

2021年度 卒業論文

LHC-ALICE 実験の高度化に向けた
シリコン電磁カロリメータのための
シリコンセンサーの性能評価

奈良女子大学 理学部
数物科学科 高エネルギー物理学研究室
学籍番号：18310469

波多美咲

2022年3月21日

概要

クォークやグルーオンといったパートンは、通常強い相互作用によってハドロン内に閉じ込められている。しかし、ビッグバンから数 μ ～数10 μ 秒後には高温・高密度状態でパートンが閉じ込めから解放されたQGPと呼ばれる状態が存在したと考えられている。このQGPの物性を解明することで宇宙の起源や物質の成り立ちの解明につながると期待されている。このQGPの解明のために行われているのが欧州原子核研究機構 (CERN) の世界最大のハドロン衝突型加速器 Large Hadron Collider (LHC) で行われている A Large Ion Collider Experiment (ALICE) などの高エネルギー重イオン衝突実験である。高エネルギー重イオン衝突実験では、ビッグバン直後にあったとされるQGPを実験室系で生成し、その物性や相転移について解明しようとしている。しかしQGPの生成に成功したものの、早期熱化問題などの未解決問題があり、解決するために衝突初期の核子内構造の状態を理解しようという動きがある。近年の研究では、衝突初期段階にCGCという物質状態が存在していたのではないかという理論が提唱された。そこで、LHC-ALICE 実験ではCGCに感度が高い測定量として前方方向での直接光子の測定を行うため、アップグレード計画として、Forward Calorimeter (FoCal) の導入が進められている。FoCalは、電磁カロリメータであるFoCal-EとハドロンカロリメータであるFoCal-Hで構成され、日本では筑波大学を中心にFoCal-Eの開発が行われている。

FoCal-Eはサンプリング型カロリメータで吸収層にタングステン (W)、検出層にシリコンを用いている。検出器に用いられるシリコンは、より放射線耐性のあるP型の使用を予定しているが、これまでの検出器ではN型を用いていたため、P型の性能評価を行う必要がある。本研究では、シリコンセンサーのI-V特性を測定するためのセットアップを構築し、そのセットアップでP型シリコンセンサーの性能評価を行った。計27枚のシリコンセンサーのI-V特性を調べ、それぞれのシリコンの暗電流の大きさなどの個体差がわかった。そして、その中で暗電流が小さいものの温度依存性についての測定を行い、温度による暗電流の大きさの違いや傾向が見られることがわかった。さらに、シリコンの寄生容量についての測定、測定時間の比較についての測定も行った。

また、今回の測定で使用したシリコンセンサーは2022年3月に理化学研究所にて放射線照射が行われた。今後は放射線照射後のシリコンで同じ測定を行い、今回の測定と比較することで、放射線による影響について調べる予定である

目次

第 1 章 序論	1
1.1 標準模型	1
1.2 量子色力学 (QCD)	1
1.3 Quark Gluon Plasma (QGP)	2
1.4 LHC-ALICE 実験	2
1.5 カラーガラス凝縮 (CGC)	3
1.6 前方の物理	3
1.7 研究目的	5
第 2 章 FoCal 検出器	6
2.1 検出器の物理	6
2.1.1 制動放射	6
2.1.2 光電効果	6
2.1.3 コンプトン散乱	7
2.1.4 電子対生成	7
2.1.5 電離損失	7
2.1.6 電磁シャワー	8
2.2 カロリメータ	8
2.3 半導体検出器	9
2.3.1 半導体	9
2.3.2 P-N 接合	9
2.3.3 印加電圧	9
2.3.4 半導体検出器の仕組み	9
2.4 FoCal 検出器	10
2.4.1 FoCal-E	11
第 3 章 シリコンセンサーの I-V 特性の測定	12
3.1 シリコンセンサー	12
3.2 使用機器・ソフトウェア	13
3.3 測定方法	15
3.3.1 測定のセットアップ	15
3.3.2 測定時間	16
3.4 測定結果	16
3.4.1 温度 50 °C の結果	16
3.4.2 温度を変化させた結果	18
3.4.3 低温領域 (-20,-10,0,10,20 °C) での結果	19
3.4.4 寄生容量についての測定の結果	20
3.4.5 測定時間を変えた結果	20

第 4 章	まとめと今後の課題	22
付 録 A	全シリコンの I-V 特性	25
A.1	軸を揃えた結果	25
A.2	軸を揃えていないもの	28
A.3	シリコン同士の結果の相関	31
付 録 B	温度依存性の測定結果	33
B.1	軸を揃えた結果	33
B.2	軸を揃えていないもの	35
B.3	温度による相関	38

目 次

1.1	標準模型 [1]	1
1.2	ビクバン直後の宇宙の展開図 [2]	2
1.3	LHC-ALICE 実験 [2]	3
1.4	カラーガラス凝縮 (CGC) [3]	3
2.1	物質ごとの電離損失 [5]	8
2.2	半導体検出器の仕組み	10
2.3	FoCal の予定の設置位置 [6]	10
2.4	FoCal-E の構造 [6]	11
3.1	使用したシリコンセンサー	12
3.2	治具	13
3.3	治具のピン番号	13
3.4	恒温槽 (Model OZONE GENTLE LU-113, ESPEC)	14
3.5	ピコアンメータ/電圧源 (Model 6487, KEITHLEY)	14
3.6	ソフトウェア使用時の Excel 画面	15
3.7	回路図	16
3.8	I-V 特性の結果	16
3.9	I-V 特性 縦軸を揃えた結果	17
3.10	I-V 特性 結果の相関	18
3.11	温度依存性	18
3.12	温度依存性 結果の相関	19
3.13	低温領域の結果	19
3.14	寄生容量についての測定	20
3.15	時間間隔の比較	20

第1章 序論

1.1 標準模型

私たちの身の回りのあらゆる物質は、原子からできている。原子は中心の原子核とその周りを回る電子で構成される。原子核は陽子と中性子できている、この2種類をまとめて核子という。核子はさらにクォークと呼ばれる粒子3つからできている。電子やクォークは物質を構成する最小の要素であり、これらを素粒子と呼ぶ。素粒子には、クォーク、レプトン、ゲージ粒子、ヒッグス粒子といった種類があり、電子はレプトンに分類される。クォークとレプトンにはそれぞれ3世代あり、それぞれの世代ごとに電荷が反対の性質を持つ2つの素粒子が存在する。ゲージ粒子とは、クォーク間・レプトン間で力を媒介する粒子で、ヒッグス粒子とは素粒子に質量を与える粒子である。自然界には”強い相互作用”、”電磁相互作用”、”弱い相互作用”、”重力相互作用”といった4つの基本的な相互作用がある。標準模型は、重力相互作用以外の3つの相互作用を記述するためのモデルである。

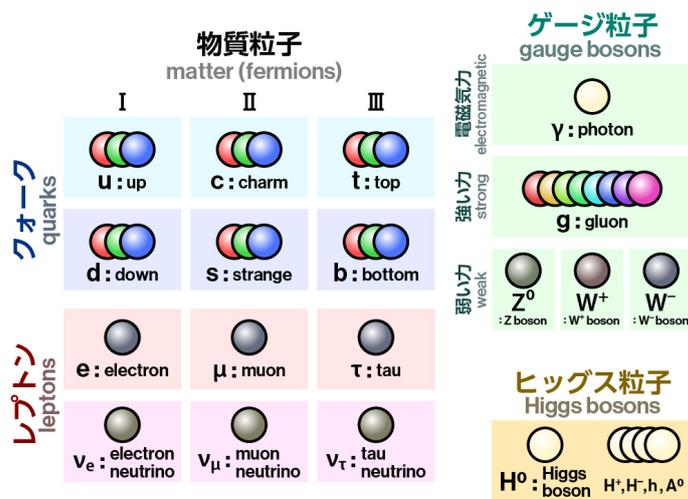


図 1.1: 標準模型 [1]

1.2 量子色力学 (QCD)

量子色力学 (Quantum Chromodynamics : QCD) は、強い相互作用を記述する場の量子論である。クォークやグルーオンはパートンと呼ばれており、レプトンの電荷に相当する色荷と呼ばれる量子数を持っている。色荷を持つ粒子間に働く相互作用を強い相互作用と呼ぶ。クォークは3種類、グルーオンは8種類の色荷をそれぞれ持っており、光の三原色のように組み合わせると白色になることで安定な状態となる。その安定した状態となった複合粒子をハドロンと呼び、その中でもクォーク3つで構成されるものをバリオン、クォーク2つで構成されるものをメソンと呼ぶ。バリオンには陽

子や中性子などがあり、メソンには π 中間子やK中間子などがある。パートンは通常強い相互作用によりハドロン内に閉じ込められているため、単体で取り出すことはできない。

1.3 Quark Gluon Plasma (QGP)

前述の通り、パートンは通常束縛されていて単体で取り出すことはできないが、高温高密度状態になると束縛から解放されると考えられている。束縛から解放され、クォークやグルーオンはバラバラのプラズマ状態となる。この物質状態をクォークグルーオンプラズマ (QGP) と呼ぶ。ビッグバンから数 μ ～数10 μ 秒後にQGPが存在したと考えられているため、QGPの解明により宇宙の起源の解明の手がかりとなると期待されている。

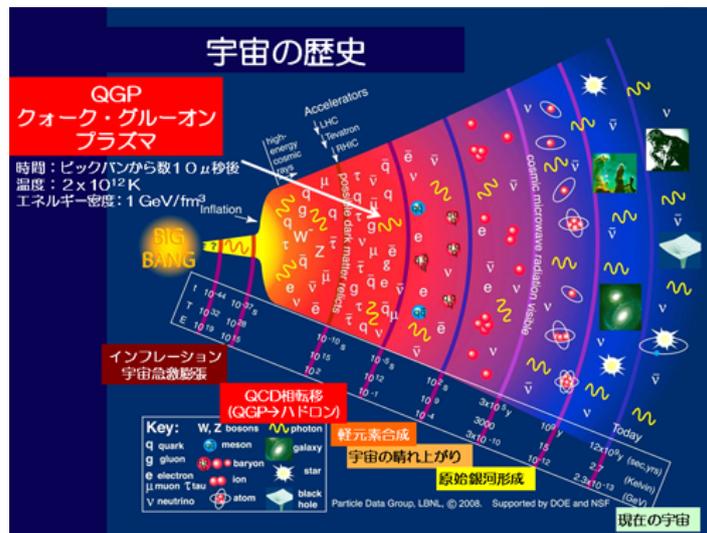


図 1.2: ビッグバン直後の宇宙の展開図 [2]

1.4 LHC-ALICE 実験

LHC 加速器 (Large Hadron Collider) はヨーロッパ共同原子核研究機構 (CERN) によって建設された世界最大のハドロン衝突型加速器である。スイスとフランスの国境の、地下約 100m の場所に位置している。LHC 加速器では、ALICE 実験、CMS 実験、ATLAS 実験、LHCb 実験、LHCf 実験、TOTEM 実験の 6 つの実験が行われている。その中の ALICE 実験 (A Large Ion Collider Experiment) は、重イオンを加速、衝突させることで QGP を生成し、その物性についての解明を目的としている実験である。

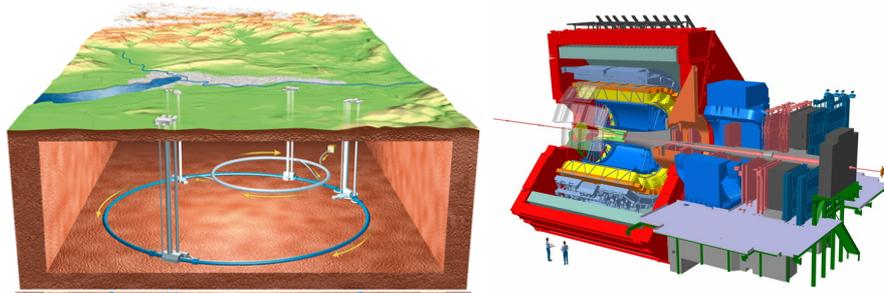


図 1.3: LHC-ALICE 実験 [2]

1.5 カラーグラス凝縮 (CGC)

陽子・中性子はクォーク3つで構成されており、グルーオンがそれらのクォークを強い相互作用によりハドロン内に閉じ込めている。クォークは量子揺らぎとして絶えずグルーオンを放出・吸収しているが、通常のエネルギー下では揺らぎの寿命が非常に短いため、基本構造は大きく変わらない。しかし、高エネルギー領域になると、揺らぎが長寿命化し、グルーオンの雪崩的生成やグルーオン同士の相互作用が生じることで、次第にグルーオンが高密度飽和状態になる。この高密度飽和状態をカラーグラス凝縮 (CGC) と呼ぶ。高エネルギー原子核衝突実験の衝突直前に核子はこの CGC 状態となる。

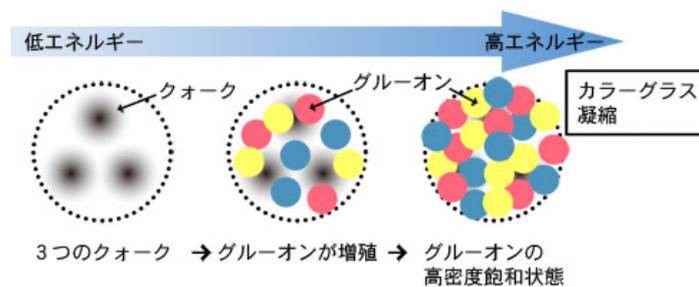


図 1.4: カラーグラス凝縮 (CGC) [3]

1.6 前方の物理

直接光子

高エネルギー原子核衝突実験では、多くの光子が生成される。その光子のうち、検出されるほとんどのものが衝突によって生成されたハドロンから崩壊した崩壊光子であるが、衝突反応から直接生成される直接光子もある。崩壊光子は反応終了後に生成されたものであるため衝突反応時の情報を持っていない。一方、直接光子は反応領域で生成されているため、衝突初期や反応領域の情報を持っている。そのため、直接光子の測定は CGC などの衝突直前の情報を得るために重要であるといえる。

横運動量

運動量ベクトルの、ビーム軸に垂直な成分の大きさを横運動量と呼び、運動量 p_T は $p_T = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$ で表される。横運動量はローレンツ変換に対して不変で、衝突前の横運動量は0であるのが、衝突後には横運動量を持つようになるため、衝突後の粒子の運動を記述する上で重要である。

ラピディティ・擬ラピディティ

相対性理論での速度に代わる運動の大きさの尺度のことをラピディティという。ラピディティ y は、次の式で表される。

$$y = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{E + p_z}{E - p_z} \right) = \tanh^{-1} \left(\frac{p_z}{E} \right) \quad (1.1)$$

E : 粒子のエネルギー

p_z : ビーム軸を z 軸としたときの運動量の z 成分

y が小さいとき、 $y \sim \frac{p_z}{E}$ であり、 z 軸方向の粒子速度と等しくなる。これを用いるとラピディティによって、ローレンツ変換を単純な計算で記述することができる。さらに、粒子が光速のとき、粒子の質量は運動量に対して非常に小さく無視できるため、次の式が成り立つ。

$$y \approx \eta = -\ln \left(\tan \frac{\theta}{2} \right) \quad (1.2)$$

θ : ビーム軸からの粒子の放出角度

この η は擬ラピディティと呼ばれる。 η は θ のみに依存し、 E には依存しない。つまり、 θ の測定から粒子のラピディティを近似で求めることができる。

Bjorken-x

衝突を起こしたハドロン内の各パートンの運動量比のことを Bjorken-x といい、次の式で表される。

$$x = \frac{2p_T}{\sqrt{s}} \exp(-y) \quad (1.3)$$

p_T : 横運動量

\sqrt{s} : 重心系での衝突エネルギー

y : ラピディティ

FoCal では、Bjorken-x のうち、 $x \leq 10^{-2}$ の領域を small-x と呼ぶこととし、この領域の観測を目的としている。

パートン分布関数 (PDF)

高エネルギーでの衝突によって起こる運動量移行 Q の大きな反応において、ハドロンを構成するパートンの運動量分布を示す確率密度関数をパートン分布関数 (PDF: Parton Distribution Function) という。

1.7 研究目的

宇宙の起源・物質の成り立ちを解明するために、国際的に高エネルギー重イオン衝突実験が行われている。高エネルギー重イオン衝突実験により、ビッグバン直後にあったとされる QGP を実験室系で生成し、その物性や相転移について解明しようとしている。しかし QGP の生成に成功したものの、早期熱化問題などの未解決問題があり、解決するために衝突初期の核子内構造の状態を理解しようという動きがある。近年の研究では、衝突初期段階に CGC という物質状態が存在していたのではないかという理論が提唱された。そこで、LHC-ALICE 実験では CGC に感度が高い測定量として前方方向での直接光子の測定を行うため、アップグレード計画として、FoCal (Forward Calorimeter) の導入が進められている。

第2章 FoCal検出器

2.1 検出器の物理

2.1.1 制動放射

高速の荷電粒子が物質中に入射すると、物質の原子核の電場によって、入射してきた粒子が減速し、光子を放出する現象を制動放射という。制動放射は確率で発生し、その確率は入射粒子の質量の2乗に反比例、物質の原子番号の2乗に比例する。つまり、物質の原子番号が大きく、入射粒子の質量が小さいと起こりやすいため、電子・陽電子が入射するときに確率が高くなる。制動放射によるエネルギー損失は次の式で与えられる。

$$-\frac{dE}{dx} = 4\alpha N_0 \frac{Z^2}{A} r_e^2 E \ln \frac{183}{Z^{\frac{1}{3}}} = \frac{E}{X_0} \quad (2.1)$$

α : 微細構造定数

N_0 : 物質の原子密度

Z : 物質の原子番号

A : 物質の原子量

r_e : 古典電子半径

E : 入射エネルギー

X_0 : 放射長

入射エネルギーが $1/e$ になるまでに通過する長さを放射長といい、物質の原子量と原子番号に依存する。

$$X_0 = \frac{716.4A}{287Z(Z+1)\sqrt{Z}} [g/cm^2] \quad (2.2)$$

2.1.2 光電効果

物質中に光子が入射すると、原子の中に束縛されている電子に全エネルギーを与えて、軌道電子を1つ原子外に放出する。この現象を光電効果、放出された電子を光電子という。放出された電子の運動エネルギーは軌道電子の結合エネルギー I を用いて

$$E_e = h\nu - I \quad (2.3)$$

I : 軌道電子の結合エネルギー

と表される。

2.1.3 コンプトン散乱

光子が物質に入射したときに、物質中の束縛電子と衝突し、散乱することで入射した光子のエネルギーが失われ、そのエネルギーが原子内の軌道電子に与えられる。このエネルギーが束縛電子の結合エネルギーより大きいとき、電子が弾き出される場合がある。この電子を反跳電子といい、自由電子とみなすことができる。このような現象をコンプトン散乱という。コンプトン散乱では、エネルギー保存則と運動量保存則から次の式が成り立つ。

$$\hbar\omega' = \frac{\hbar\omega}{1 + \frac{\hbar\omega}{m_e c^2}(1 - \cos\theta)} \quad (2.4)$$

ω : 入射光子の角振動数

ω' : 散乱光子の角振動数

2.1.4 電子対生成

電子2つ分の静止質量 ($0.511\text{MeV} \times 2 = 1.02\text{MeV}$) 以上のエネルギーを持つ光子が物質を構成する原子の近くを通るときに、原子核の電場によって光子が消滅し、電子と陽電子がついになって生成される現象を電子対生成という。

2.1.5 電離損失

荷電粒子が高速で物質中を通過するとき、物質を構成する原子を電離・励起させることによりエネルギーを失うことを電離損失という。電離損失は物質の原子番号と原子量の比、荷電粒子の電荷の2乗、入射する荷電粒子の速さに比例する。単位長さあたりに失うエネルギーを阻止能といい、Bethe-Blochの式で次のように表される。

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left(\ln \frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right) \quad (2.5)$$

N_A : アボガドロ定数

m_e : 電子の静止質量

z : 入射粒子の電荷

I : 物質のイオン化ポテンシャル

$\beta = \frac{v}{c}$: 相対論における速度比

$\gamma = \frac{1}{1-\beta^2}$: ローレンツ因子

δ : 通過粒子における電子による遮蔽効果

横軸に $\beta\gamma$ 、縦軸に阻止能をとると、図のようなグラフになる。この図から、どの物質においても $\beta\gamma$ がほぼ同じ値で最小の電離損失となる。この最小の電離損失で通過する粒子のことを最小電離粒子 (Minimum Ionizing Particle:MIP) という。

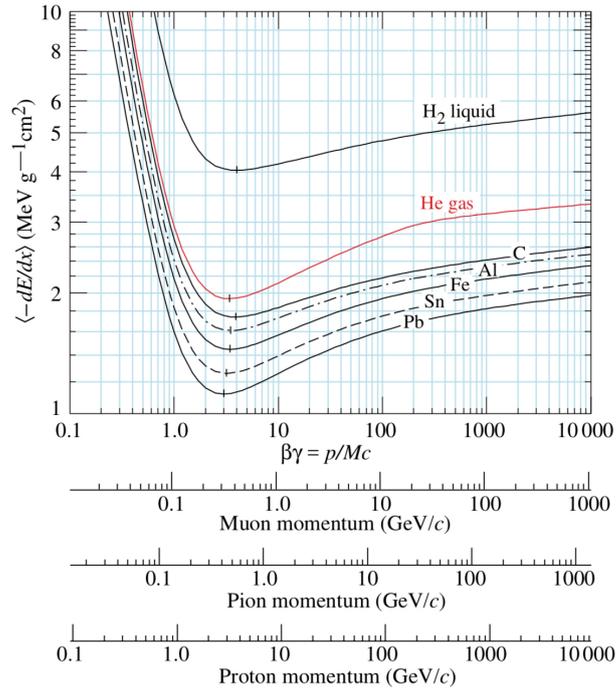


図 2.1: 物質ごとの電離損失 [5]

2.1.6 電磁シャワー

荷電粒子や光子が高エネルギー状態で物質中に入射すると電子対生成により電子と陽電子が生成される。次にその生成された電子と陽電子が扇動放射を起こすことで光子が放出される。放出された光子がまた電子対生成を起こして電子・陽電子を生成する。このように電子対生成と制動放射を繰り返すことで電子と光子が雪崩的に発生していく現象を電磁シャワーという。

2.2 カロリメータ

粒子のエネルギーを測定するための検出器をカロリメータという。電子・光子を測定する電磁カロリメータとハドロンエネルギーを測定するハドロンカロリメータがある。また、構造には全吸収型カロリメータとサンプリング型カロリメータがあり、FoCalはサンプリング型カロリメータである。サンプリング型カロリメータはエネルギーを吸収する吸収層と粒子が落としたエネルギーを読み出して処理する検出層で構成される。検出器では電磁相互作用によって荷電粒子の信号を検出するが、光子などの非荷電粒子は電磁相互作用を起こさず、検出されないため、電磁シャワーを用いて光子を荷電粒子の信号に変換してエネルギー測定を行う。

2.3 半導体検出器

2.3.1 半導体

導体と絶縁体の中間の性質を持っている物質を半導体という。半導体にはシリコン (Si) やゲルマニウム (Ge) などがあり、本研究ではシリコンを用いるため、シリコンについて記述する。シリコンは4本の結合手を持ち、純粋なものは価電子が全て共有結合に使われるため、絶縁体として振る舞う。このような純粋な半導体を真性半導体という。しかし、半導体結晶中に少量の不純物を加えると様相が変化する。不純物としてホウ素 (B) などの結合手が3本の元素を用いた半導体をP型半導体という。P型半導体はホール(正孔)が発生し、発生したホールが静電化を持った電子のように振る舞うため電流が流れる。P型半導体に用いられる不純物原子をアクセプタという。一方、不純物として結合手を5本持つリン (P) やヒ素 (As) などの元素を用いたものをN型半導体といい、このときの不純物原子をドナーという。N型半導体ではSiと共有結合できない電子が発生し、電場を与えると自由電子として振る舞うことができる。

2.3.2 P-N 接合

P型半導体とN型半導体を1つの半導体結晶として接合することをP-N接合という。接合部付近では熱運動により、電子がP型側、ホールがN型側に広がる。そのため、接合部付近には電氣的に中性な領域ができる。この領域を空乏層という。

2.3.3 印加電圧

電圧の印加方法には順バイアスと逆バイアスの2種類がある。順バイアスとはP型半導体に正の電圧を印加する方法で、P型側のホールがN型側に、N型側の電子がP型側に移動する。そのため、空乏層が小さくなりP型側からN型側へ電流が流れるようになる。一方、逆バイアスとはN型半導体側に正の電圧を印加する方法である。逆バイアスで印加すると空乏層が大きくなり、電流が流れにくくなる。

2.3.4 半導体検出器の仕組み

シリコン結晶内に粒子が入射すると電磁相互作用によって結晶が励起され、電子とホールが発生する。キャリアがほとんど存在しない空乏層では、電子とホールは再結合する前に内部電場によって電極にたどり着くことでパルス電流が流れる。この電流を観測することで粒子の通過を検出できる。半導体検出器では逆バイアスをかけることで、検出する場所である空乏層を広げ、検出効率を上げている。

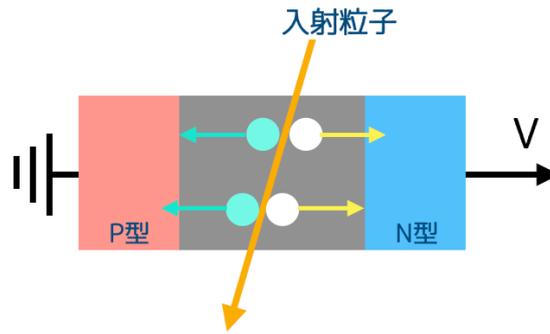


図 2.2: 半導体検出器の仕組み

2.4 FoCal 検出器

FoCal(Forward Calorimeter) とは前述の通り LHC-ALICE 実験のアップグレード計画のための検出器である。2027 年から始まる ALICE 実験の Run4 での運用が予定されている。FoCal は電磁カロリメータである FoCal-E とハドロンカロリメータである FoCal-H で構成され、日本では筑波大学を中心に FoCal-E の性能評価が行われている。FoCal の目的は、これまでに観測されていない超前方方向領域 ($3.2 < \eta < 5.8$) での直接光子を測定することである。これにより、衝突初期段階の状態を理解するのに重要な small- x ($x \leq 10^{-6}$) 領域でのパートン分布関数や CGC についての詳細な測定が期待される。設置位置は図に示すように衝突地点からビーム軸の前方方向に 7m 離れた地点を予定している。

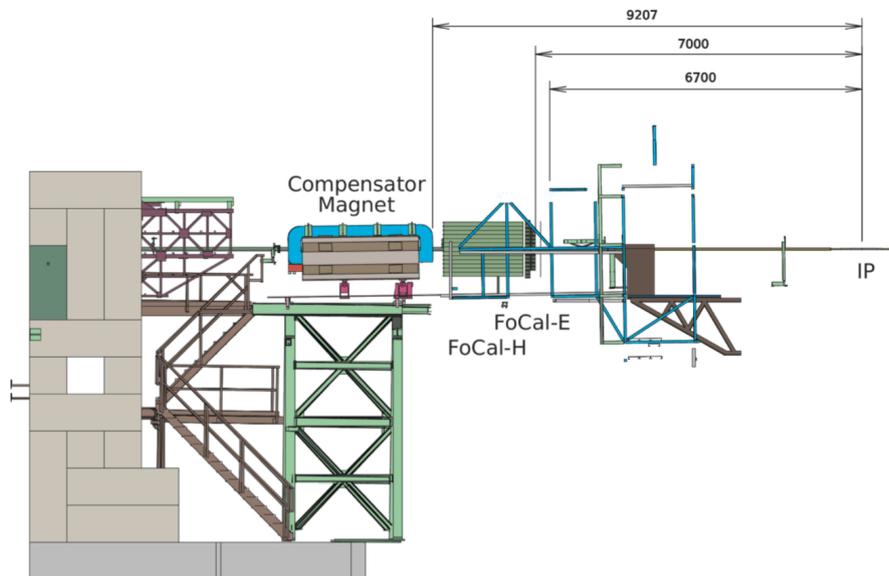


図 2.3: FoCal の予定の設置位置 [6]

2.4.1 FoCal-E

FoCal-Eはサンプリング型カロリメータで吸収層にタングステン(W)、検出層にシリコンを用いており、それが20層並ぶ構造である。吸収層に用いられるタングステンは放射長が $X_0 = 3.5\text{mm}$ モリエール半径が $R_M = 9.3\text{mm}$ であり、鉛($X_0 = 5.6\text{mm}$ 、 $R_M = 17.1\text{mm}$)などと比較するとモリエール半径が小さく、シャワーのサイズが小さくなるため、検出器のコンパクト化・近接した光子の識別の最適化が可能になる。また、吸収層の暑さは放射長と同じ 3.5mm である。検出層は高い位置分解能を持つHGL(High Granularity Layer)とエネルギー測定をするためのLGL(Low Granularity Layer)の2種類がある。HGLには崩壊光子と直接光子の識別を行う役割があるMAPS(Monolithic Active Pixel Sensors)と呼ばれる $30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$ の小さなシリコンセンサーでできており、そのセンサーで $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ のミニピクセルを構成することで高い分解能を持つ。そのため、シャワーの形を観測できる。LGLは $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ のシリコンセンサーを 9×8 個並べたもので1層を構成している。つまり、72個の読み出しチャンネルがあり、それにより光子のエネルギーを測定する。

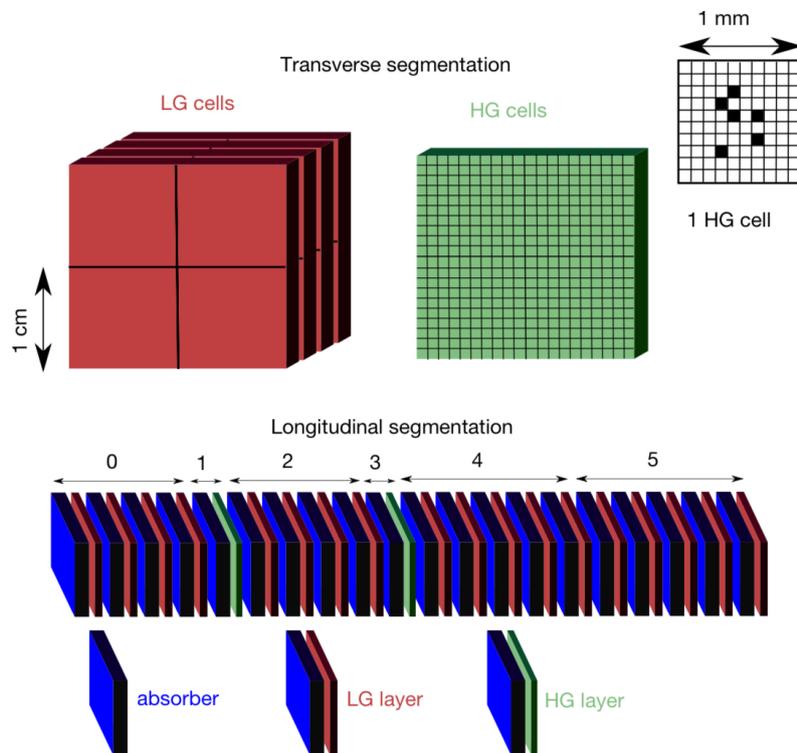


図 2.4: FoCal-E の構造 [6]

第3章 シリコンセンサーのI-V特性の測定

本章では、本研究で行ったP型シリコンセンサーのI-V特性とその温度依存の測定について記述する。

3.1 シリコンセンサー

I-V特性の測定を行ったセンサーは、全てP型で、 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ のものが24枚、 $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ のものが3枚である。センサーの大きさに合わせた治具を用いて測定を行った。

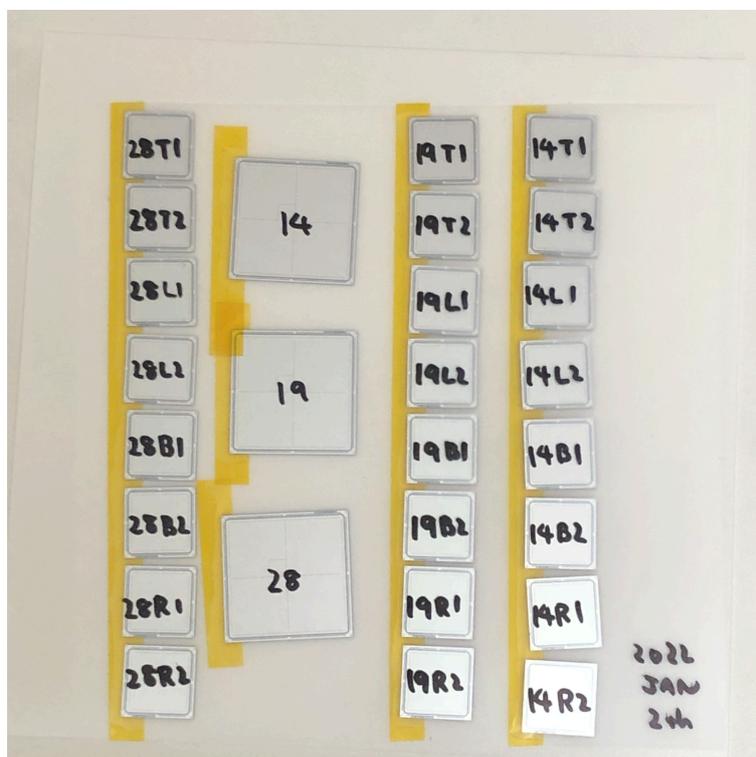


図 3.1: 使用したシリコンセンサー

治具

シリコンセンサーの測定を行うために使用した治具。センサーの大きさに合わせて2種類ある。治具にはそれぞれ接続するためのピンがついている。 $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ 用の治具にはプラス側（N型側）につがるピンが6本、グラウンドにつながっているピンが1本あり、 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ 用の治具にはプラス側が2本、グラウンド側が1本ある。プラス側のピンに番号を振り、それぞれの場所で測定した。

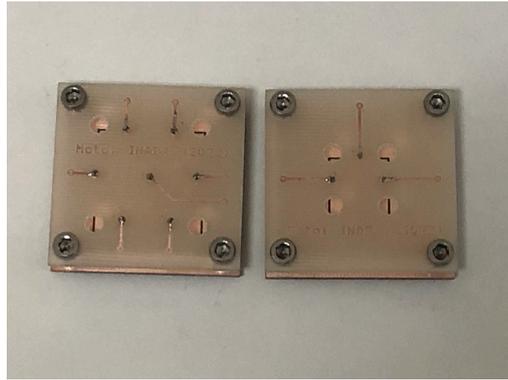


図 3.2: 治具

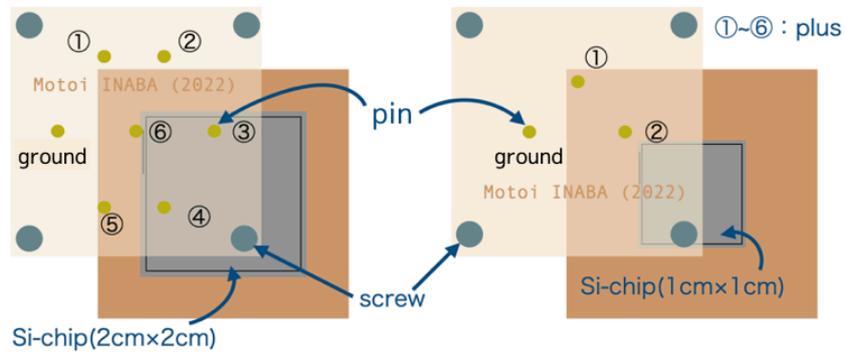


図 3.3: 治具のピン番号

3.2 使用機器・ソフトウェア

恒温槽 (Model OZONE GENTLE LU-113, ESPEC)

測定時にセンサー周辺の温度を一定に保つために使用した。設定温度は-25~95 °Cである。設定温度と実際の温度に 1~2 °Cの差が見られたため、別の温度計も併用した。



図 3.4: 恒温槽 (Model OZONE GENTLE LU-113, ESPEC)

ピコアンメータ/電圧源 (Model 6487, KEITHLEY)

シリコンセンサーに電圧をかけ、そのときの電流を測定するために使用した機器。最大電圧は500Vで、GPIBでパソコンに接続し、パソコンで制御することが可能である。



図 3.5: ピコアンメータ/電圧源 (Model 6487, KEITHLEY)

W32-6487-N (株式会社システムハウス・サンライズ)

ピコアンメータ/電圧源をパソコンで制御するために使用したソフトウェア。Excelのアドインとして動作するソフトウェアで、電圧、時間間隔、測定回数などを指定して測定することができる。

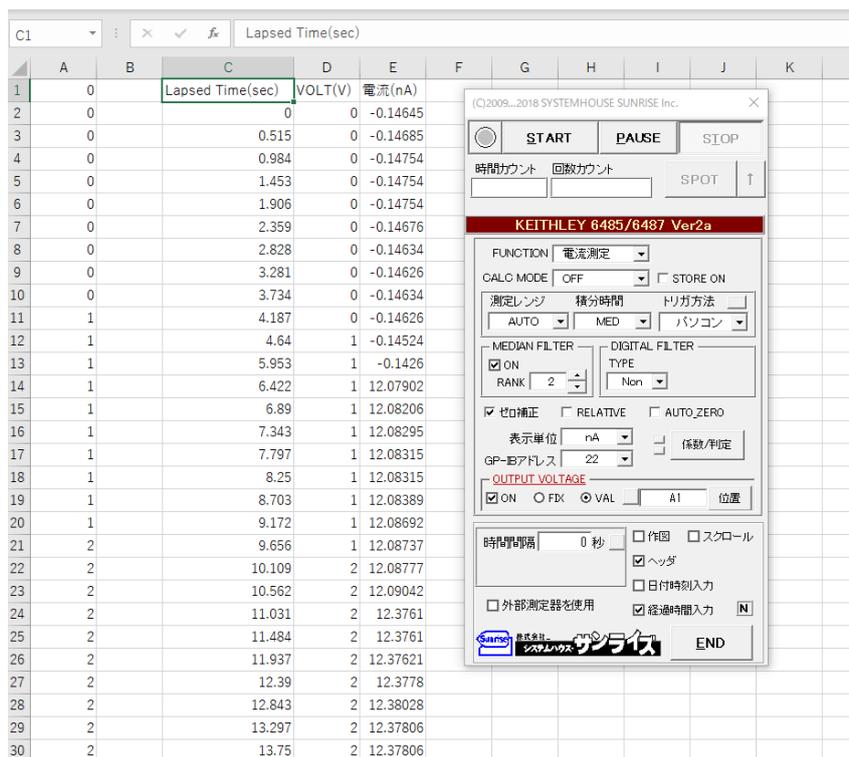


図 3.6: ソフトウェア使用時の Excel 画面

3.3 測定方法

前述のシリコンセンサーについて、 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ のものは 2 箇所、 $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ のものは 6 箇所、それぞれ測定した。このとき周辺の温度は $50\text{ }^\circ\text{C}$ で一定に保っている。それぞれの測定で $0\sim 500\text{V}$ を 1V 刻みで 10 回ずつ測定している。また、数枚のセンサーで周辺温度が $20, 30, 40, 50\text{ }^\circ\text{C}$ の場合の I-V 特性を調べた。このときは $0\sim 500\text{V}$ を 5V 刻みで測定した。さらに、低温 ($-20, -10, 0, 10, 20\text{ }^\circ\text{C}$) での温度依存性、寄生容量についての測定、時間間隔を変えた場合の比較も行った。

3.3.1 測定のセットアップ

図に示した回路図のように接続し、測定した。恒温槽で温度を保ちつつ、恒温槽内に光が入らないようにしている。シリコンには逆電圧がかかるように接続している。

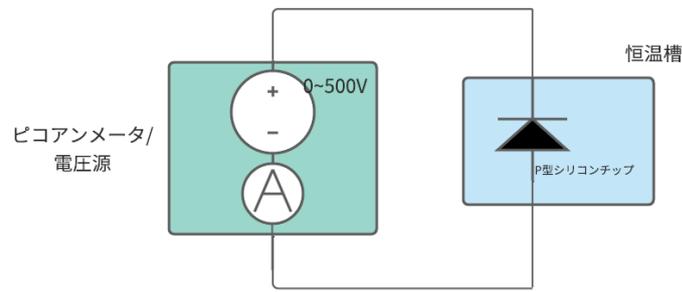


図 3.7: 回路図

3.3.2 測定時間

このように測定した場合にかかる時間は、恒温槽で $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 変化させるのに約 10 分、ソフトウェアでの測定は $0\sim 500\text{V}$ を 1 V 刻みの場合は約 15 分、 5 V 刻みの場合は約 5~10 分である。実際には、測定するピンの場所を変えた後に温度が安定するまでの時間などがかかるため、1 枚の $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ のシリコンを測定するのにかかる時間は、約 40~50 分である。

3.4 測定結果

以下はそれぞれの測定についての結果である。統計誤差が非常に小さいため、誤差棒は見えない図となっている。

3.4.1 温度 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ の結果

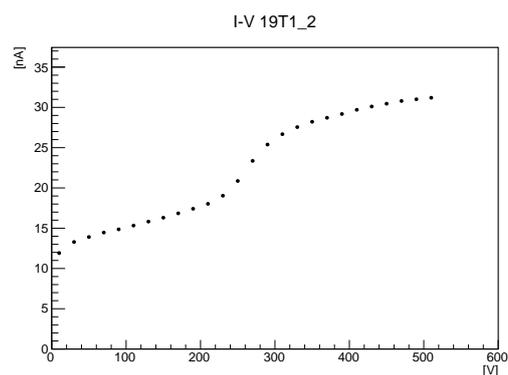


図 3.8: I-V 特性の結果

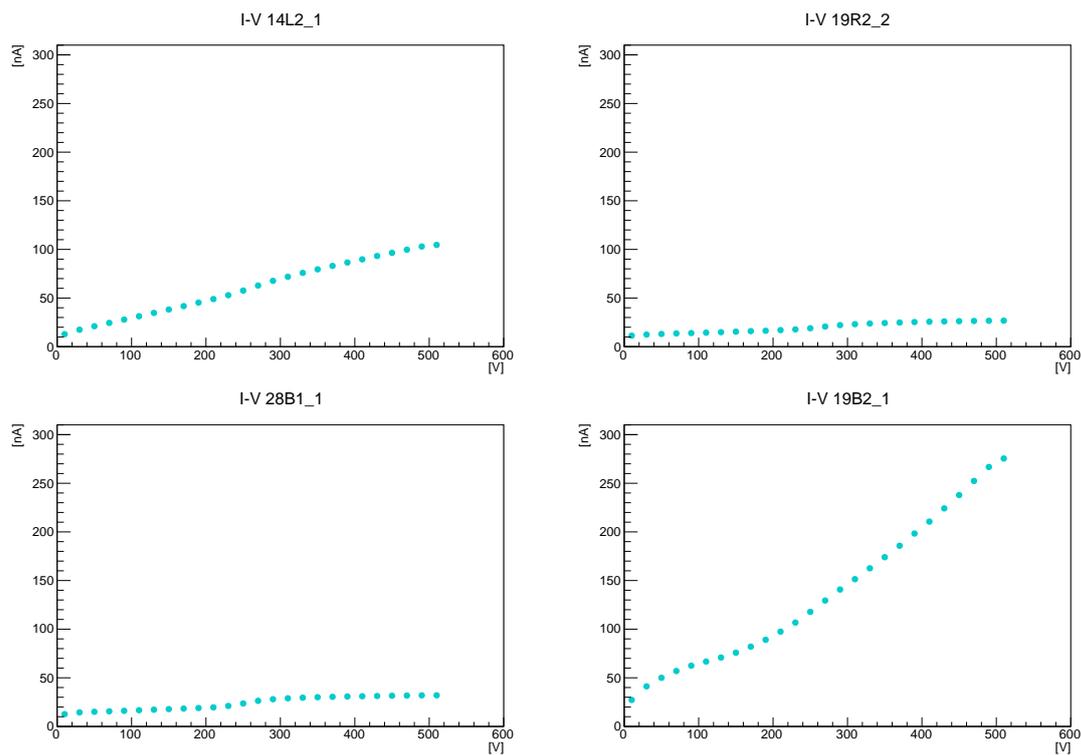


図 3.9: I-V 特性 縦軸を揃えた結果

50 °Cで全てのシリコンセンサーについて行った実験の結果である。全てのシリコンで図 3.8 のような特徴的なカーブが見られた。図 3.9 は縦軸を揃えたものであるが、この結果でも同じようなカーブが見られた。また、図 3.9 から暗電流の大きさには個体差があることがわかる。実際の検出器では暗電流はノイズになってしまうため、暗電流が小さいものが望まれる。

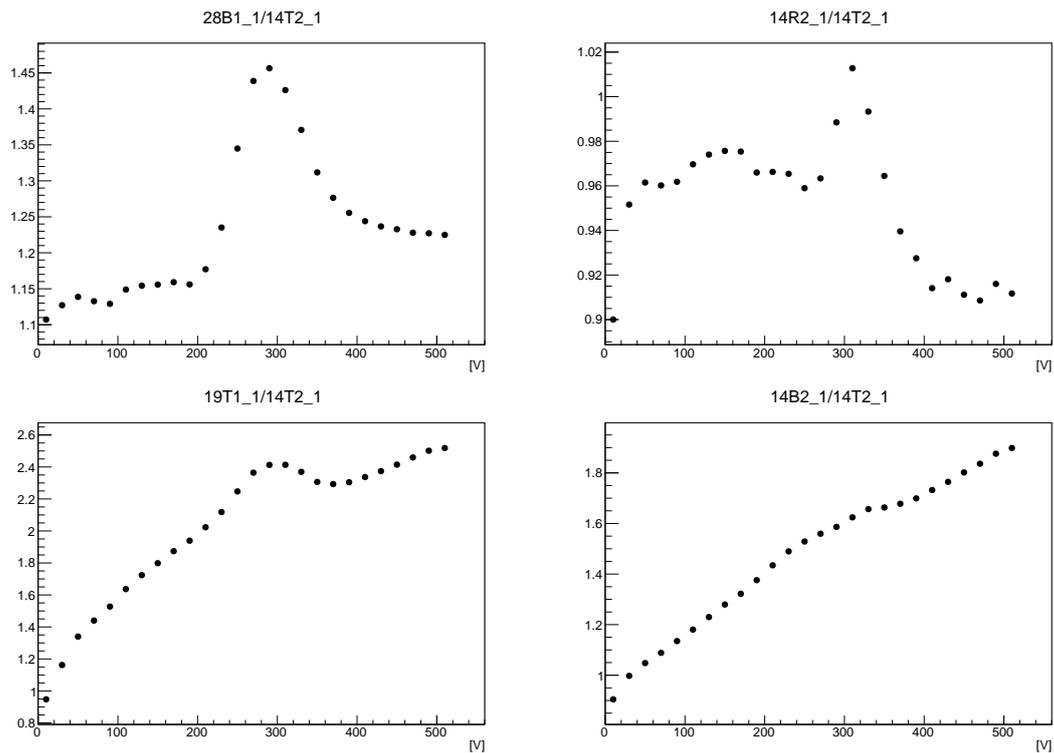


図 3.10: I-V 特性 結果の相関

次に、シリコン同士の結果の相関を調べるために、最も暗電流が小さかった 14T2 というシリコンの結果で他の結果を割ったものをグラフにした。その結果が図 3.10 である。上図のようにピークが見られる、つまりカーブの現れる電圧が異なるものもあれば、下図のようにほぼピークが見られない、カーブの現れる電圧が近いものもあり、特に相関は見られなかった。

3.4.2 温度を変化させた結果

すでに述べたように、実際の検出器では暗電流が小さいものが望まれる。そのため、暗電流が小さかったシリコンについてさらに詳しく調べた。

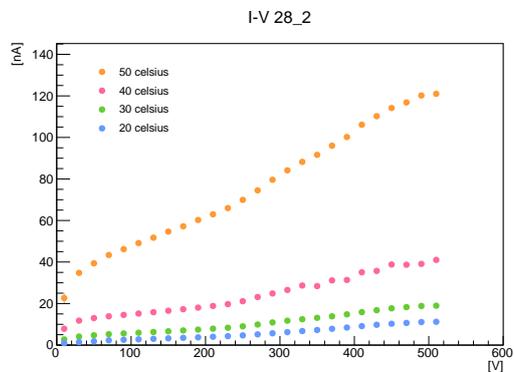


図 3.11: 温度依存性

図 3.11 は測定するときのシリコン周辺の温度を 20,30,40,50 °Cにした場合の結果である。図 3.11 のように温度を下げるほど、暗電流も小さくなるのがわかる。つまり、検出器で使用する時にはシリコンセンサー周辺の温度を低くした方がノイズとなる暗電流が小さくなる。

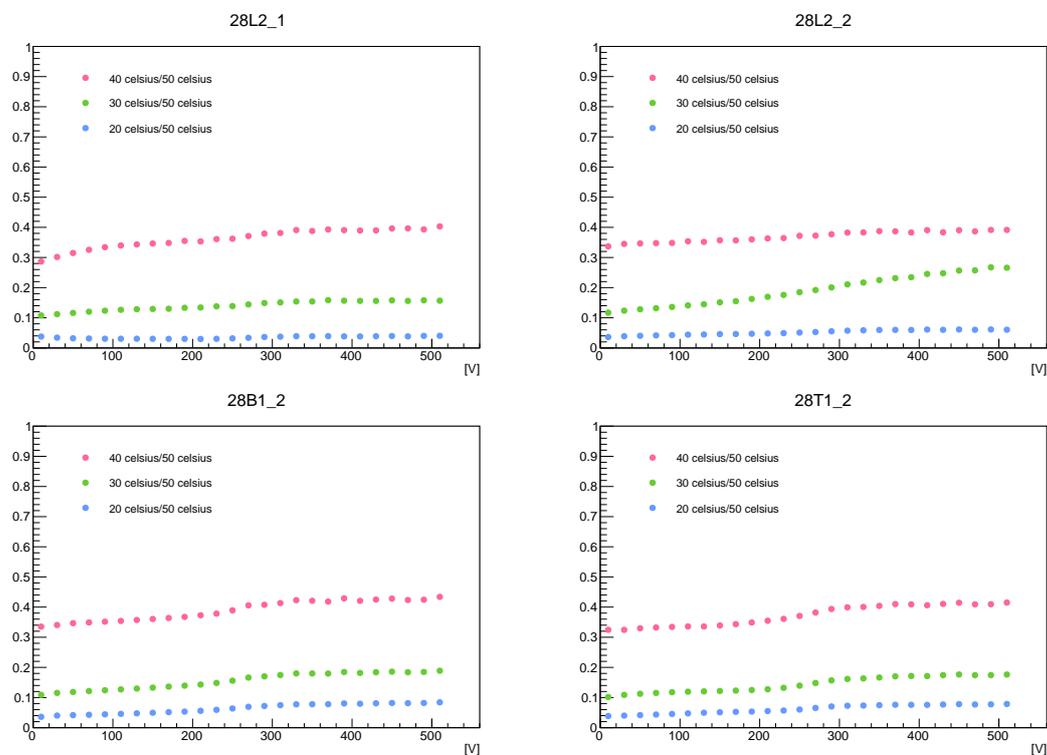


図 3.12: 温度依存性 結果の相関

温度による違いについての相関を調べるために、20,30,40 °Cの結果を同じシリコンの 50 °Cの結果で割ったものをグラフにした。図 3.12 がそのグラフである。暗電流の大きさにはそれぞれ個体差があるが、図 3.12 ではほぼ同じ値で一定となった。このことから温度による違いには傾向があると考えられる。

3.4.3 低温領域 (-20,-10,0,10,20 °C) での結果

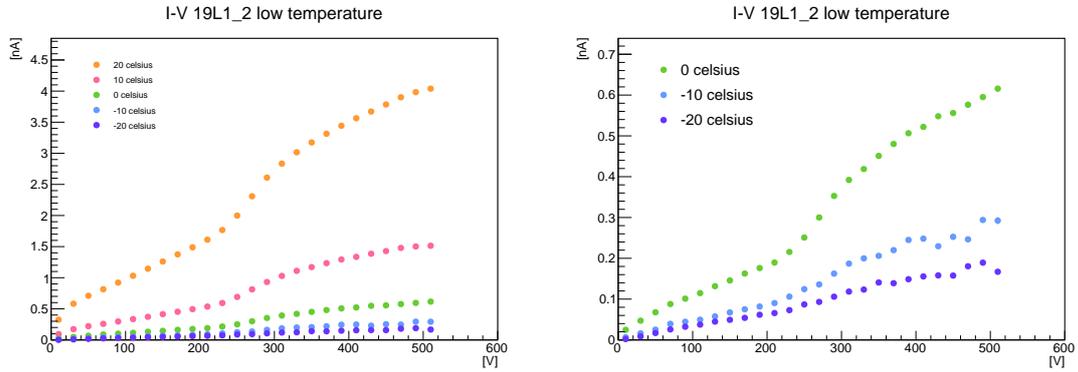


図 3.13: 低温領域の結果

図 3.13 は、低温で測定したときの結果である。温度は - 20, - 10, 0, 10, 20 °C で測定している。右図は左図の - 20 ~ 0 °C のみをプロットしたものである。20 ~ 50 °C で測定した場合と同じように温度を下げるほど暗電流は小さくなるのがわかる。しかし、実際に使用する場合は温度が低すぎると結露などの問題が出てくるため、使用する際の温度については検討する必要がある。

3.4.4 寄生容量についての測定の結果

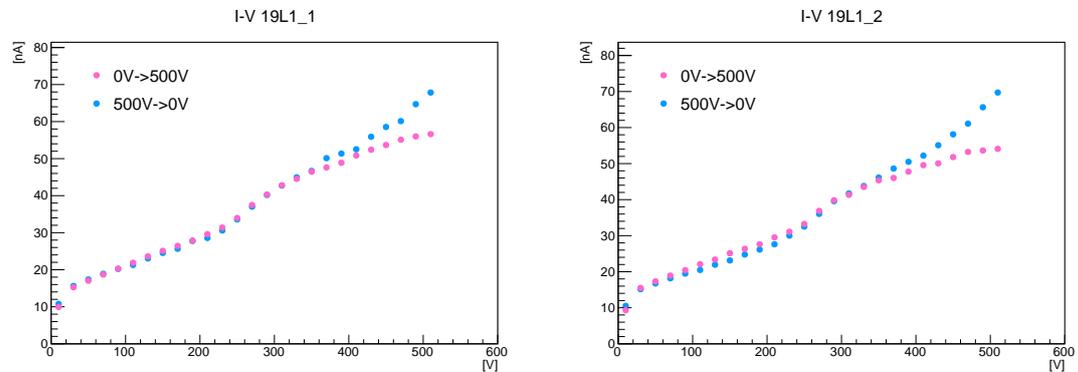


図 3.14: 寄生容量についての測定

次に、寄生容量について調べるために、0V から測定し、電圧を上げて測定した場合と 500V から測定を始め、徐々に電圧を下げて測定した場合を比較した。その結果が図 3.14 である。比較した 2 つの測定間でシリコンの位置などは全く変化させていない。電圧が低いときはほぼ一致しているが、高電圧になるほど差が見られた。この結果から測定したシリコンには寄生容量があると考えられる。

3.4.5 測定時間を変えた結果

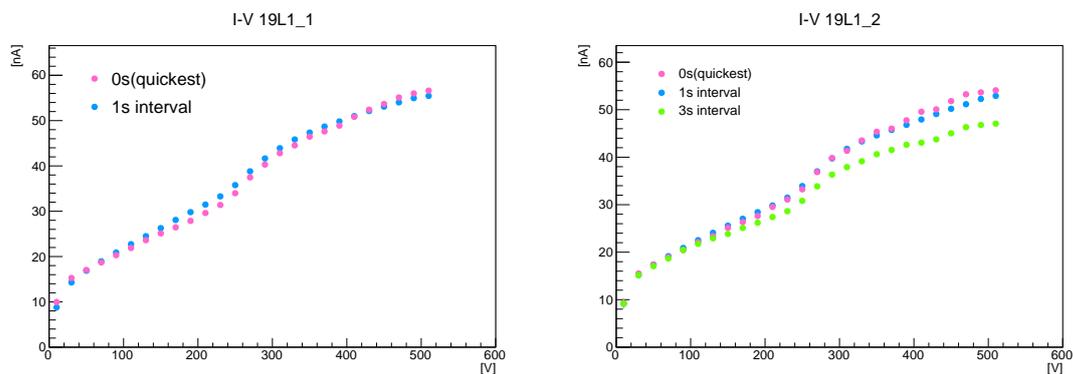


図 3.15: 時間間隔の比較

図 3.15 は測定するときの時間間隔を変えて測定したものである。時間間隔の設定は前述のソフトウェアで行っている。左図はソフトウェアで測定できる最速の測定と 1 秒間隔での測定の比較で、右図はさらに 3 秒間隔での測定を比較したものである。このときも位置などは全く変化させていないが、違いが見られた。この違いは本来誤差となるはずのものであるが、1 つの測定の統計誤差は非常に小さい。そのため、系統誤差について考慮していく必要がある。

第4章 まとめと今後の課題

本研究では、シリコンセンサーの I-V 特性を測定するためのセットアップを構築し、そのセットアップで P 型シリコンセンサーの性能評価を行った。計 27 枚のシリコンセンサーの I-V 特性を調べ、それぞれのシリコンの暗電流の大きさなどの個体差がわかった。そして、その中で暗電流が小さいものの温度依存性についての測定を行い、温度による暗電流の大きさの違いや傾向がわかった。さらに、シリコンの寄生容量についての測定では、比較した結果に差が見られることからシリコンに寄生容量があることがわかり、測定時間の比較についての測定では、構築したセットアップでの系統誤差を検討する必要があるとわかったため、今後検討を行おうと思う。

また、今回の測定で使用したシリコンセンサーは 2022 年 3 月に理化学研究所にて放射線照射が行われた。今後は放射線照射後のシリコンで同じ測定を行い、今回の測定と比較することで、放射線による影響について調べる予定である。

参考文献

- [1] HiggsTan:素粒子の標準模型、<https://higgstan.com/standerd-model>
- [2] LHC ALICE 実験 日本グループ、<http://alice-j.org/>
- [3] 高エネルギー加速器研究機構、News@KEK、<https://www2.kek.jp/ja/news/highlights/2010/CGC.html>
- [4] KEK 素粒子原子核研究所 山崎祐司、長野邦浩 (2005),”HERA-II：高輝度化の歩みと物理”、<http://www.jahep.org/hepnews/2005/Vol24No2-2005.7.8.9yamazaki.pdf>
- [5] Particle Data Group(2019), <https://pdg.lbl.gov/2018/reviews/rpp2018-rev-passage-particles-matter.pdf>
- [6] ALICE Collaboration(2019), ”A Forward Calorimeter (FoCal) in the ALICE experiment”, <https://cds.cern.ch/record/2696471/files/focal.pdf>
- [7] ”LHC-ALICE 実験の高度化に向けたシリコン電磁カロリメータの開発と性能評価” 令和元年度 奈良女子大学大学院 数物科学専攻 高エネルギー物理学研究室 港陽子
- [8] ”LHC-ALICE 実験 超前方光子測定用電磁カロリメータ開発に向けた p 型シリコンセンサーの動的特性の測定” 令和 2 年度 筑波大学理工学群物理学類 麻谷有輝
- [9] ”LHC-ALICE 実験 超前方領域光子測定用電磁カロリメータ開発に向けた P 型シリコンセンサーの性能評価” 令和 2 年度 筑波大学理工学群物理学類 榎本真隆

謝辞

本研究を行うにあたり、多くの方々にご支援、ご協力いただき心から感謝いたします。特に指導教官である下村先生には大変お世話になりました。下村先生にはゼミやミーティング、そして個別で質問をした際にも物理的知識やデータ解析について熱心かつ丁寧に教えていただきました。心から感謝申し上げます。蜂谷先生にはシリコンセンサーの取り扱いや検出器についての知識などを教えていただきました。宮林先生、林井先生、研究室の先輩方にはミーティング等で様々なアドバイスをいただきました。ありがとうございました。

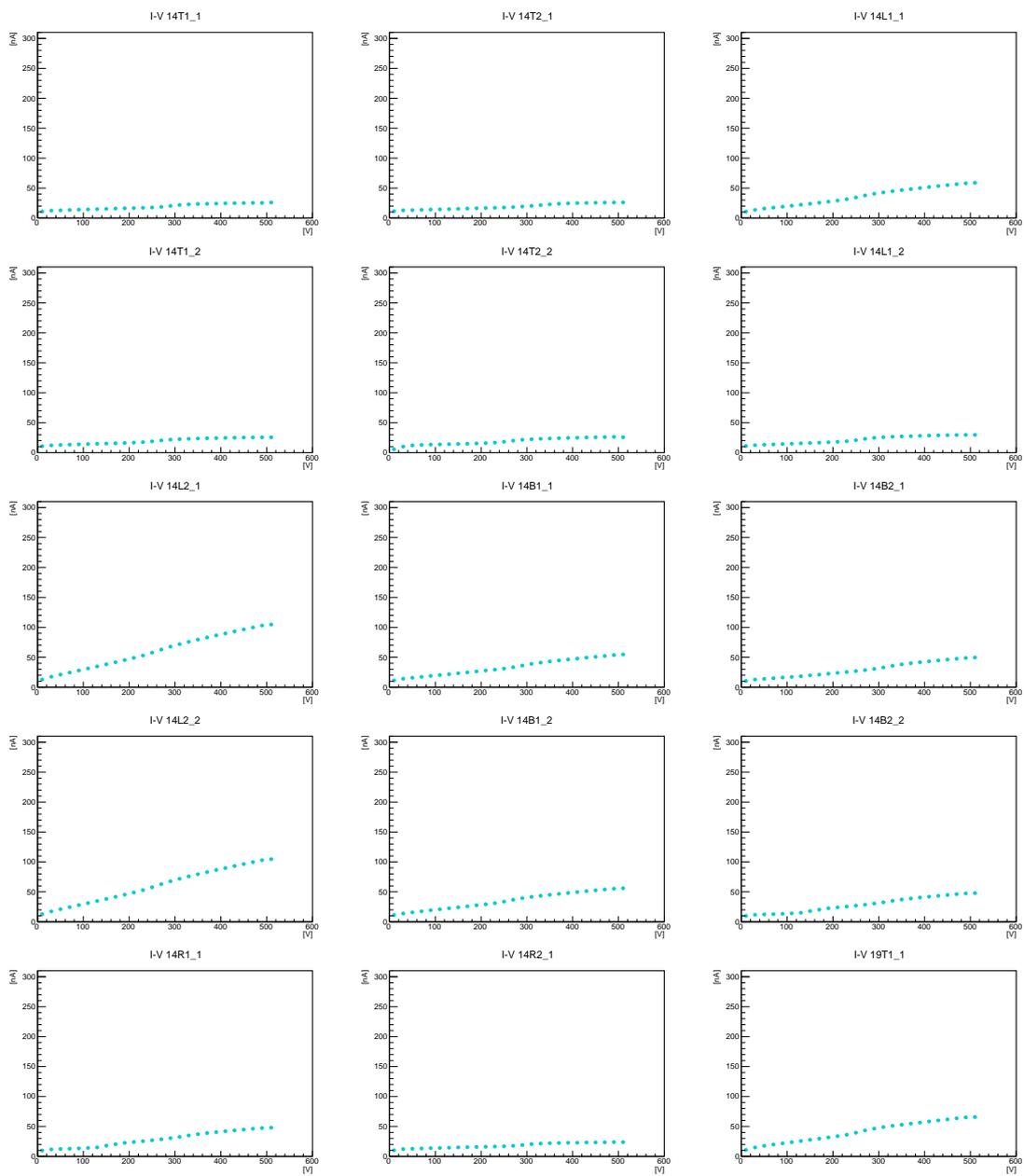
また、FoCal グループの皆様には、このような研究を行う機会をいただき感謝しております。

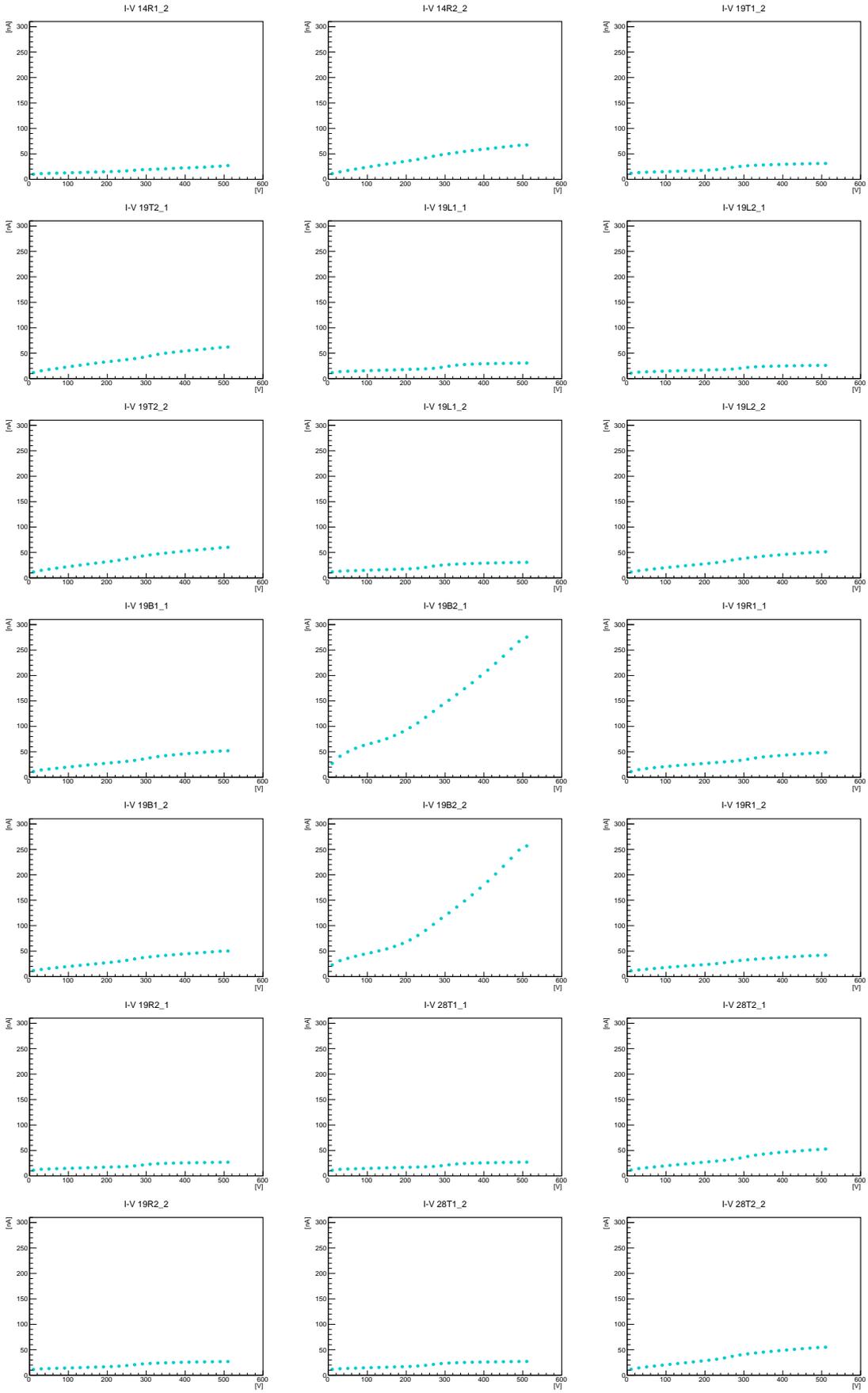
そして1年間一緒に過ごし、切磋琢磨した同期の今井さん、杉山さん、田頭さん、渡辺さんにも感謝申し上げます。みんなと過ごした日々はとても楽しかったです。みんなと院を進めることを嬉しく思います。本研究を進めるにあたり、支えてくださった全ての方に重ねてお礼申し上げます。

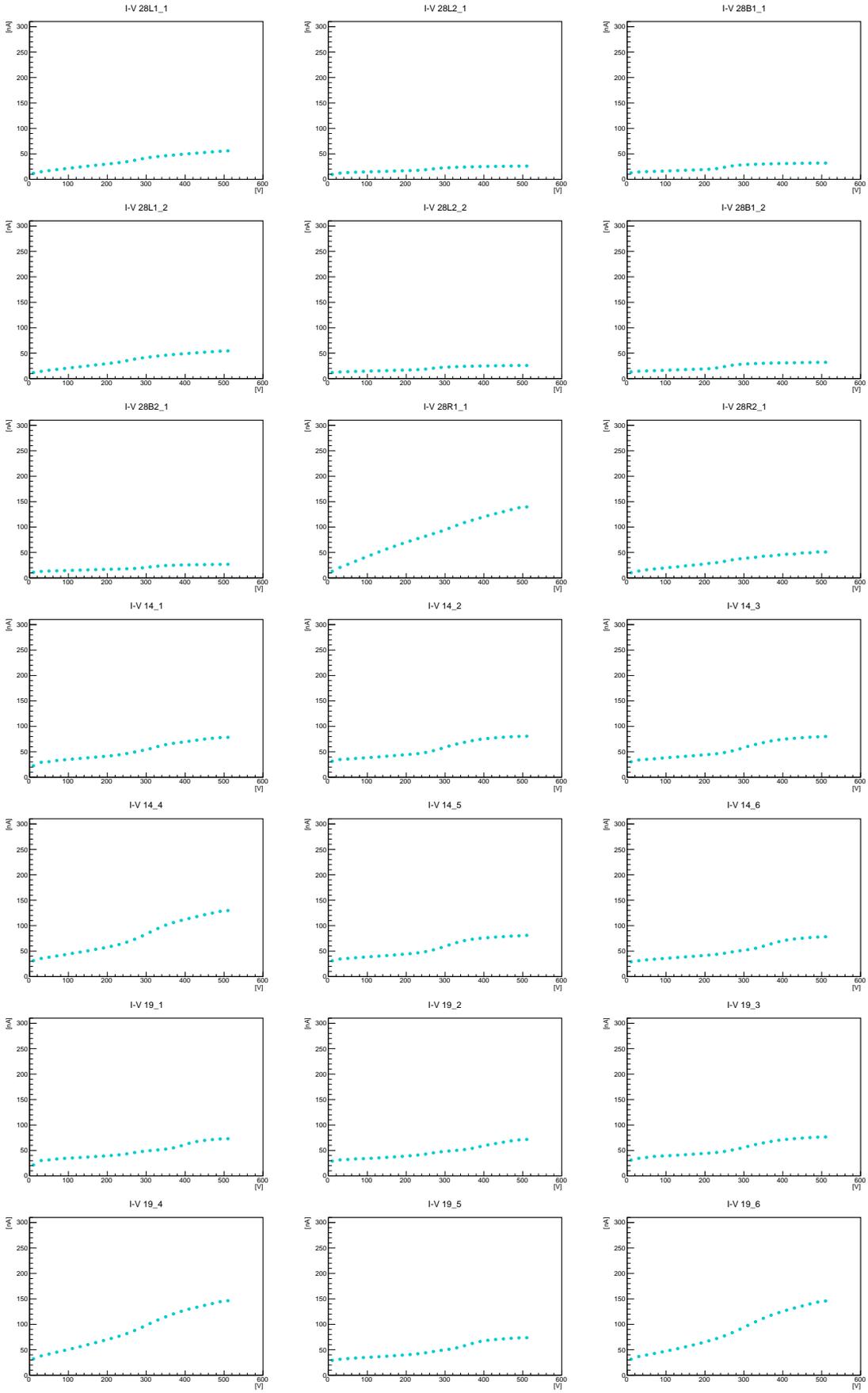
付録A 全シリコンのI-V特性

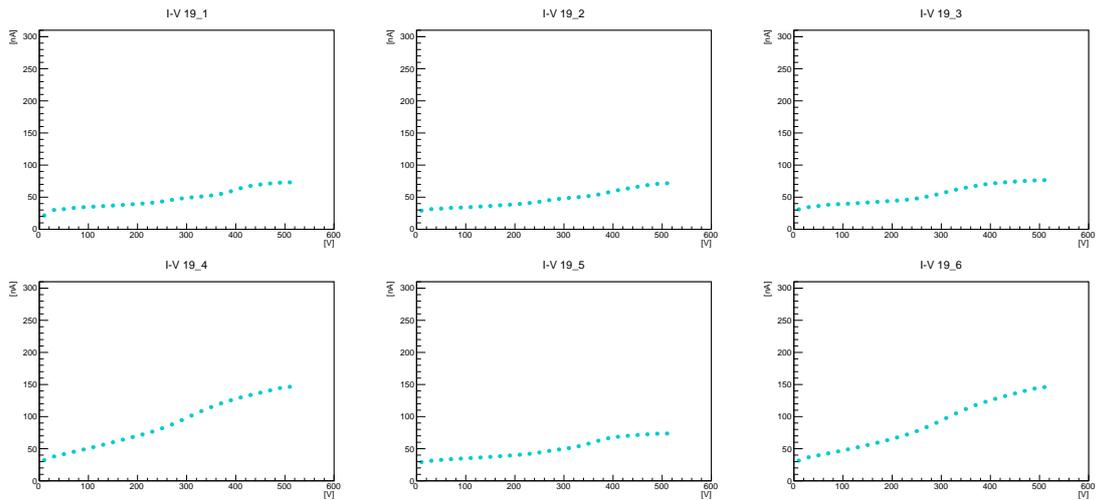
全てのシリコンについて行った測定の結果をここに記載する。

A.1 軸を揃えた結果



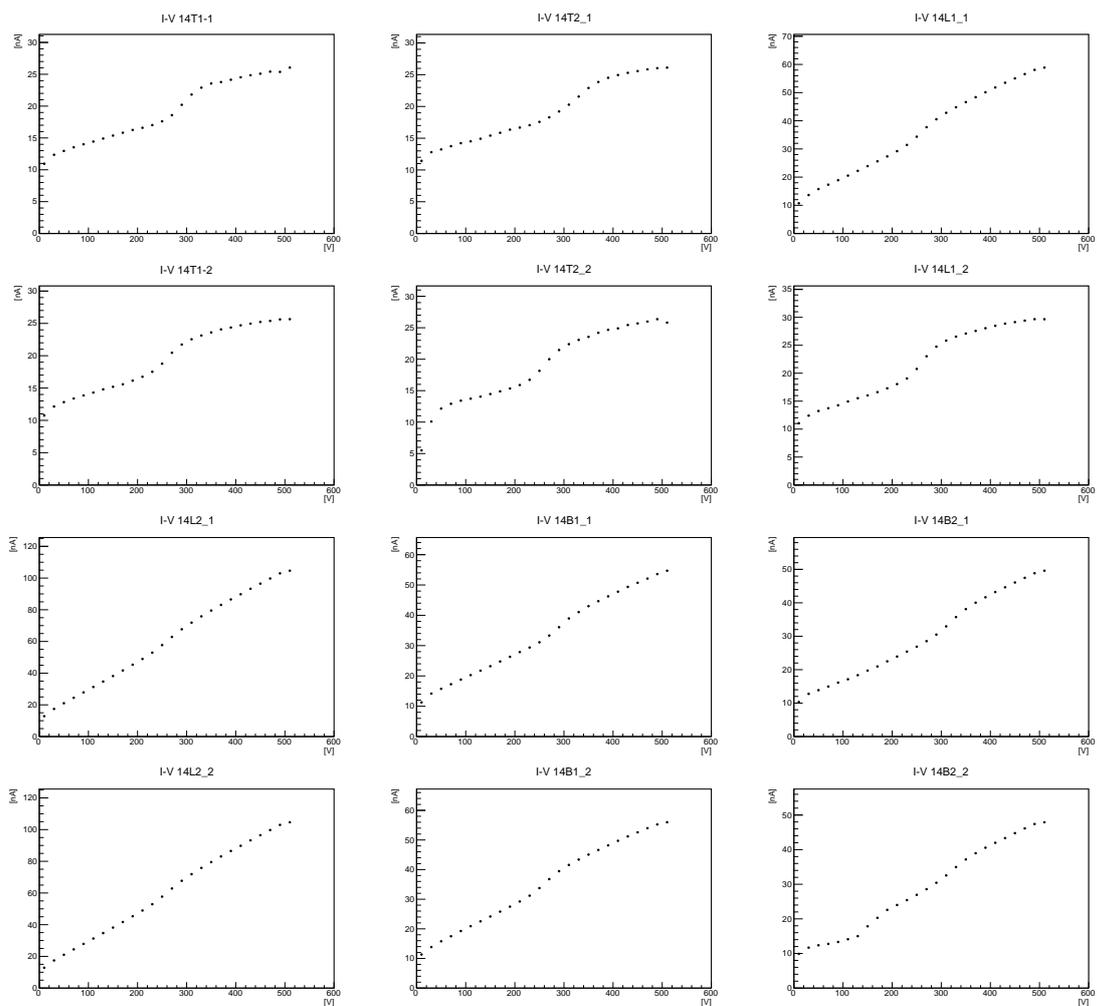


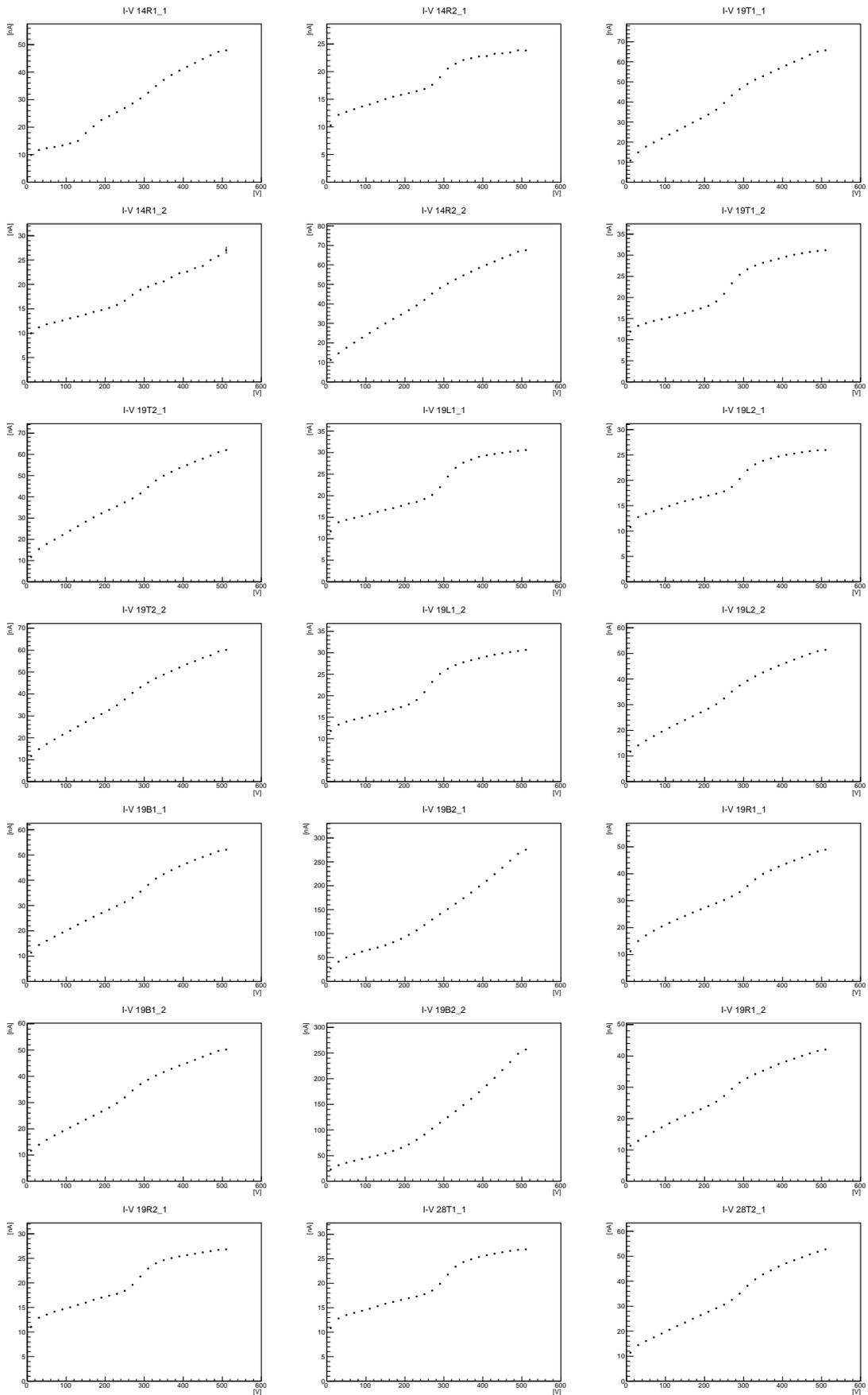


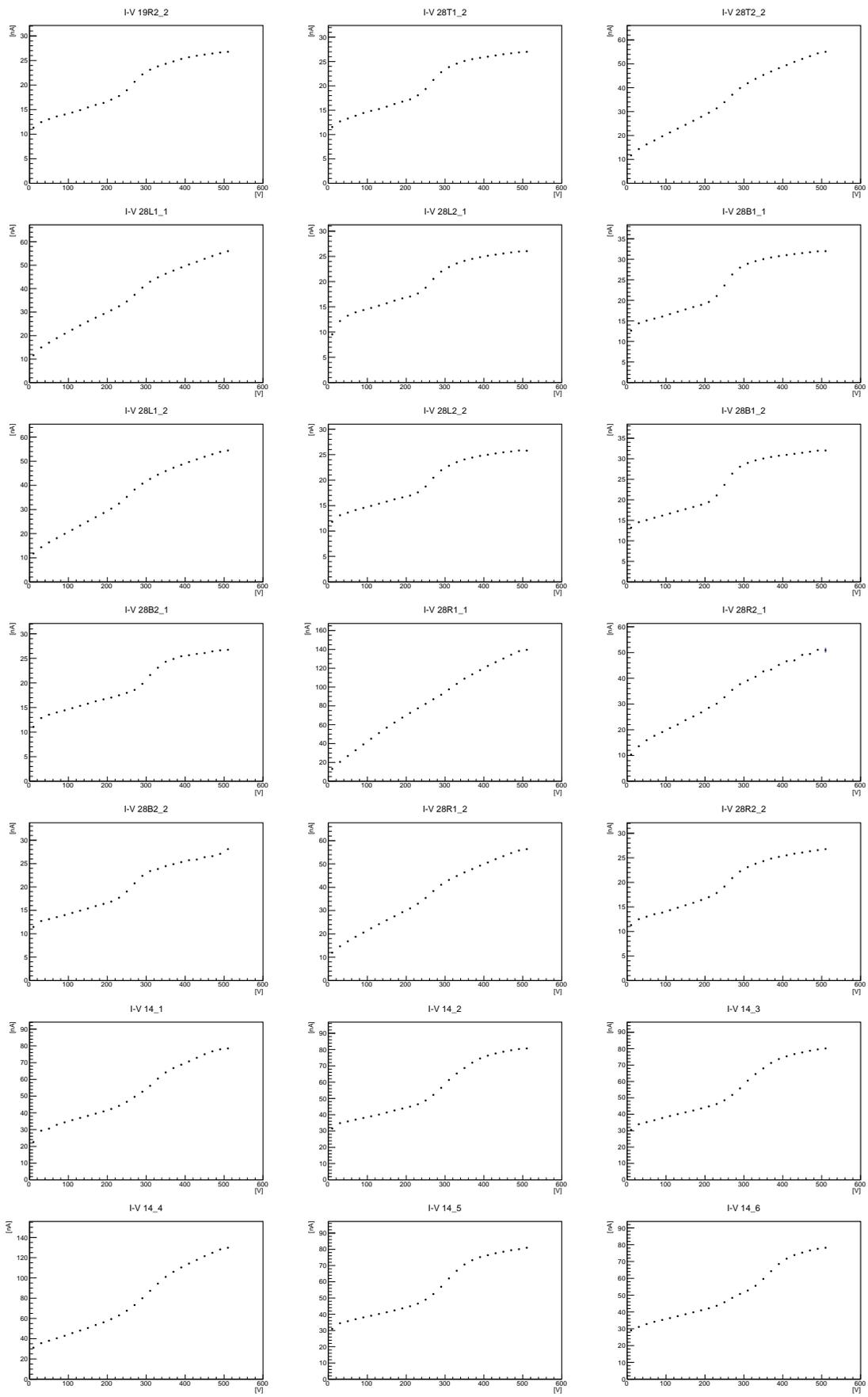


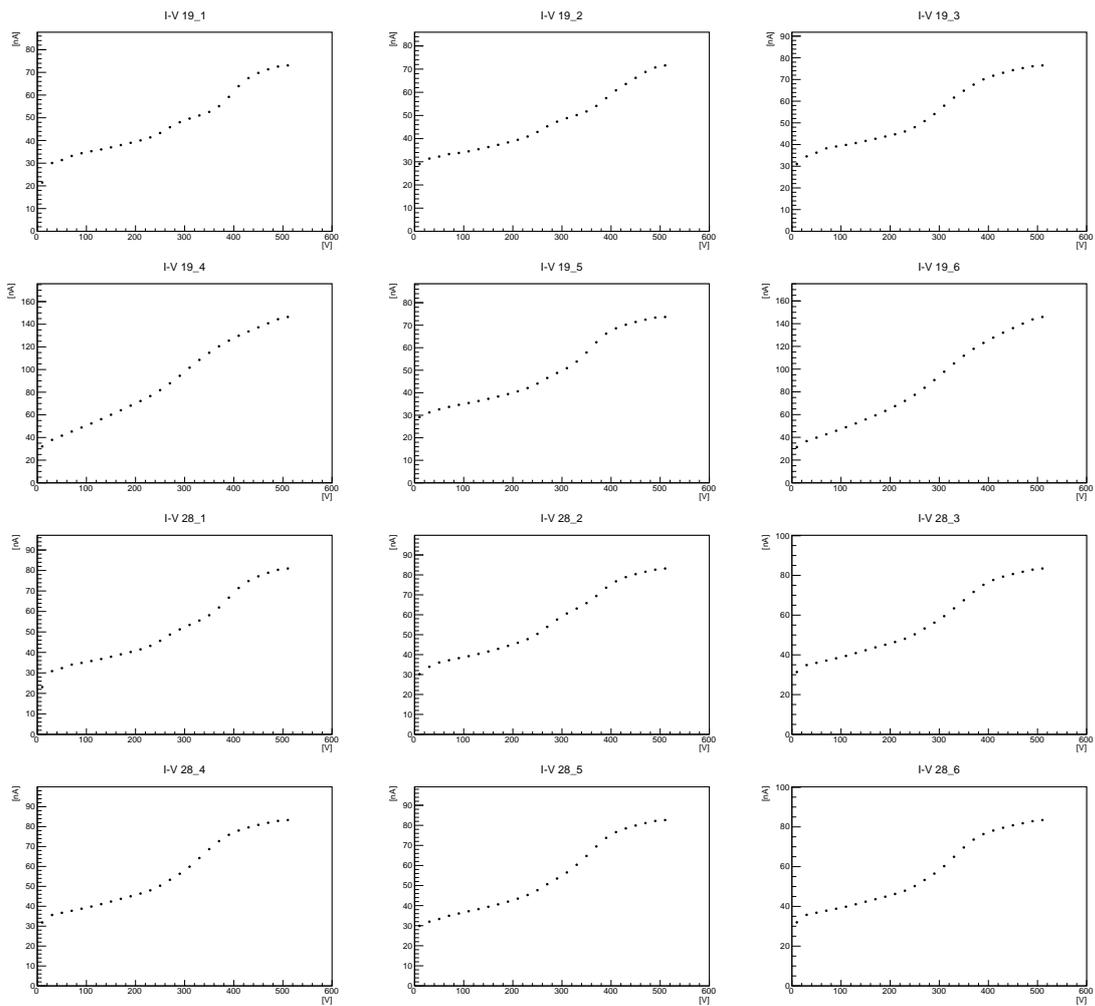
A.2 軸を揃えていないもの

グラフの形状が見えやすい、軸を揃えていないものを以下に記載する。



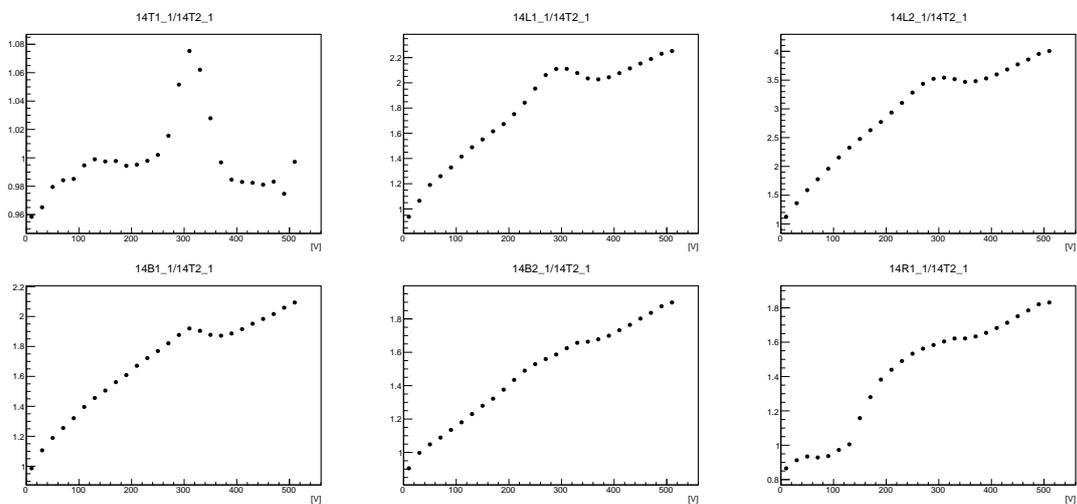


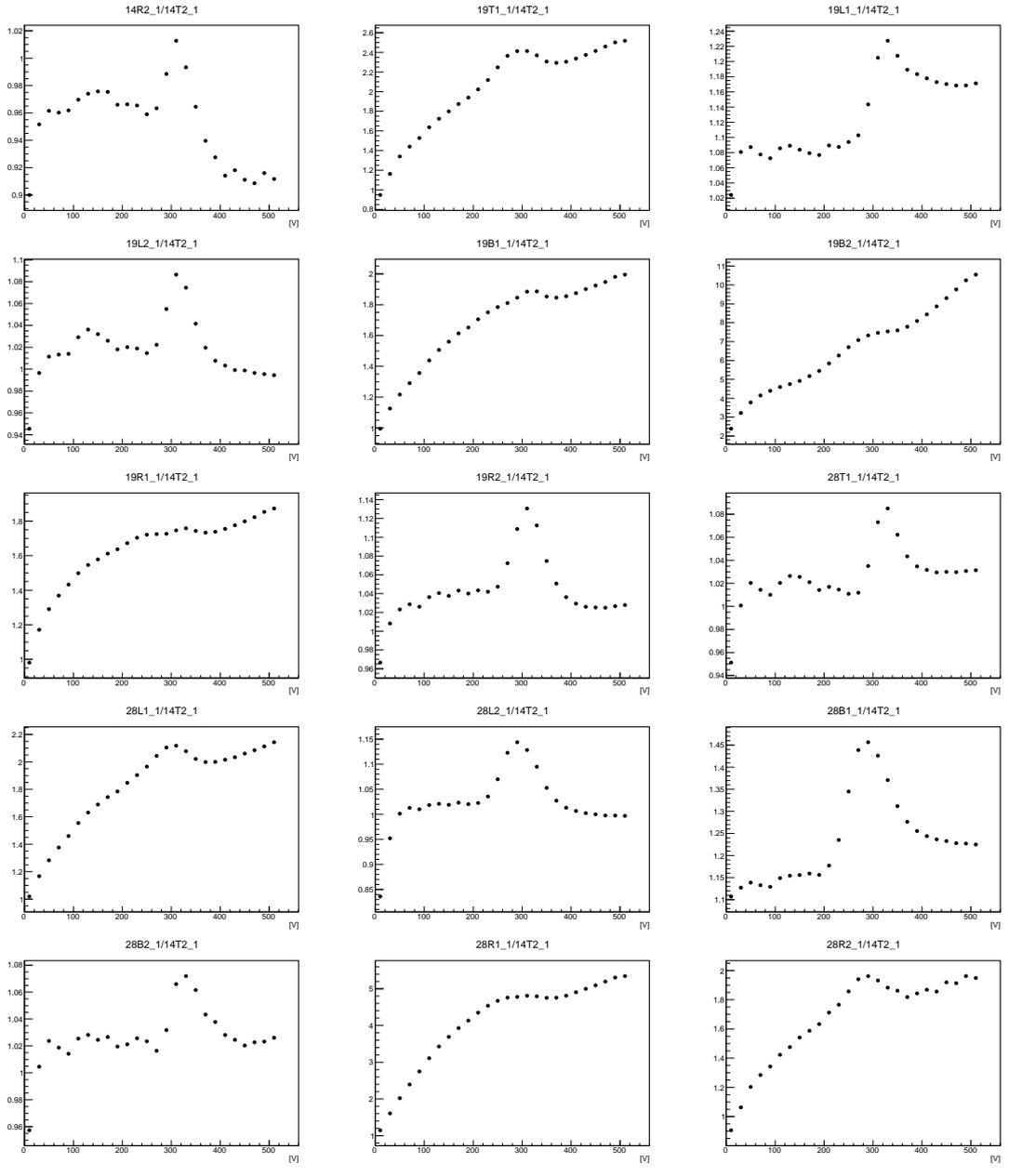




A.3 シリコン同士の結果の相関

14T2の結果で他のシリコンの結果を割ったグラフ。

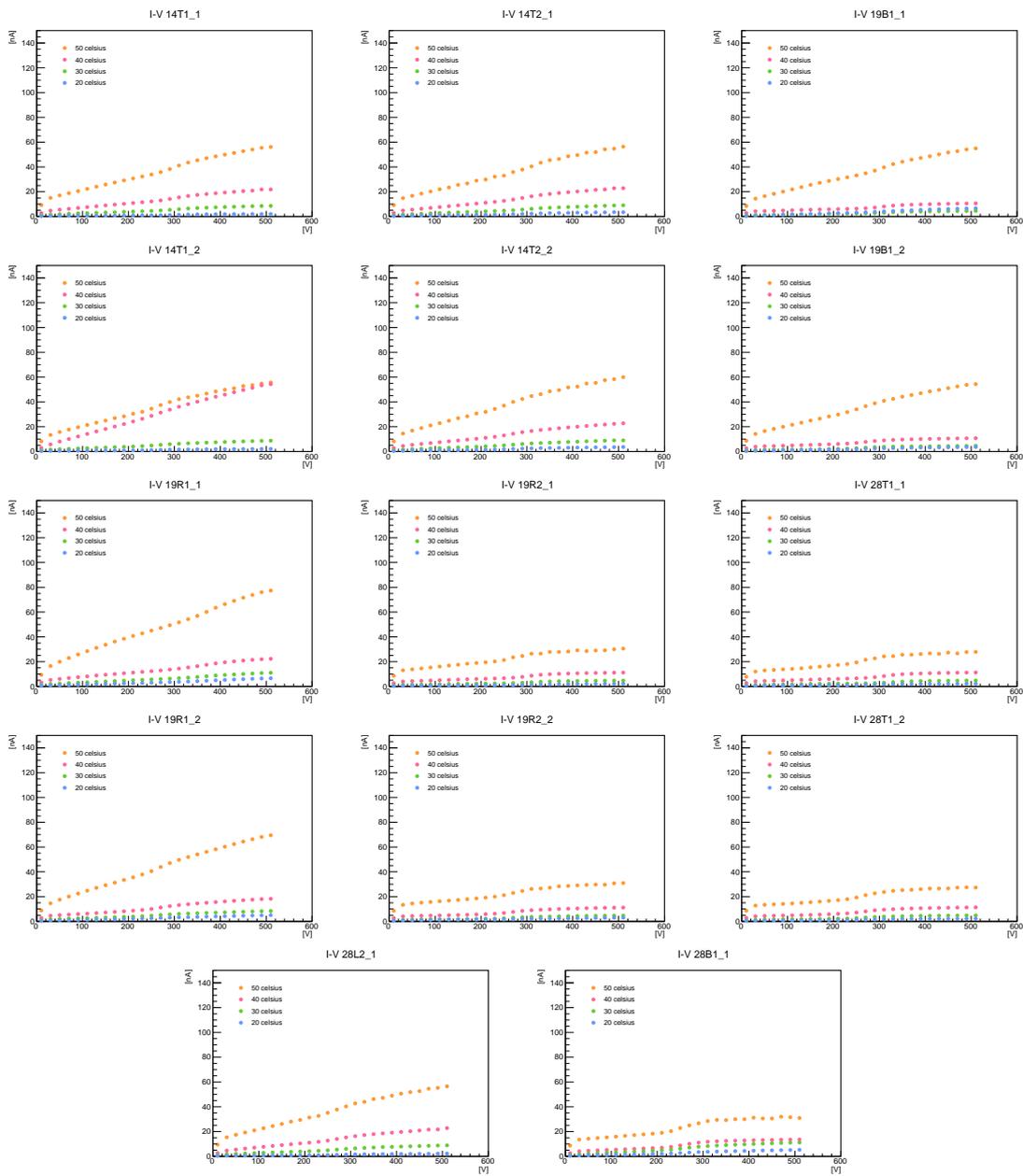


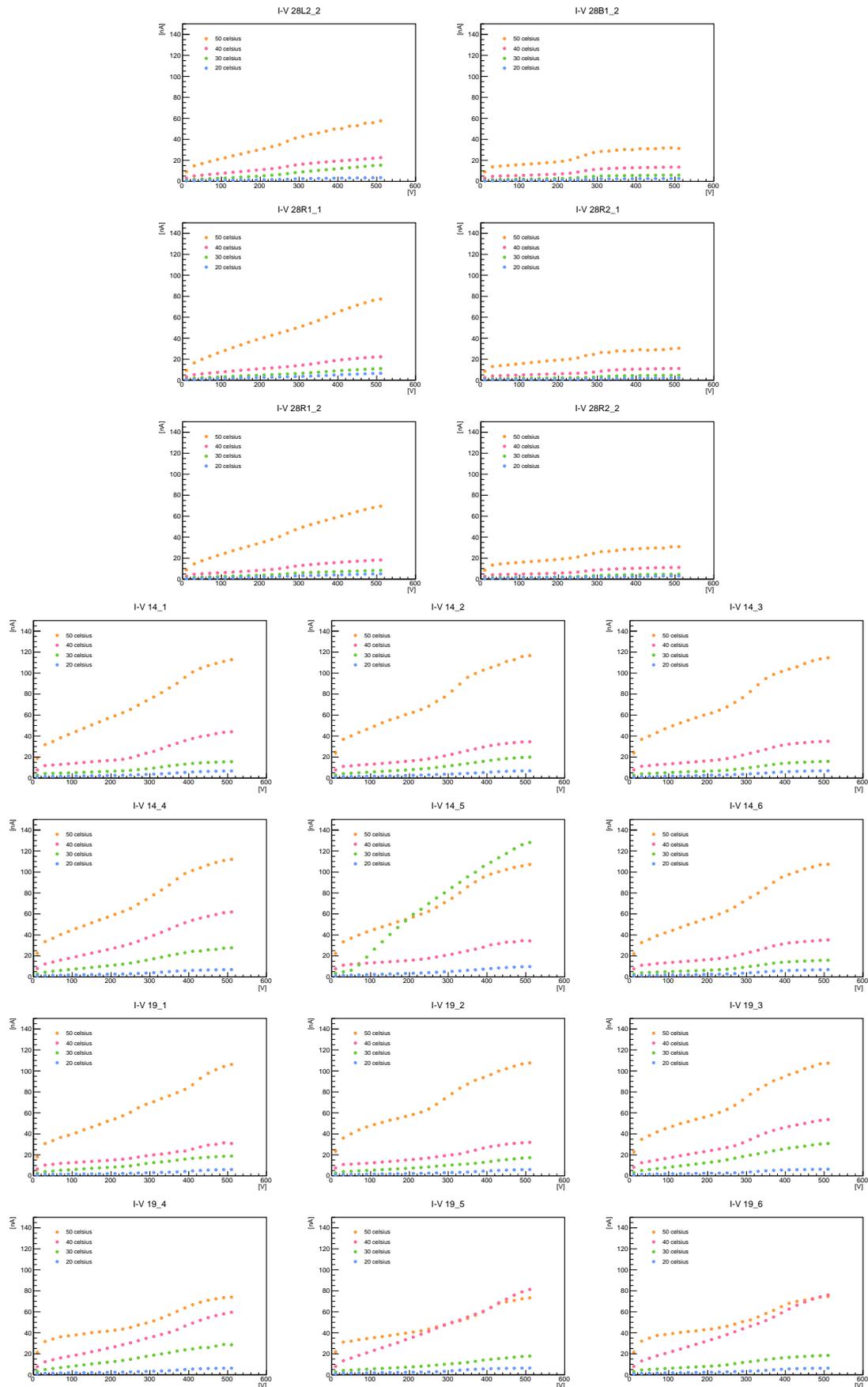


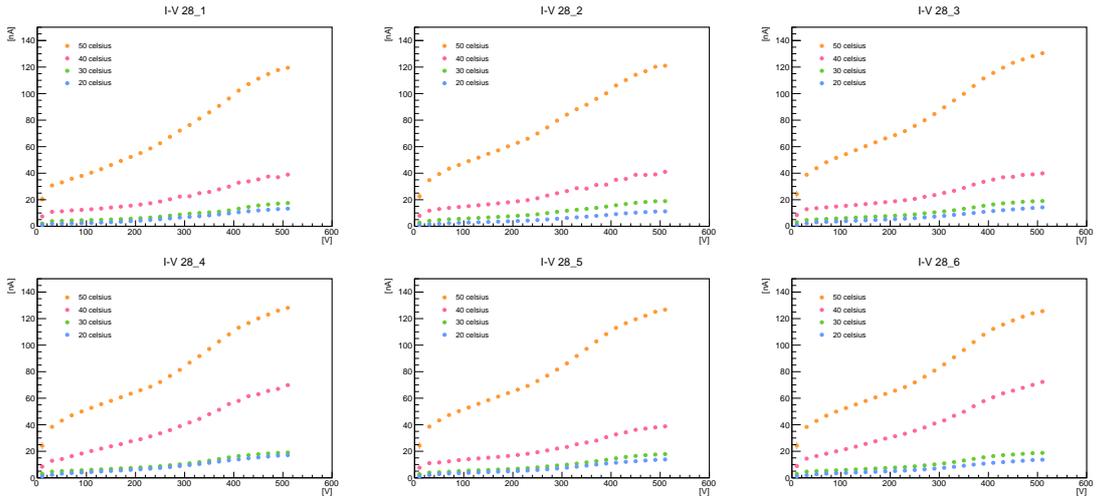
付録B 温度依存性の測定結果

シリコン周辺の温度を 20,30,40,50 °C で一定に保った状態で測定した結果。

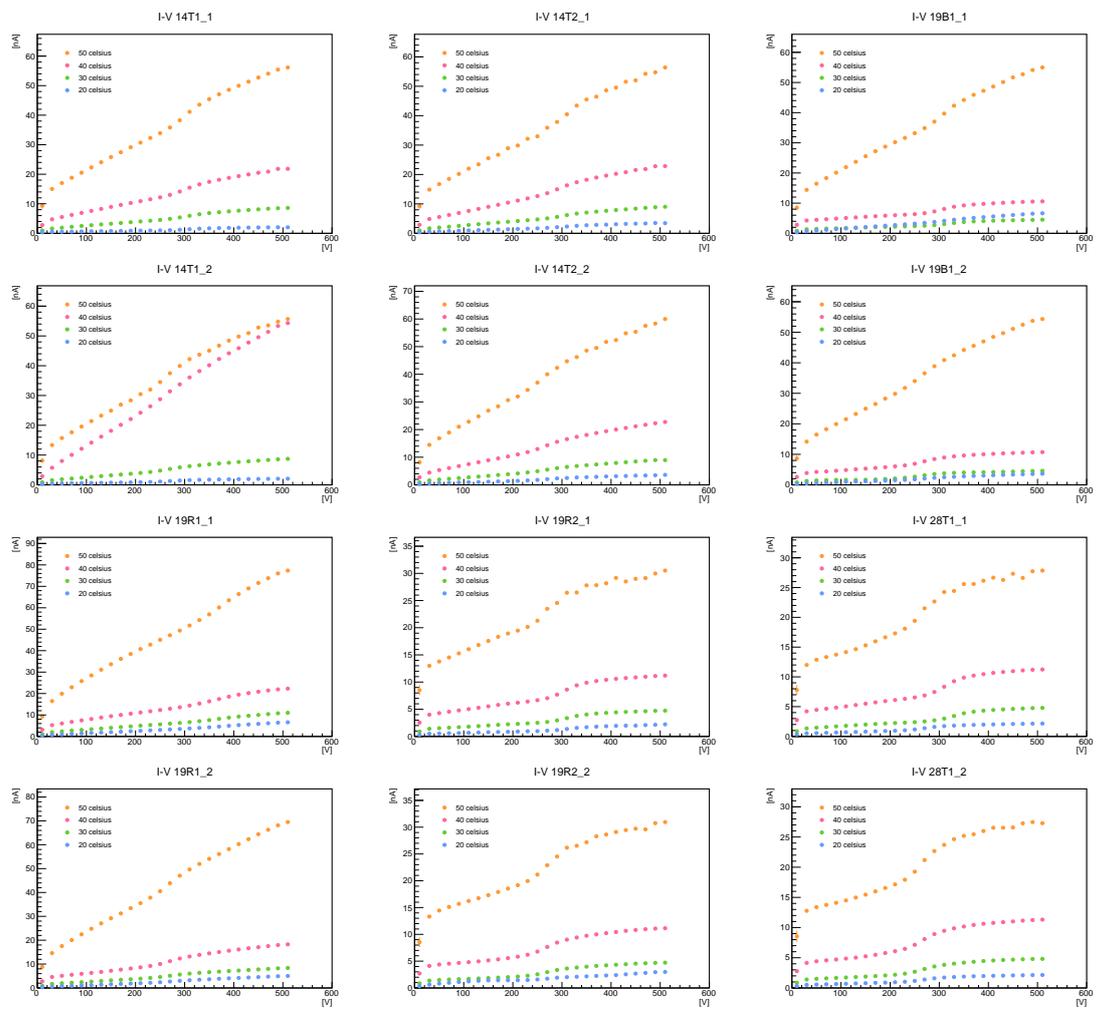
B.1 軸を揃えた結果

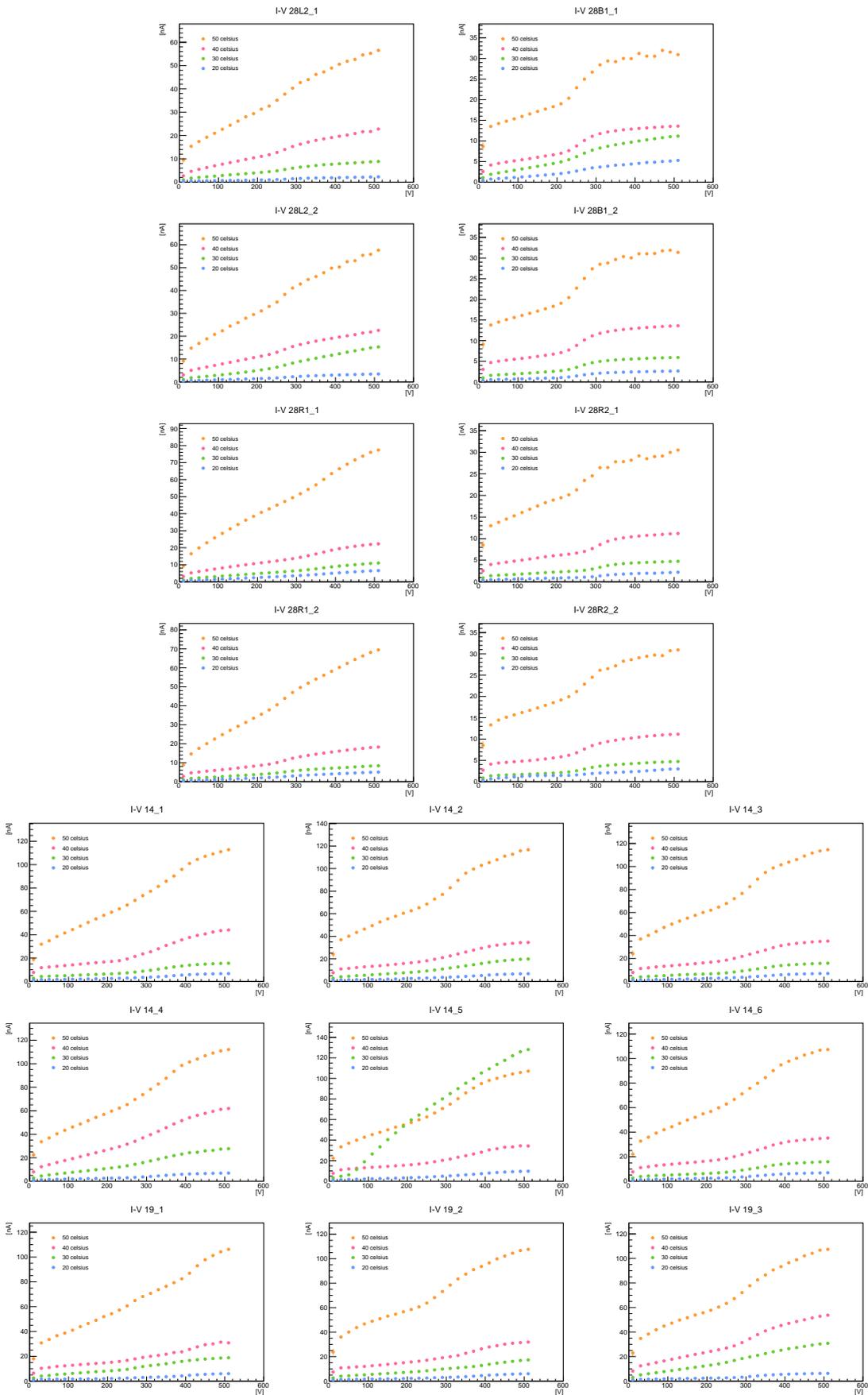


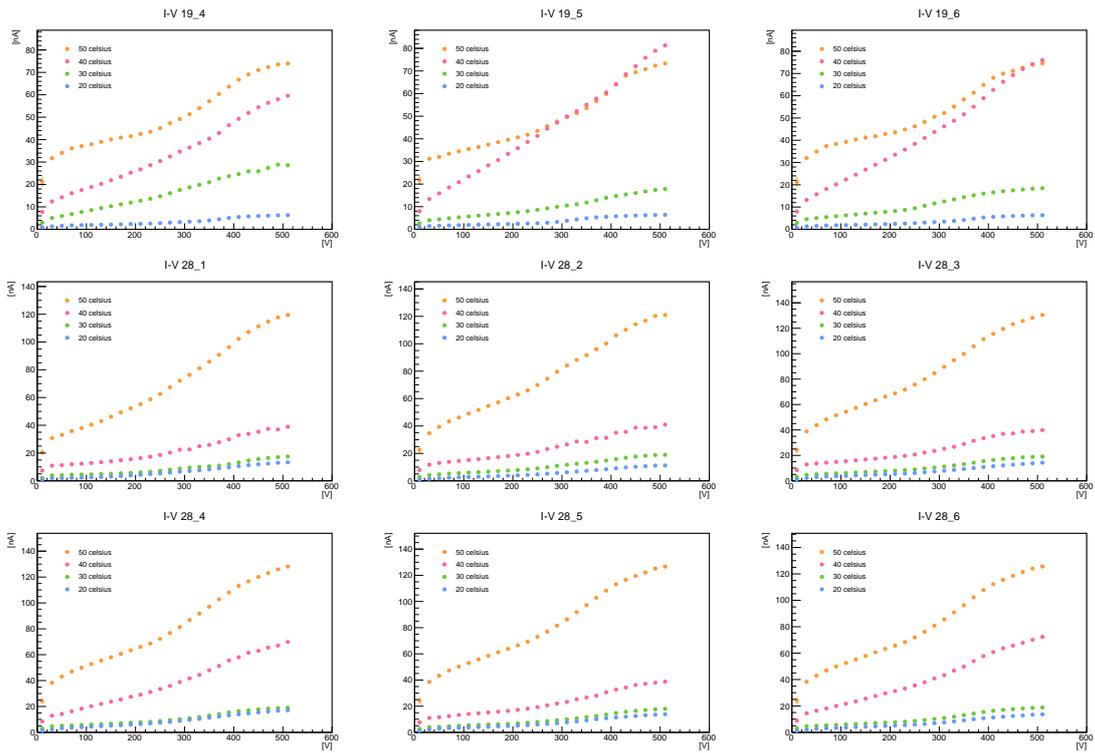




B.2 軸を揃えていないもの







B.3 温度による相関

