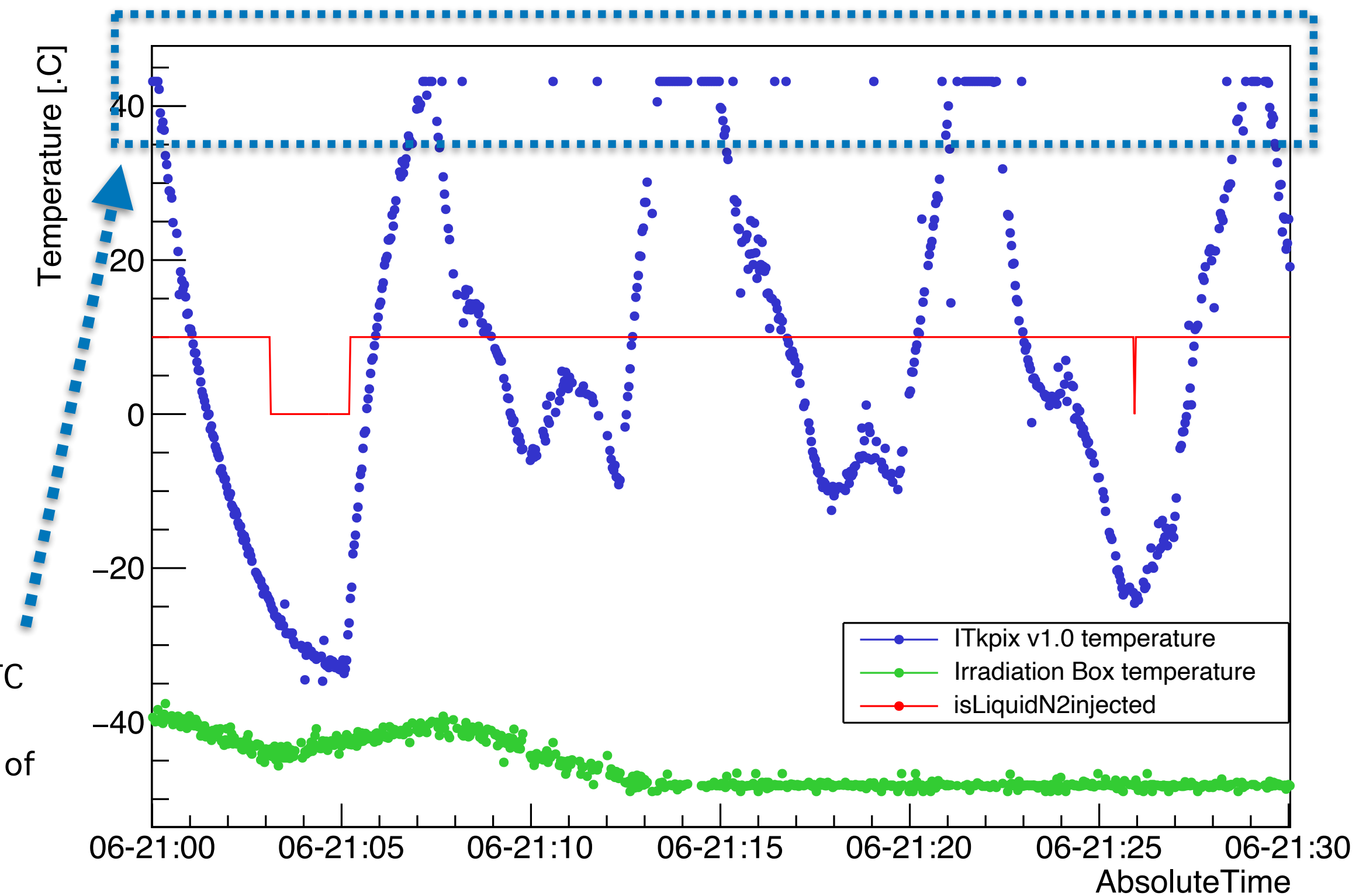


Experimental settings: DAQ cycle

- ▶ 電源を投入->モジュール温度が40 °C以上に上昇(過熱の危険)
 - 測定時 (~2分) のみ電源供給 + 5分間冷却で対処

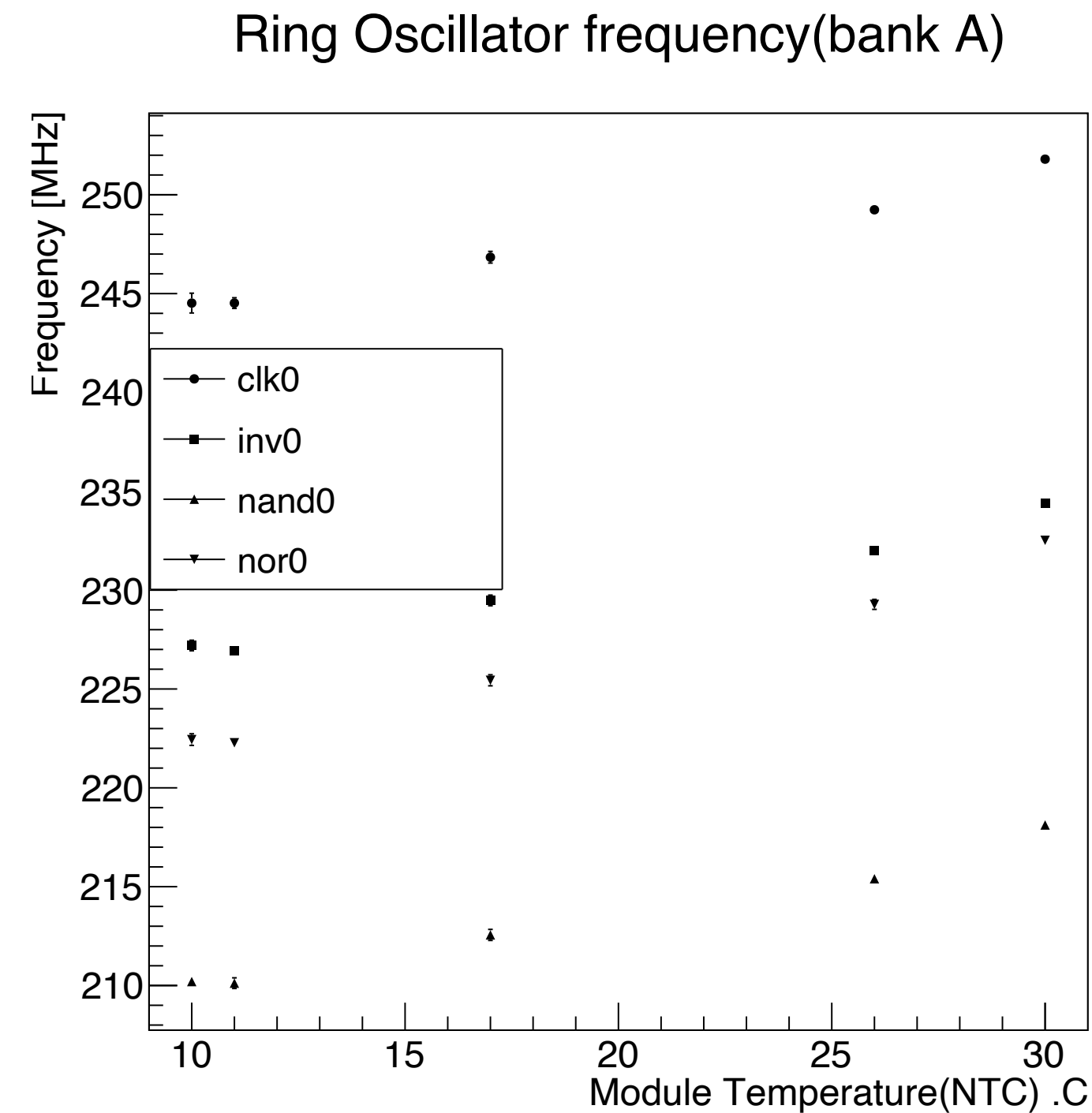


Cannot convert NTC voltage to the resistance because of the ADC board



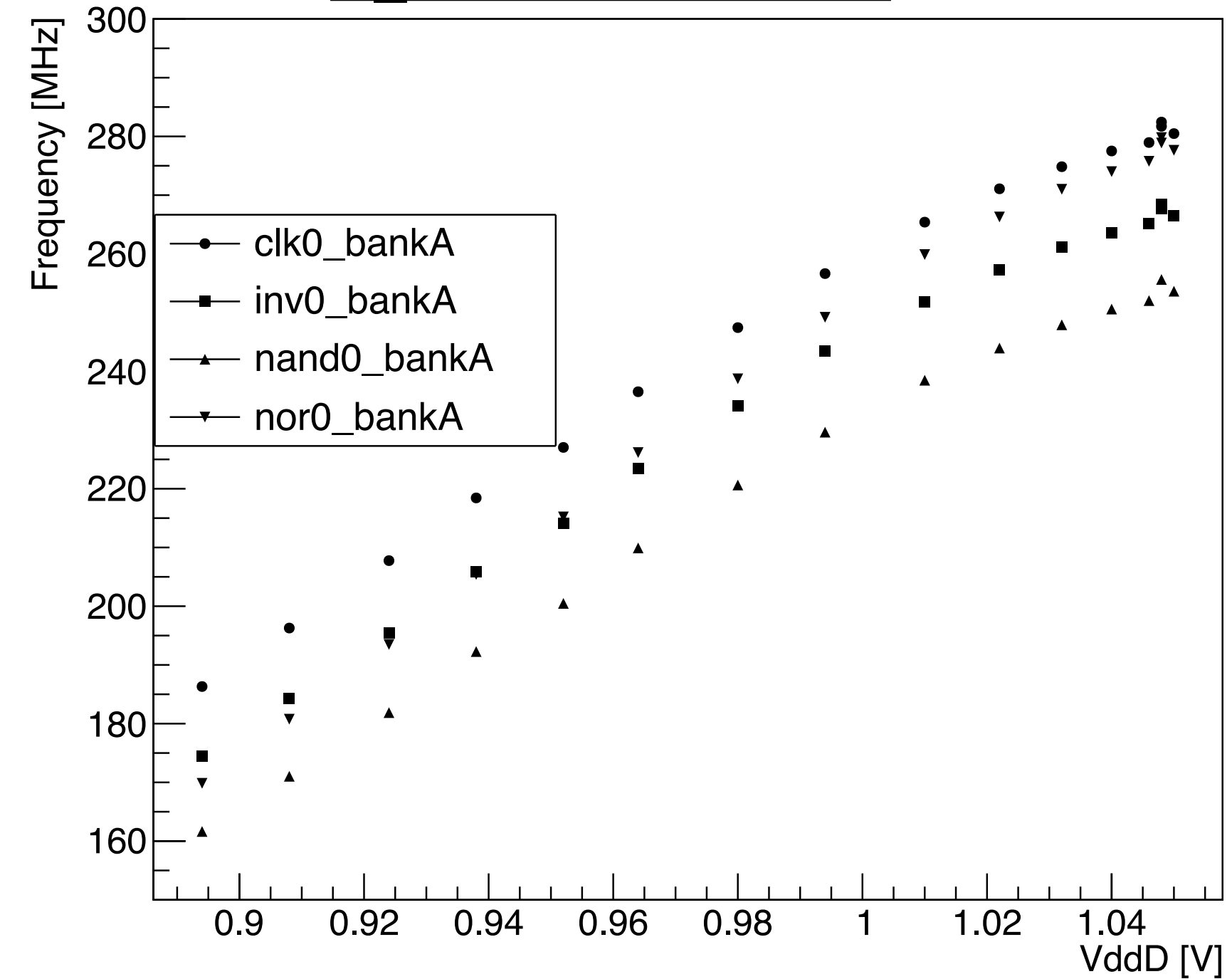
Dependences of Ring Oscillator

モジュール温度とRO周波数



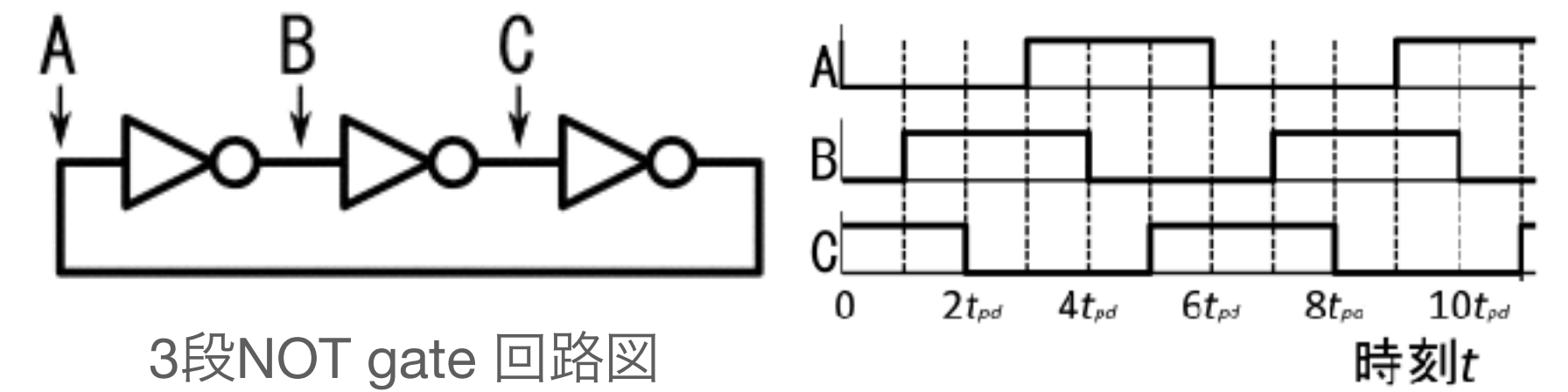
- 線形性, ~ 0.25 MHz/K
- 照射中モジュール温度を十分一定に保てばnegligibleにできる

V_ddDとRO周波数



- 線形性
 - 照射中にある程度ふらつくことが予想
 - リングオシレータに影響が懸念
- ➔ V_ddDによる補正が必要

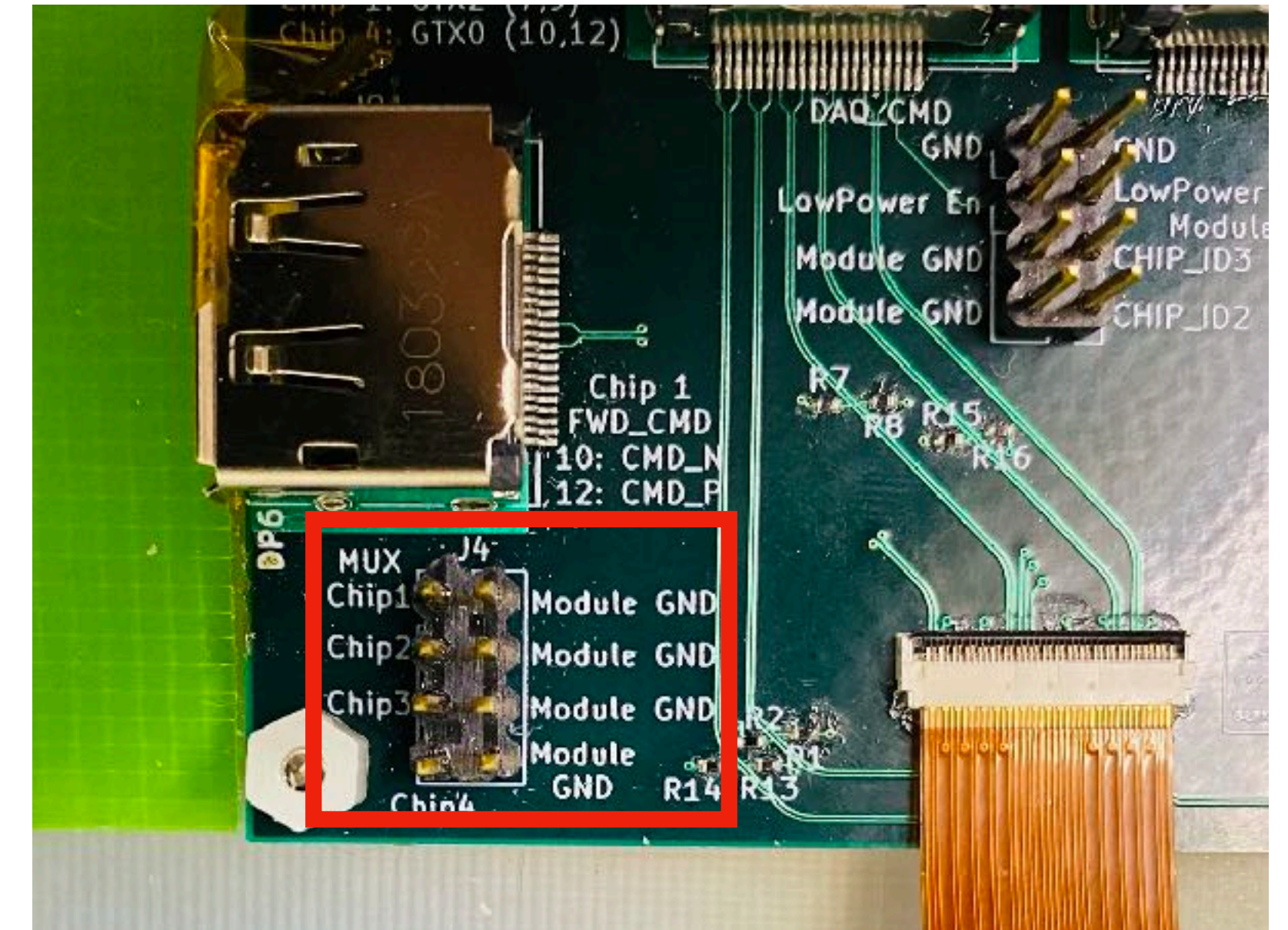
Ring Oscillator



- ▶ Ring oscillator: A circuit that oscillates a signal of a specific frequency by arranging an odd number of logic gates in a loop.
- ▶ Various types of RO are installed in RD53B
- ▶ Oscillation frequency decreases depending on the amount of irradiation-> Monitor the amount of radiation irradiation
- ▶ Also diverted to measure Pixel injection capacitance

Voltage MULTipleXer

- YARR Chip configで指定することで, VMUX (Voltage MULTipleXer)として出力
 - > Power Board 上にある MUX ヘッダーピンをプローブすることで, 測定が可能



Data Board

Setting	Selected Input	Setting	Selected Input	Setting	Selected Input
0	Vref_ADC (GADC)	10	DIFF FE VTH1 Main array	31	Vref_CORE
1	I_mux pad voltage	11	DIFF FE VTH1 Left	32	Vref_PRE
2	NTC_pad voltage	12	DIFF FE VTH1 Right	33	VINA / 4
3	VCAL_DAC / 2 (Sec. 6.3)	13	RADSSENS Ana. SLDO	34	VDDA / 2
4	VDDA / 2 from capmeasure	14	TEMPSSENS Ana. SLDO	35	VrefA
5	Poly TEMPSSENS top	15	RADSSENS Dig. SLDO	36	VOFS / 4
6	Poly TEMPSSENS bottom	16	TEMPSSENS Dig. SLDO	37	VIND / 4
7	VCAL_HI	17	RADSSENS center	38	VDDD / 2
8	VCAL_MED	18	TEMPSSENS center	39	VrefD
9	DIFF FE VTH2	19-30	Ana. GND	40-62	not used
				63	high Z

Table 27: Voltage multiplexer (V_mux) assignments for ATLAS chip.

Setting	Selected Input	Setting	Selected Input	Setting	Selected Input
0	IREF main ref. current	11	Capmeasure parasitic	22	DIFF FE Preamp Top-Left
1	CDR VCO main bias	12	DIFF FE Preamp Main array	23	DIFF FE VTH1 Right
2	CDR VCO buffer bias	13	DIFF FE PreComp	24	DIFF FE Preamp Top
3	CDR CP current	14	DIFF FE Comparator	25	DIFF FE Preamp Top-Right
4	CDR FD current	15	DIFF FE VTH2	26	not used
5	CDR buffer bias	16	DIFF FE VTH1 Main array	27	not used
6	CML driver tap 2 bias	17	DIFF FE LCC	28	Ana. input current/21000
7	CML driver tap 1 bias	18	DIFF FE Feedback	29	Ana. shunt current/21600
8	CML driver main bias	19	DIFF FE Preamp Left	30	Dig. input current/21000
9	NTC_pad current	20	DIFF FE VTH1 Left	31	Dig. shunt current/21600
10	Capmeasure circuit	21	DIFF FE Preamp Right	32-62	not used
				63	high Z

Table 26: Current multiplexer (I_mux) assignments for ATLAS chip.