

AXEL 実験

1000L 検出器実装に向けた 昇圧回路の低バックグラウンド高効率化

卒業論文

C1SB2117 林逸揮エヴァン

東北大学 理学部物理学科

素粒子・核物理学講座 素粒子実験（加速器）研究室

2025 年 5 月 31 日

概要

標準模型の素粒子のうち、最も謎に囲まれているものはニュートリノだと言っても過言ではない。ニュートリノは電荷を持ってないレプトンで、電磁気や強い相互作用の影響を受けないため、弱い核力と重力でしか他の粒子と相互作用しない。したがって、宇宙がニュートリノで多く満ちていることに関わらず、ニュートリノは物質とほぼ反応せずに透過するため、その性質をプローブするのが難しい。

その困難に立ち向かった結果、近代では、ニュートリノ振動の発見よりニュートリノは質量を持つことが明らかになった。しかし、その質量の絶対値はまだ測定されなく、その上限は軽い素粒子である電子より 10^6 程度も小さいので、他の素粒子と同じようにヒッグスモデルで質量の獲得を説明するには不自然だと指摘されている。

ここで、ニュートリノは中性粒子であることを注目すると、マヨラナ粒子である可能性があることがわかる。仮にそうであれば、シーソー機構で質量固有値が非常に小さくなり、ニュートリノの軽い質量の説明ができる。したがって、ニュートリノのマヨラナ性を証明するために世界中で実験が活発に行われている。そのうちの一つの探索方法としては、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$) の探索が注目されており、そのうちの一つの実験は A Xenon ElectroLuminescence Detector Experiment (AXEL 実験)である。

AXEL 実験では、エネルギー分解能が優れている Xe-136 ガスを用いた Time Projection Chamber (TPC) 検出器で electroluminescence 効果を引き起こして $0\nu\beta\beta$ の探索を行っており、最終的には 1000L 検出器に 8atm のガスを入れる予定である。現在、その検出器の実装のための装置開発と 180L 試作品の運用は同時に行なわれている。

本研究では、AXEL 実験 1000L 検出器の実装に向け、必要な電場を生み出す昇圧回路の効率化が行われた。

目次

第1章	序論
	i. ニュートリノ
	ii. マヨナラ質量およびシーソー機構
第2章	AXEL 実験
	i. ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊
	ii. エレクトロルミネッセンス
	iii. 検出器の概要
	iv. コッククロフト・ウォルトン回路
	v. 昇圧回路の改善候補
第3章	実験 1：昇圧回路の効率測定
	i. 目的
	ii. 方法
	iii. 結果
	iv. 考察
第4章	シミュレーション：昇圧回路の改善候補の選定
	i. 目的
	ii. 方法
	iii. 結果
	iv. 考察
第5章	実験 2：FPC コンデンサー用昇圧回路の動作確認
	i. 目的
	ii. 設計過程
	iii. 方法
	iv. 結果および考察
第6章	結論
第7章	今後の展望
	謝辞
	参考文献

第 1 章：序論

1.1 ニュートリノ

素粒子は、スピンの整数の半分となってフェルミ＝ディラック統計に従い、物質を構成するフェルミオンおよび、スピンの整数となってボース＝アインシュタイン統計に従い、相互作用を伝えるボソンの 2 種類に分けられる。素粒子のフェルミオンのうち、スピンの $\frac{1}{2}$ で電荷を持たないものがニュートリノである。

ニュートリノは β 崩壊における β 線のエネルギースペクトルがデルタ関数的ではなくて連続的であることを説明するために、1931 年にパウリによって存在が提案された。その存在は 1956 年にカワンやライネスによって実験的に確認されたが、現在に至ってもニュートリノについて様々な謎が残っている。標準模型では、ニュートリノは 3 世代が存在し、それぞれの質量は 0 とされている。しかし、これまでのニュートリノに関する実験でニュートリノ振動と言う移動中にニュートリノの世代が振動するように変わる現象が確認されており、その現象を説明するためにはニュートリノの質量は 0 ではない有限値を取らなければならない。一方、実験結果により、ニュートリノは常に光速に近い運動をするため、その質量は物凄く小さいとわかった。その小さい質量は他の素粒子の質量の起源であるヒッグス場だけでは説明できなく、更なる物理を開拓する道になると期待されている。

また、ニュートリノは重力相互作用および弱い相互作用しか受けず、質量が物凄く軽いため、右手系のニュートリノおよび左手系の反ニュートリノはまだ測定されず、その存在も謎である。

その他に、ニュートリノの質量の絶対値や、世代間の質量階層性も理解されていないため、ニュートリノの研究は非常に重要である。

1.2 マヨナラ質量およびシーソー機構

ニュートリノの非常に小さい質量を説明できる仮説として、ニュートリノがマヨナラ粒子であることが特に期待されている。マヨナラ粒子とは、電荷（または色荷）の符号が逆となることより、粒子と反粒子が明らかに別粒子である電子やクォークなどのディラック粒子と異なり、反粒子が粒子の別状態であるフェルミオンのことを指す。電荷と色荷を持たないニュートリノは、マヨナラ粒子である可能性がある。

もしそうであれば、右手系ニュートリノが発見されていないことが説明できる上に、以下のようにニュートリノは質量を得ることができる。

ニュートリノを 4 成分ディラックスピノール $\psi = \begin{pmatrix} \psi_L \\ \psi_R \end{pmatrix}$ で表して荷電共役変換 C を行くと、

$$\begin{aligned}\hat{C}: \psi &\rightarrow \psi^C \equiv C\bar{\psi}^T = -\gamma^0 C\psi^* \\ &= \begin{pmatrix} 0 & -i\sigma_2 \\ i\sigma_2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_L^* \\ \psi_R^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -i\sigma_2\psi_R^* \\ i\sigma_2\psi_L^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \psi_R^C \\ \psi_L^C \end{pmatrix} \\ C &= i\gamma^0\gamma^2\end{aligned}$$

が得られる。ニュートリノがマヨナラ粒子であれば、

$$\psi = \begin{pmatrix} \psi_L \\ \psi_R \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \psi_R^C \\ \psi_L^C \end{pmatrix}$$

と書けるので、ディラックスピノールは

$$\psi = \begin{pmatrix} \psi_L \\ \psi_L^C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \psi_R^C \\ \psi_R \end{pmatrix}$$

と表せる。ここで、ディラック粒子に質量を与えるラグランジアンは質量項は

$$-\mathcal{L}_D = m\bar{\psi}\psi = m(\bar{\psi}_L\psi_R + \bar{\psi}_R\psi_L)$$

となり、左手系粒子と右手系粒子の両者が必要であるが、マヨナラ粒子であれば、ラグランジアンは質量項は

$$-\mathcal{L}_M = m\bar{\psi}\psi = m_L(\bar{\psi}_L\psi_L^C + \bar{\psi}_L^C\psi_L) \text{ or } m_R(\bar{\psi}_R\psi_R^C + \bar{\psi}_R^C\psi_R)$$

となり、片方だけで質量を得ることができる。また、左手系粒子と右手系粒子に異なる質量を付けることができる。

ラグランジアンは質量項はその重ね合わせ

$$\begin{aligned}
-\mathcal{L}_{mass} &= m_D(\bar{\psi}_L\psi_R + \bar{\psi}_R\psi_L) + \frac{m_L}{2}(\bar{\psi}_L\psi_L^c + \bar{\psi}_L^c\psi_L) + \frac{m_R}{2}(\bar{\psi}_R\psi_R^c + \bar{\psi}_R^c\psi_R) \\
&= m_D(\bar{\phi}\phi + \bar{\phi}\phi) + m_L\bar{\phi}\phi + m_R\bar{\phi}\phi = \bar{V}MV \\
\phi &= \frac{\psi_L + \psi_L^c}{\sqrt{2}}, \quad \phi = \frac{\psi_R + \psi_R^c}{\sqrt{2}}, \quad V = \begin{pmatrix} \phi \\ \phi \end{pmatrix}, \quad M = \begin{pmatrix} m_L & m_D \\ m_D & m_R \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

となる。質量行列 M の固有値はニュートリノの質量の絶対値に対応し、計算すると、

$$\lambda_{\pm} = \frac{m_R + m_L}{2} \pm \frac{m_R - m_L}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{2m_D}{m_R - m_L}\right)^2}$$

と求まる。ここで、 $m_R \gg m_D \gg m_L$ と仮定すると、 $\lambda_+ = m_R$, $\lambda_- = \frac{m_D^2}{m_R}$ と計算される。つまり、ニュートリノがマヨナラ粒子で、右手系ニュートリノのマヨナラ質量が非常に大きければ、左手系ニュートリノの非常に小さい質量を説明できる。また、右手系ニュートリノはその質量が非常に大きいことより、生成するのが難しいことが、まだ発見されていないことの説明になる。

第2章：AXEL 実験

2.1 ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊

原子核は陽子間の電磁気相互作用による斥力に対し、核子間の強い相互作用による引力で結合されているため、両者のつり合いを上手く取って安定な原子核を形成するためには、原子核中の中性子と陽子の割合が適切な値を取らなければならない。その割合が最適値からずれすぎると、原子核が不安定となる。質量番号 A 、原子番号 Z の不安定な原子核に対して、質量番号 A 、原子番号 $Z \pm 1$ の原子核の質量がより小さい（エネルギー的により安定する）場合には、弱い相互作用による以下の β 崩壊反応が起こる。

$$\beta^-: n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$\beta^+: p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$

この過程は安定原子核が形成されるまでに繰り返して起こる。エネルギーの保存則より、娘核が親核より質量が大きい場合には、 β 崩壊反応は起こらないが、例えそうであろうとも、娘核の娘核（つまり質量番号 A 、原子番号 $Z \pm 2$ の原子核）が親核より質量が小さい場合には、2つの β 崩壊反応が同時に起こる二重 β 崩壊反応が起こりうる。

通常、二重 β 崩壊反応では電子2個および反電子ニュートリノ2個が放出されるため、 $2\nu\beta\beta$ と呼ばれる。一方、ニュートリノがマヨナラ粒子であれば、2個の反電子ニュートリノは放出される前に対消滅し、電子2個だけが放出されるニュートリノを伴わない二重 β 崩壊（ $0\nu\beta\beta$ ）も起こりうる。



図1： $2\nu\beta\beta$ （左）、 $0\nu\beta\beta$ （右）の Feynmann Diagram

$2\nu\beta\beta$ と $0\nu\beta\beta$ によって放出されるエネルギーは同じだが、前者では反電子ニュートリノ 2 個と電子 2 個の運動エネルギーで分けられているため、電子のエネルギースペクトルを見ると、以下の図 2 のような右側にテールを持つ連続的な形となる。一方、後者ではエネルギーは電子 2 個の運動エネルギーとなり、4 次元運動量の保存則より、各電子の運動エネルギーが一律に決まっているため、そのエネルギースペクトルは鋭いピークとして現れる。Xe-136 の場合では、 $0\nu\beta\beta$ の Q 値（放出された電子の運動エネルギー）は 2.458 MeV である。

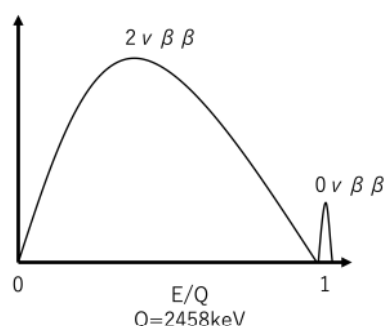


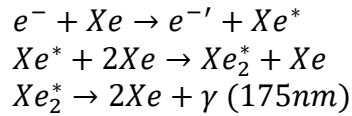
図 2：二重 β 崩壊反応のエネルギースペクトル

したがって、 $0\nu\beta\beta$ によるピークを測定できれば、ニュートリノのマヨナラ性を証明できる。しかし、 $0\nu\beta\beta$ の起こる確率は非常に低く、 $0\nu\beta\beta$ による Xe-136 の半減期は 2.3×10^{26} [yr] より大きいと KamLAND-Zen の実験結果¹によって計算された。一方、 $2\nu\beta\beta$ による Xe-136 の半減期は 2.18×10^{21} [yr] と知られており、 $0\nu\beta\beta$ より 5 桁以上速く起こり、従来の実験の分解能では、 $0\nu\beta\beta$ ピークが $2\nu\beta\beta$ のテールに埋められて測定不可能となる。したがって、 $0\nu\beta\beta$ を測定するためには、大量の崩壊核を用意した上で、背景事象の除去も行い、エネルギー分解能を高める必要がある。AXEL 実験では、その 3 つの条件を同時に達成するために、1kL、8atm の高圧 Xe-136 ガスの Time Projection Chamber (TPC) を用意して、electroluminescence 効果を用いて探索を行う。

¹ 参考文献 3

2.2 Electroluminescence 効果

物質に十分強い電場をかけると、加速された自由電子は物質の原子と反応して光を出す。この現象は **electroluminescence** と呼ばれる。Xe ガスの場合では、3kV/cm/bar の電場の影響で、以下の反応が起こる。



放出された光子のエネルギーは Xe 原子のエネルギー準位差と異なるため、吸収されずに透過し、透明性が成り立ち、検出器で信号として読み取れる。

また、電子 1 個が反応して、電子 1 個と光子 1 個が放出されるため、出力信号（光子の数）は入力信号（入射電子の数）と比例して、線形性が成り立ち、エネルギー分解能は低下せずに保たれる。

一方、光子はあらゆる方向に放出されるため、捕獲するのが難しい。したがって、AXEL 実験では、**electroluminescence** を検出装置（**Electroluminescent Light Collection Cell, ELCC**）内の幅 5mm に起こして検出することにした。

2.3 検出器の概要

AXEL 実験では、最終的に 8atm の Xe-136 ガスが入った 1000L Time Projection Chamber (TPC) 検出器が用いられる予定であり、その概要図は次の図 3 となる。

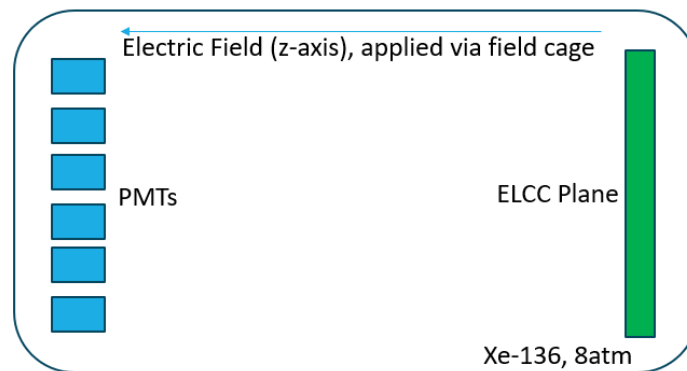


図 3：AXEL 実験 1000L 検出器の概要図

検出器の中に 2 重 β 崩壊事象が起こると、放出された電子は電場によって加速されて ELCC 面にドリフトする。移動中、その電子はガス原子と電磁気相互作用して

シンチレーション光を放出する。放出された光子は Photo Multiplier Tube (PMT) によって検出される。

電子が ELCC 面に到着すると、ELCC 内のより強い電場によって electroluminescence 効果が引き起こされ、EL 光が放出される。この EL 光は ELCC によって捕獲される。拡散が起こされる前に ELCC 面にドリフトできた場合、イベントの x, y 座標は EL 光を検出した ELCC の位置に対応する。また、PMT によってシンチレーション光が最初に検出された時刻がイベントの発生時刻とすると、ドリフト電場の強さがわかるので、イベントの z 座標が次式のように計算される。なお、拡散が起こされる前に ELCC 面にドリフトさせるための最低電位差が 0.1kV/cm/bar となり、 8atm のガス、 80.5cm のフィールドケージ長さに換算すると 76.4kV に対応する。

$$\begin{aligned}T &= (\gamma - 1)m_e c^2 = eV \\ \therefore \gamma &= \frac{eV + m_e c^2}{m_e c^2} \\ \sqrt{1 - \beta^2} &= \frac{m_e c^2}{eV + m_e c^2} \\ \beta^2 &= 1 - \left(\frac{m_e c^2}{eV + m_e c^2} \right)^2 \\ \beta &= \sqrt{1 - \left(\frac{m_e c^2}{eV + m_e c^2} \right)^2} \\ &= \sqrt{1 - \left(\frac{0.511 \times 10^6}{76.4 \times 10^3 + 0.511 \times 10^6} \right)^2} \\ &= 0.493 [c]\end{aligned}$$

電場は一様なので、平均速度は

$$\langle \beta \rangle = \frac{0.493}{2} [c] = 0.247 [c]$$

したがって、電子が移動した z 距離は

$$\begin{aligned}z &= \beta t = 0.247 \times 3.00 \times 10^8 \times t [m] \\ &= 7.41 \times 10^7 \times t [m]\end{aligned}$$

と計算できる。ここで、 t は ELCC における EL 光の到達時刻と PMT における最初のシンチレーション光の到達時刻の時間差となる。

さらに、これらの情報を用いると、イベントの 3D トラックやエネルギーを再構成することができ、 $0\nu\beta\beta$ に対応しないものは素早くバックグラウンド事象と識別して落とすことが可能である。同じ Q 値を持つ主なバックグラウンド事象としては、 α 線や γ 線のコンプトン散乱が挙げられるが、前者は β 線より物質と強く反応して素早く止められるので、トラックが遥かに短くて簡単に判別できる。同様、後者は複数の反応にかけてエネルギーを落とすため、連続的にエネルギーを落とす β 線と判別できる。AXEL 実験ではこのようにバックグラウンド事象を削り、エネルギー分解能を上げる。

2.4 コッククロフト・ウォルトン回路

2.3 章に述べたように、1000L 検出器では、-76.4kV に相当するドリフト電場が必要である。また、2.2 章に述べたように、ELCC で EL 効果を引き起こすためには、3kV/cm/bar に相当する強い電場も必要である。検出器には高圧ガスを密閉する必要があるため、気密性に悪影響を与える外部への接続が必要な、一般的に使われている外から高電場を印加する high voltage feedthrough の使用は不適切だと考えられる。したがって、検出器内に入る昇圧装置として、Cockcroft-Walton 回路（以下 CW 回路）の使用が妥当だと指摘されている。

CW 回路は、次の図 4 のようなダイオードとコンデンサーから成り立つ回路である。

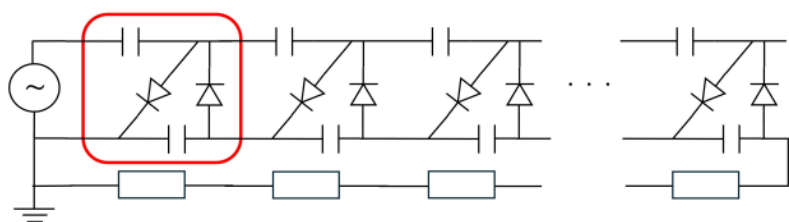


図 4 : cw 回路の概念図

上のコンデンサー列は充電する役割の「押し上げコラム」、下のコンデンサー列は充電されて一定の電位差を保つ役割の「平滑コラム」と呼ばれる。

コンデンサー、ダイオードの個数を $2n$ 個とする。したがって、各コラムの個数は n となり、 n 段 CW 回路と呼ばれる。図 4 のように V_{pp} の peak to peak 電圧を持つ交

流電圧源を印加して、平滑コラムの先をグラウンドへ接続すると、最初の半周期では押し上げコラムの1個目のコンデンサーC1は充電され、次の半周期ではC1は2個目のダイオードD2を通して、平滑コラムの1個目のコンデンサーC2を充電して放電する。

更にその次の半周期では電流がD1、D3を通してC1、C3を充電するが、D2の極性によりC2は放電できない。その繰り返しによって、時間が十分経つと、平滑コラムは常に充電されて、n段CW回路はn個のコンデンサーが並列で接続される状態となり、理想的にはその出力電圧は nV_{pp} となる。AXEL実験では、 $V_{pp} = 2\text{kV}$ を用いて、CW回路の出力電圧を抵抗分割してフィールドケージに印加し、等電場を作り出す。

現在用いられているCW回路は、Xe-136ガスの濃度の低下を防いでアウトガスを押さえるために、ポリイミドベースのフレキシブル基盤 (Flexible Print Circuit, FPC) を用いている。回路の素子には、セラミックコンデンサに Knowles Syfer, 2220Y2K00104KXTWS2, 0.1pF , 耐電圧 2kV を、ダイオードに Micro Commercial Co., FM2000GP を、抵抗チップに日本ファインケム, RG1S, $100\text{M}\Omega$ を用いた。1枚あたりにCW回路が10段、抵抗が $2\text{G}\Omega$ あり、シートをPEEKネジでPTFE治具に固定して昇圧する。

しかし、CW回路には様々なパワーロスが効いており、実験的に求めた出力電圧はnが増えるほど理想出力よりずれる。そのうち、影響が大きいと考えられるのは Ripple Effect (RE) 及び Voltage Drop (VD) と呼ばれる効果である。

コンデンサーの印加された電圧への応答は瞬時ではなく、充電されるまでには時間がかかる。押し上げコラムのコンデンサーが充電されきれると、電場はまた変わってコンデンサーを放電させるので、その出力電圧は振動する。これは Ripple 効果 (RE) と呼ばれる。

その振動は平滑コラムのコンデンサーにも伝わる。先行研究によると、簡単なモデルとして、n段CWのn個目の平滑コラムコンデンサー C_{2n} の出力電圧の振動の peak-to-peak 値は、そのコンデンサーがREによって一周に抵抗ロードに送り出す電荷 q を用いて

$$2\delta V_{2n} = \frac{q}{C_{2n}}$$

と書ける。その1個前のコンデンサー C_{2n-2} は抵抗ロードと n 個目の押し上げコラム C_{2n-1} にそれぞれ q を送り出すので、その出力電圧の振動の peak-to-peak 値は

$$2\delta V_{2n-2} = \frac{2q}{C_{2n-2}}$$

と書ける。一般的に、 i 個目の平滑コラムコンデンサー C_{2n-2i} の出力電圧の振動の peak-to-peak 値は

$$2\delta V_{2n-2i} = \frac{(i+1)q}{C_{2n-2i}}$$

と書け、最終出力電圧の RE の peak-to-peak 値はその足し算

$$2\delta V = q \left(\frac{1}{C_{2n}} + \frac{2}{C_{2n-2}} + \dots \right) = \frac{qn(n+1)}{2C} = \frac{In(n+1)}{2fC}$$

となる。この振動は、電場の一定性に影響するので、できるだけなくしたい効果である。

また、RE の影響で、段数 n を増やすと、下段のコンデンサーが充電されきれなくとも上段のコンデンサーへ電荷を送り出して充電しなければならないので、上段のコンデンサーに蓄える電荷が少なくなり、出力電場が理想より少なくなる。簡単なモデルとして、同じ先行研究によると、平滑コラムの1個目のコンデンサー C_2 の出力電圧の理想とのずれは

$$\Delta V_2 = \frac{qn}{C}$$

と書ける。平滑コラムの各コンデンサーは同じ段階の押し上げコラムのコンデンサーによって充電されるため、平滑コラムの2個目のコンデンサー C_4 の出力電圧の理想とのずれは

$$\Delta V_4 = \frac{q}{C} [2n + (n-1)]$$

となり、一般的には

$$\Delta V_{2i} = \frac{q}{C} [2i + 2(i-1) + \dots + 2(2) + 1]$$

と書ける。したがって、最終出力電圧のドロップはその足し算

$$\Delta V = \frac{q}{C} \left(\frac{2}{3}n^3 + \frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{6}n \right) = \frac{I}{fC} \left(\frac{2}{3}n^3 + \frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{6}n \right)$$

となる。

2.5 昇圧回路の改善候補

RE と VD を防ぐために、CW 回路にもう一列の押し上げコラムを印加して対称化することが有効だと先行研究²によって指摘されている。

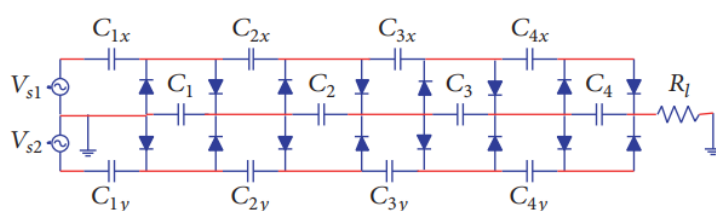


図5：対象化されたCW回路（SCW回路）の回路図

対称化されたCW回路（Symmetrical CW, 以下SCW回路）の平滑コラムをグラウンドに接続し、2つの押し上げコラムに位相が π rad でずれた2つの交流電圧源を印加する。そうすると、上の押し上げコラムが充電されるときに下の押し上げコラムは放電し、下の押し上げコラムが充電されるときに上の押し上げコラムは放電するので、平滑コラムには常に電荷が送られており、VD効果を防ぐことができる。また、各コンデンサの応答パターン（REの形）が同じであれば、平滑コラムでは2つの押し上げコラムによるREが上手く消し合う。

しかし、CW回路の各段の間に2kVの電位差がかけられており、十分な耐電圧能を持つコンデンサの候補としては、セラミックコンデンサしか発売されていない。セラミックコンデンサには自然放射線同位体が多く含まれており、80段CW回路では、コンデンサによるBi-214系列の放射線量は228.41 [mBq] (lower 1 σ) から240.98 [mBq] (upper 1 σ)、Ti-208系列の放射線量は53.226 [mBq] (lower 1 σ) から68.313 [mBq] (upper 1 σ) とそれぞれグループメンバーによって測定されている。SCW回路へ拡張させると、コンデンサの個数が1.5倍となり、放射線量も1.5倍となる

² 参考文献4

ので、エネルギー分解能が落ちると予想される。したがって、本研究では、SCW まで行かずに、以下の改善方法も考慮される。

- **Modified CW:** 最初の 10 段のコンデンサーの容量を $0.15\ \mu\text{F}$ に増やす
- **Partially Modified CW:** 最初の 10 段の押し上げコラムのコンデンサーの容量を $0.15\ \mu\text{F}$ に増やす
- **Alternatively Modified CW:** 最初の 10 段以外のコンデンサーの容量を $0.082\ \mu\text{F}$ に減らす

本研究では、昇圧回路の改善候補の選定のためにシミュレーションを行い、選定された回路の試作品を設計して動作確認を行った。

第 3 章：実験 1

昇圧回路の効率測定

3.1 目的

本研究では、AXEL 実験の目標電圧の-76.4kV に達成するために、昇圧回路の効率化が目標とされている。その第一歩としては、改善候補との比較を行うために、既存の CW 回路の動作確認を行ってその効率を測定した。

3.2 方法

グループメンバーの先行研究で開発された効率が高い電源を用いて、10 kHz、2kVpp の交流電圧を既存の CW 回路（10, 20, 30, 40, 50 段）に印加した。60 段以上にも測定を行いたかったが、何枚の回路に不備が発見されたため、使えるものは 5 枚だけだった。

測定回路は以下の図 6 のようになった。

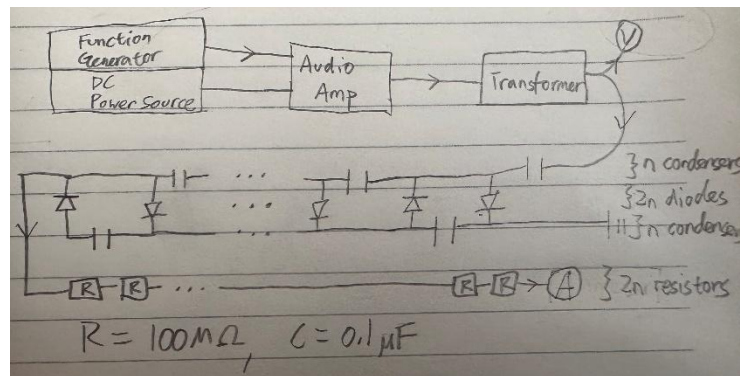


図 6：CW 回路の昇圧効率測定実験の回路図

印加電圧が 2kV となったときの出力電流 I_{out} および Function Generator の出力 V_{FG} を測定して、出力電圧 V_{out} および昇圧効率

$$\eta = \frac{V_{out}}{2n [kV]} \times 100\%$$

を計算した。

3.3 結果

実験 1 の結果は次の表 1 にまとめられる。

表 1：昇圧効率測定実験の結果

段数 n	V_{FG} [mVpp]	V_{out} [kV]	η [%]
10	33.4	-12.00	100
20	29.6	-23.12	96.3
30	25.7	-32.52	90.3
40	21.8	-40.2	83.8
50	18.9	-46.2	77.0

3.4 考察

個数と FG 出力の関係は次の図 7 のようになった。

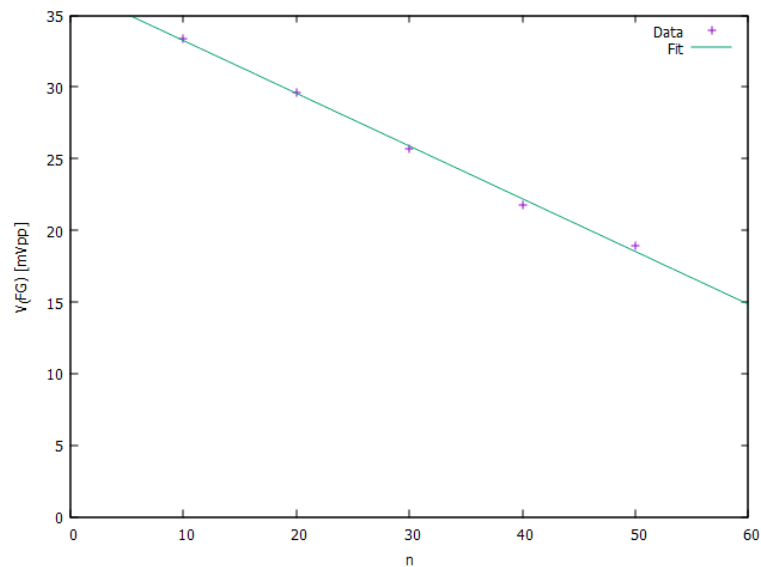


図 7：個数と FG 出力の関係

ここで、フィット関数は $V_{FG} = -0.368n + 36.92$ と得られたが、FG 出力（＝電源に
入力する波形の **peak-to-peak** 値）は現実的に 0 にはならず、かつグラフでは $n \geq 40$
では線形関数からのずれが見え始めたため、この近似は妥当ではないと思われる。

一方、 n が増えるほど、 V_{FG} が低くなることがわかるので、電源の増幅効率が段数
と共に上がる。段数を増やすと、ロードである CW 回路のインピーダンス

$$Z = R - \frac{i}{\omega C}$$

$$= \left((2 \times 10^8 \times n) - i \left(\frac{1}{2\pi \times 10 \times 10^3 \times C} \right) \right) [\Omega]$$

ここで、CW 回路の最終平衡状態は n 個の平滑コイルが並列に接続されることを用いて、容量は

$$C = n \times 0.1 \times 10^{-6} [F]$$

なので、インピーダンスは

$$\begin{aligned} Z &= \left((2 \times 10^8 \times n) - i \left(\frac{1}{2\pi \times 10 \times 10^3 \times n \times 0.1 \times 10^{-6}} \right) \right) [\Omega] \\ &= \left((2 \times 10^8 \times n) - i \left(\frac{1}{2n\pi \times 10^{-3}} \right) \right) [\Omega] \end{aligned}$$

となり、その絶対値は

$$\begin{aligned} |Z| &= \left((2 \times 10^8 \times n)^2 + \left(\frac{1}{2n\pi \times 10^{-3}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} [\Omega] \\ &= \left((4n^2 \times 10^{16}) + \left(\frac{1}{4n^2\pi^2} \right) \times 10^6 \right)^{\frac{1}{2}} [\Omega] \\ &\sim 2n \times 10^8 [\Omega] \end{aligned}$$

となり、 n が増えるほどこの近似がより良くなり、抵抗チェーンだけで決まる。したがって、FG の観点から見ると、段数が増えれば増えるほど抵抗が大きくなり、抵抗で消費する電力の割合（＝出力電圧）が大きくなり、増幅効率がより良くなると考えられる。

また、段数と出力電圧、昇圧効率の関係は次の図 8 のようになった。

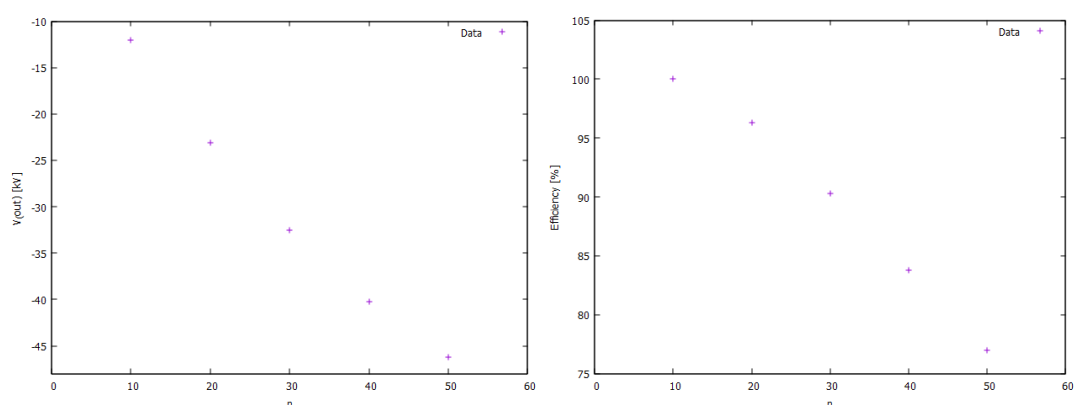


図 8：段数と出力電圧（左）、昇圧効率（右）の関係

ここで、段数が増えるほど昇圧効率が悪化するのとは明らかになった。左図を見ると、出力電圧は n の多項式になるように見えるため、その原因は恐らく 2.4 章に述べた VD 効果だと考えられる。

第4章：シミュレーション

昇圧回路の改善候補の選定

4.1 目的

本研究では、AXEL 実験の目標電圧の-76.4kV に達成するために、昇圧回路の効率化が目標とされている。第三章では既存の CW 回路の効率を測定したので、本章では改善候補の昇圧効率をシミュレーションにて確認し、実験 1 の結果と比較することによって実装すべき回路の選定を行う。

4.2 方法

以下昇圧回路の改善候補 5 つを LTSpice によってシミュレーションを行った。なお、同軸ケーブルの寄生インピーダンスは直列コイルと並列コンデンサーでモデルした。

- Modified CW (MCW), $n = 40, 80$: 最初の 10 段のコンデンサーの容量を $0.15 \mu F$ に増やす
- Partially Modified CW (PMCW), $n = 40, 80$: 最初の 10 段の押し上げコラムのコンデンサーの容量を $0.15 \mu F$ に増やす
- Alternatively Modified CW (AMCW), $n = 80$: 最初の 10 段以外のコンデンサーの容量を $0.082 \mu F$ に減らす
- Symmetrical CW (SCW), $n = 10, 20, 40, 80$: CW 回路に押し上げコラムもう一列印加して、位相が $\pi \text{ rad}$ でずれた交流電圧を 2 つの押し上げコラムに印加する

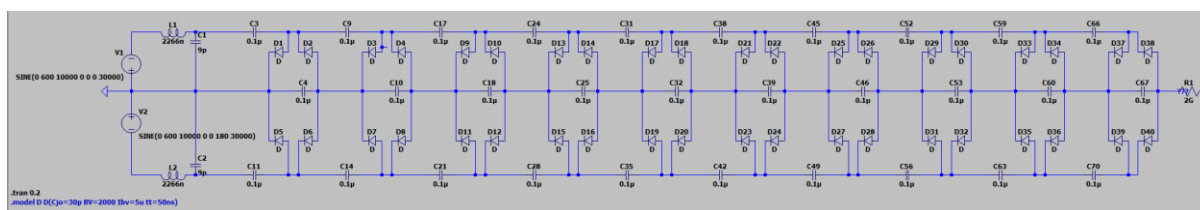


図9：10 段 SCW のシミュレーション回路図

- Modified SCW (MSCW), $n = 40$: SCW 回路の最初の 10 段のコンデンサーの容量を $0.15 \mu F$ に増やす

また、シミュレーションの妥当性を検討するために、CW 回路のシミュレーションも $n = 10, 20, 40, 80$ で行った。

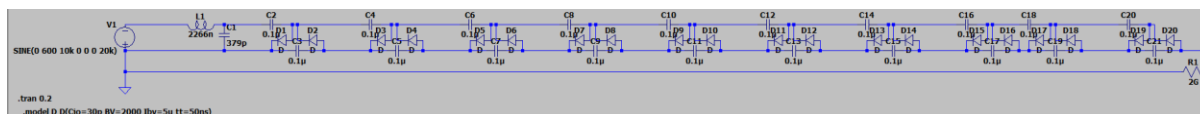


図 10：10 段 CW のシミュレーション回路図

電源は 10kHz、1.2kVpp とした。また、ダイオードの性質も既存の CW 回路のものと同一となるように、Breakdown Voltage を 2kV、寄生容量を 30pF、Reverse Bias Current を $5\mu\text{A}$ とした。最後に、transit time を 50ns とした。

10 段と 20 段では $t=0\text{s}$ から最終平衡状態まで到達するまでにデータを取るよう設定した。一方、40 段と 80 段に関しては、データ量が多すぎて保存しきれなかったため、 $t=0\text{s}$ から $t=10\text{s}$ までシミュレーションを行い、 $t=9.95\text{s}$ から $t=10\text{s}$ までの間のデータだけを保存するように設定した。

4.3 結果

シミュレーション結果と第三章で測った結果は次の表 2 にまとめられる。なお、80 段の実験結果は先行研究³のものを引用した。

表 2：シミュレーション・実験結果の比較表

段数 n	$V_{\text{out, exp}}$ [kV]	$V_{\text{out, sim}}$ [kV]	$V_{\text{out, scw}}$ [kV]	η_{exp} [%]	η_{sim} [%]	η_{scw} [%]
10	-12.00	-11.96	-11.99	100	99.7	99.9
20	-23.12	-23.69	-23.97	96.3	98.7	99.9
40	-40.2	-46.01 *-46.38 Δ -46.20	-47.90 *-47.91	83.8	95.9 *96.6 Δ 96.3	99.8 *99.8
80	-72	-81.63 *-83.08 Δ -82.36 $\square$ -79.81	-95.43	75.0	85.0 *86.5 Δ 85.8 $\square$ 83.1	99.4

*: Modified (first 10 stages are 0.15uF)

Δ : Partially Modified (first 10 charging column stages are 0.15uF)

$\square$: Alternately Modified (everything aside from first 10 stages are 0.082uF)

³ 参考文献 2

4.4 考察

表 2 を見ると、昇圧効率は $MSCW \approx SCW > MCW > PMCW > CW > AMCW$ の順番に減少するのがあきらかになった。また、MSCW と SCW は 40 段で比較すると、効率は有効数字 3 桁で一致しているので、MSCW まで行かなくてもよいとわかる。一方、AMCW は CW より昇圧効率が低いので、妥当性はない。

SCW とその次に効率が良い MCW を 80 段で比較すると、効率が 13% 程度良くなるのがわかったので、やはり SCW は最適な候補だと判断した。

また、80 段 CW ・ SCW の出力波形（図 11、12）を見ると、RE は確認されたことがわかる。

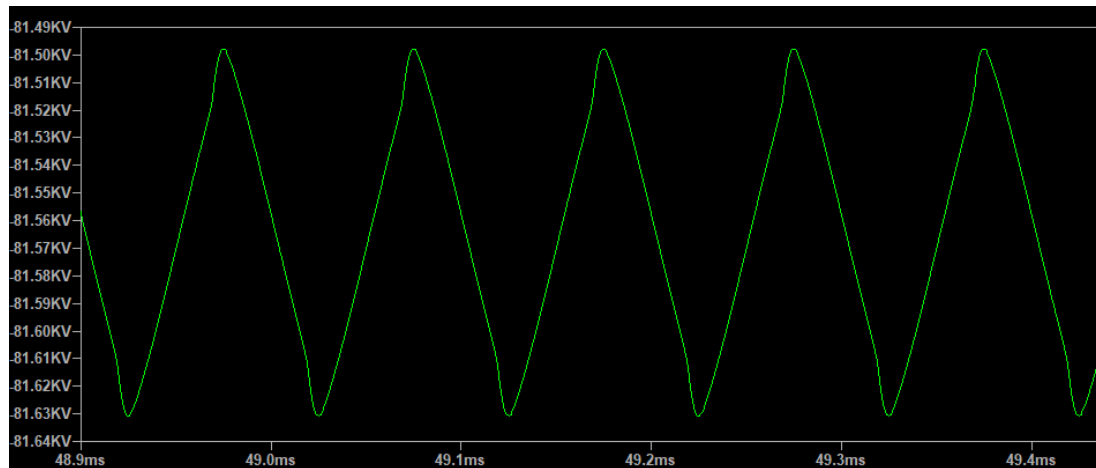


図 11：80 段 CW の出力波形

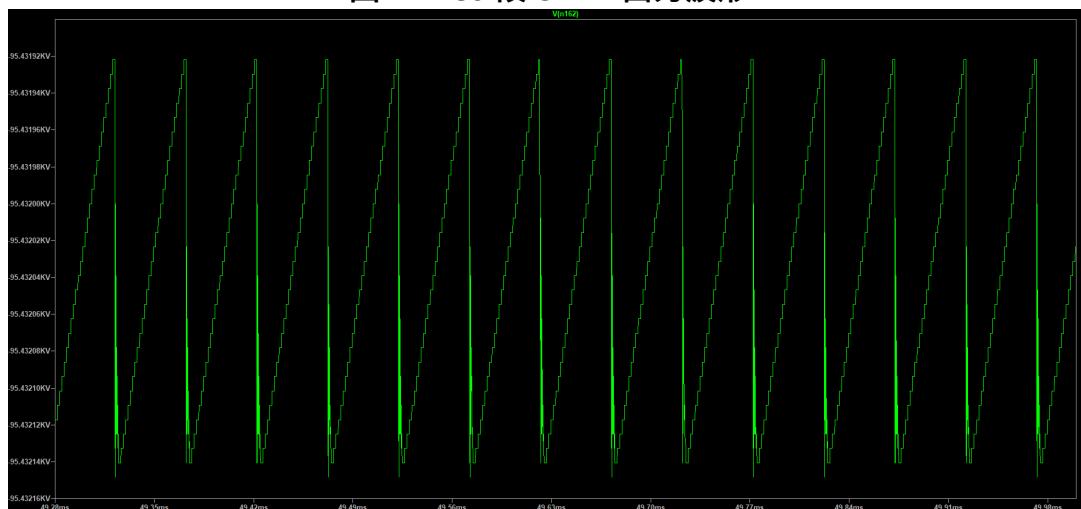


図 12：80 段 SCW の出力波形

また、80 段 CW の RE の大きさ 0.13kV および周波数 10kHz に対して、80 段 SCW では 20kHz で 0.00022kV の 3 桁小さいものしか見えない。したがって、SCW では、2 つの押し上げコラムの出力がお互いの RE を補って出力を安定化した効果が確認された。

第 5 章：実験 2

FPC コンデンサー用昇圧回路の動作確認

5.1 目的

本研究では、AXEL 実験の目標電圧の-76.4kV に達成するために、昇圧回路の効率化が目標とされている。第四章では SCW 回路は最適な昇圧回路だと結論付けたが、コンデンサーの個数を増やすと、セラミックコンデンサーの放射線量は問題になる。したがって、低バックグラウンド・低コストの新しいコンデンサーの開発を進め、その問題を解決するのが本章の目的である。

5.2 設計過程

理論上、コンデンサーは 2 つの導体とその間に挟まれる絶縁体から成り立つ。したがって、導体から作られた平面 2 つを絶縁体で切り離すものもコンデンサーとして振る舞うと考えられる。ここで、flexible print circuit (FPC) は基本的に 2 層の銅面に挟まれた絶縁体であるポリイミドだということに注目して、FPC で高容量・低放射線量コンデンサーを作ること挑戦した。

ここで、以下の条件が FPC コンデンサーの形に制限として効いてくる。

1. フィールドケージの長さおよび必要な電場の強さ：ドリフト電場は 0.1kV/cm/bar の強さが必要で、フィールドケージは 80.5cm の長さを持つため、その強さをその長さに印加するために、昇圧回路の縦の長さは変えられない。したがって、FPC コンデンサーの幅もそれに制限される。
2. 昇圧回路の電極間の距離：電極間の放電を防ぐために、互いの電位差が 2kV となる隣り合う電極は先行研究により、少なくとも 3mm の距離が必要。FPC コンデンサーは電極で昇圧回路 FPC に通電を行うため、その距離を保ちながら FPC コンデンサーの電極を設計する必要がある。
3. 製作会社の製作可能大きさ：コスト削減のため、本研究では中国を拠点とした JLCPCB という FPC 製作会社に FPC を発注した。JLCPCB は、最大 400mm x 500mm の FPC を作れると指定したため、それより大きいものは作れない。

これらの条件を踏まえて、KiCAD による FPC 設計を行った。その結果、最初の FPC コンデンサーのプロトタイプパターンは次の図 13 のようになった。

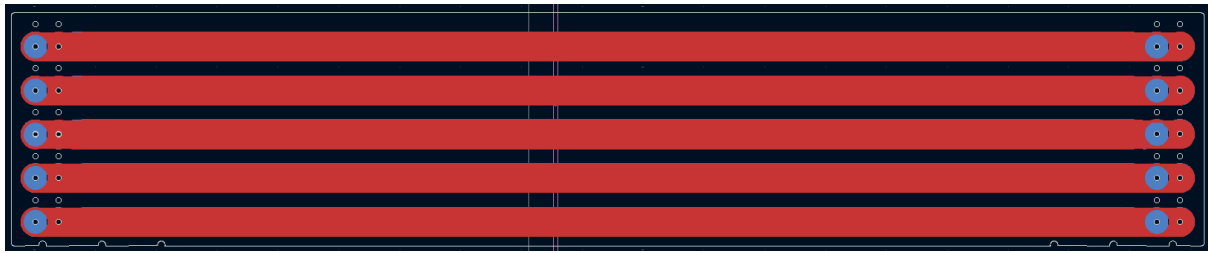


図 13：FPC コンデンサーのプロトタイプパターン

FPC そのものの大きさは 490mm x 95.5mm となり、製作会社の作れる範囲内に収まった。コンデンサー 1 個の大きさは 481mm x 12mm、電極間の距離は 3.725mm となり、最短距離の 3mm より大きい。電極は、昇圧回路の FPC との接続および容量を増やすために、もう 1 枚 FPC コンデンサーとの接続が可能となるように設計した。

また、隣り合うコンデンサーの距離は 6mm で、容量をできるだけ大きくするために、FPC 1 枚にコンデンサー 5 枚を設計した。したがって、SCW 昇圧回路 FPC 1 枚（10 段）につき、FPC コンデンサーの FPC 6 枚が必要（押し上げコラム 10 段 x 2、平滑コラム 10 段 = 30 個 = 6 枚）。

理論上、FPC コンデンサー 1 個の容量は

$$C = \frac{\epsilon A}{d} = \frac{4.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 447 \times 10^{-3} \times 12 \times 10^{-3}}{25 \times 10^{-6}} [F] = 9.11 [nF]$$

となる。したがって、既存の CW 回路のコンデンサーの容量 $0.1 \mu F$ に達成するためには

$$\frac{100}{9.11} \approx 11 \text{ 枚}$$

が必要である。

同時に、FPC コンデンサー用昇圧回路 FPC を KiCAD で設計した。

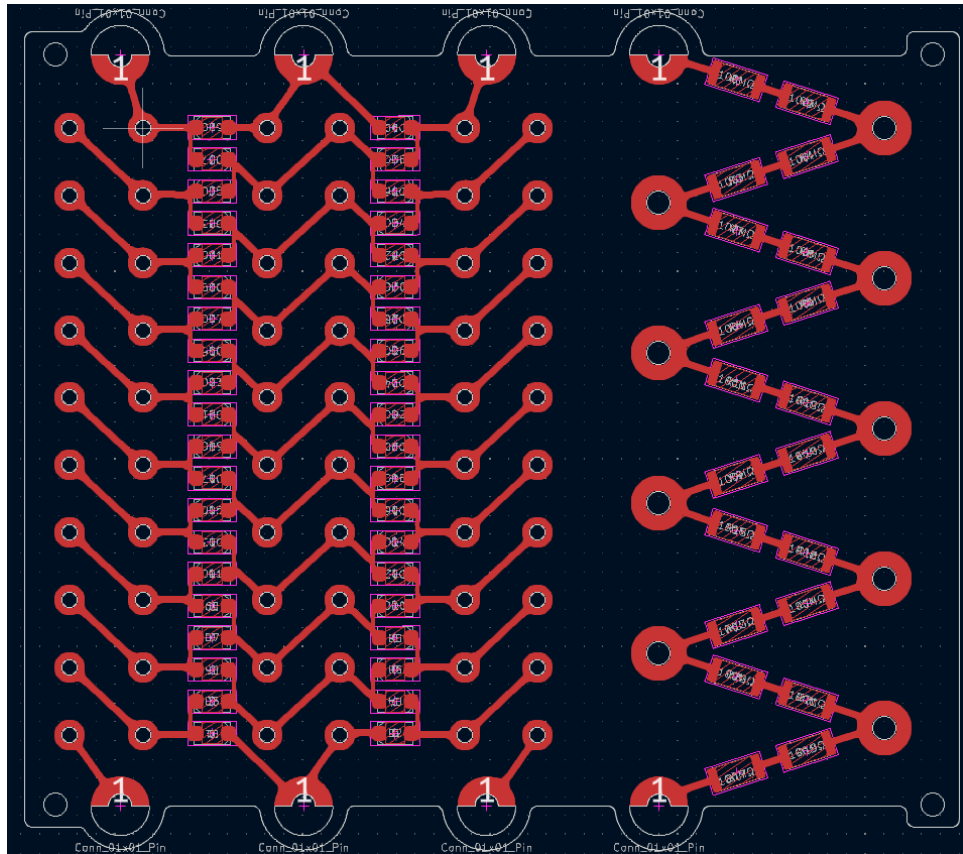


図 14：FPC コンデンサー用昇圧回路 FPC のプロトタイプパターン

昇圧回路の FPC の大きさは 124.5mm x 112mm とし、高さはフィールドケージに対応するために、既存の CW 回路と同じにした。また、ダイオードや抵抗も同じく Commercial Co., FM2000GP と日本ファインケム, RG1S, 100MΩ を用いた。

昇圧回路の FPC では、コンデンサーを接続するために電極 30 個を開けた。回路を組み立つときには、FPC コンデンサー 2 枚の位置を少しずらして重ねて、M2 ネジおよびワッシャーを使って導通させて SCW の FPC に固定する。

設計後、JLPCB にて FPC コンデンサーおよび FPC コンデンサー用昇圧回路 FPC をそれぞれ 6 枚発注した。

5.3 方法

まず、マルチメーターでコンデンサーの容量を測定して、1kV の電圧を電極間に印加して耐電圧を確認した。次に、FPC コンデンサー用昇圧回路 FPC を使って 10 段の CW 回路を組み立て、実験 1 と同じセットアップで昇圧を行った。

ここで、FPC コンデンサー用昇圧回路 FPC を電源に接続するためのネジが FPC コンデンサーの下部分に被っており、そのままであれば回路を PTFE 板に固定できないことを発見した。したがって、ハサミで FPC コンデンサーに小さい穴をあけて回路を固定した。



図 15 (左) : FPC コンデンサー用昇圧回路 FPC に接続した FPC コンデンサーの様子

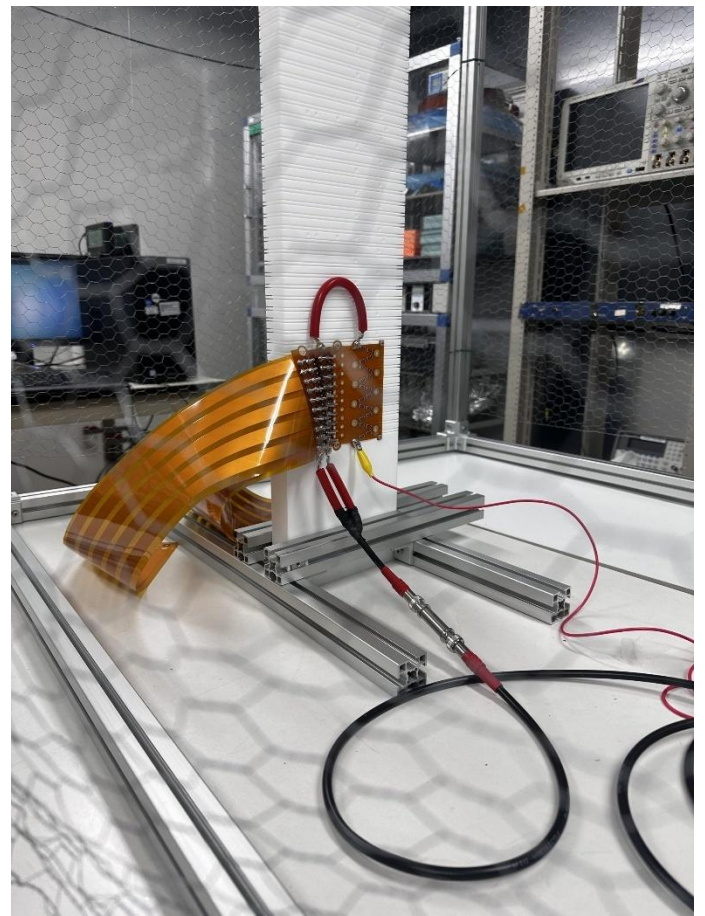


図 16 (右) : 昇圧中のセットアップの様子

昇圧は再現性を確認するために合計 5 回に行い、印加電圧および出力電圧を記録して昇圧効率を求めた。1 回目から 3 回目は抵抗 $2\text{G}\Omega$ 、4 回目から 5 回目は抵抗 $10\text{G}\Omega$ を用いた。

5.4 結果および考察

コンデンサーの容量は $6.65 \pm 0.04 \text{ nF}$ と測定され、理論値のおおよそ $1/3$ となった。その原因は、銅面間の距離 d が製作会社のスペックより少し大きくなったと考えられる。また、 1kV の電圧を電極間に印加しても放電は起こらなかったのも、 1kV までの耐電圧は確認できた。

2 回目の昇圧では、 276V_{in} で放電が起こったため、実験を止めた。比較的に速い段階で放電が起こってデータは取れなかったが、その放電は再現できていないので、その原因は検討できない。

1 回目と 3 回目の昇圧プロフィールはよく似ていたもので、1 回目は省略する。3 回目の結果は次の図 17 のようになった。

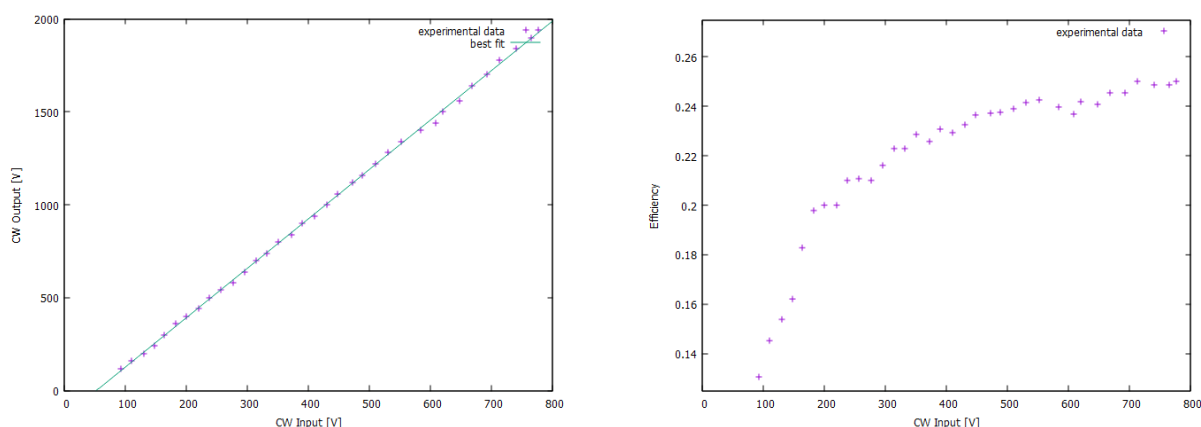


図 17：(左) 印加電圧・出力電圧の関係図、(右) 印加電圧・昇圧効率の関係図

左図のフィット関数が

$$V_{out} = (2.66V_{in} - 140) [V]$$

となったので、昇圧効率が最大 26.6%で、 140V に相当するパワーロスがどこか発生しているとわかった。また、昇圧中に高音波の音が聞こえて、携帯電話の音波解析アプリで測るとその周波数が 10kHz だと判明した。したがって、回路の一部が共鳴することによってエネルギーが昇圧から奪われた可能性があった。

そのパワーロスの原因の一つとしては、隣り合うコンデンサーの間の空間がコンデンサーとして働いて寄生インピーダンスが生じたことが考えられる。その場合の容量は

$$\begin{aligned} C &= \frac{\epsilon A}{d} = \frac{\epsilon l z}{d} \\ &= \frac{4.8 \times 8.85 \times 10^{-12} \times 447 \times 10^{-3} \times 35 \times 10^{-6}}{6 \times 10^{-3}} \\ &= 1.11 \times 10^{-12} \approx 1.11 \text{ pF} = 0.001 \text{ nF} \end{aligned}$$

と計算されるので、コンデンサー 1 個の容量の 1/1000 倍となり無視できると判断した。したがって、パワーロスの原因は他にある。

従来の CW 回路は 10 段で昇圧効率が 100%となったので、その差はパワーロスだけでなく、コンデンサーの容量がより小さくなったからだと考えられる。昇圧回路のインピーダンスは

$$Z = R - \frac{i}{\omega C}$$

と書けるので、C が小さくなると Z の虚部がより大きくなり、抵抗部分で消費される電力（=昇圧）の割合が小さくなる。したがって、その解決方法としては、容量を増やすか、抵抗を増やすの 2 つである。

FPC コンデンサーは 6 枚しかなかったため、次の 4・5 回目の昇圧では、FPC コンデンサー用昇圧回路 FPC の抵抗チェーンを用いて抵抗を 10GΩにした。

その結果は次の図 18 のようになった。

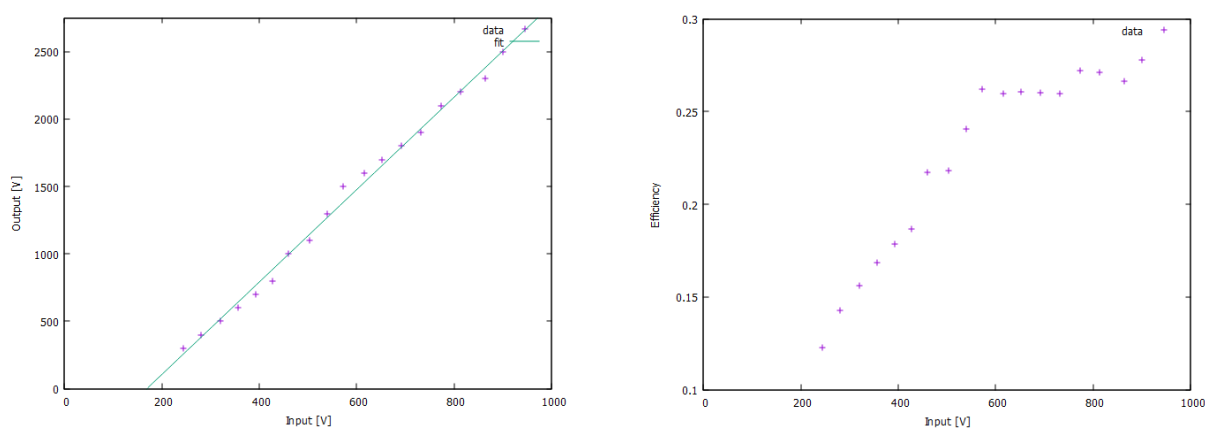


図 18：（左）印加電圧・出力電圧の関係図、（右）印加電圧・昇圧効率の関係図

左図のフィット関数が

$$V_{out} = (3.43V_{in} - 582) [V]$$

となったので、昇圧効率が最大 **34.3%**で、**582V** に相当するパワーロスがどこか発生しているとわかった。したがって、抵抗を増やすことによって昇圧効率を上げたことができたので、上記に述べたインピーダンスの効果は妥当だと考えられる。

一方、抵抗を増やすことによってパワーロスも大きくなったので、**FPC** 間の接続がパワーロスの原因だと考えられる。特に、本実験では **M2** ネジで接続を取ったので、ネジに電荷が蓄えられてロスになる可能性が考えられる。

また、**10kHz** の音も再び現れたが、その音源は実験室のリバーブの影響で指定できなかった。

印加電圧が **1kV** となったとき、継続的な放電が起こり、印加電圧および出力電圧が秒で **0** へ落ちた。降圧して回路を取り外すと、コンデンサーのハサミで切ったところに放電痕が見られた。したがって、この放電は **1** 段目のコンデンサーの表と裏の間に起こった放電だと考えられ、対策としてきちんとパターンに **FPC** 固定用穴をあけた。

第 6 章：結論

本研究では、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索に向けて、AXEL 実験の 1000L キセノンガス TPC 検出器の実装に必要な昇圧回路の効率化の研究を行った。検出器のエネルギー分解能を上げるために、本研究グループは electroluminescence 効果を用いると予定しているが、その効果を引き起こすためには 3kV/cm/bar の非常に強い電場が必要。また、拡散する前に電子を ELCC 面へドリフトさせるためには 0.1kV/cm/bar の強い電場も検出器のフィールドケージの長さ 80.5cm にかけないといけない。その電場を、気密性を脅かさずに作るためには検出器内に入る CW 昇圧回路の使用が最適だが、CW 回路の性質によってパワーロス効果が様々入り、目標電圧を達成するのが難しいとされている。

したがって、本研究では CW 回路のいくつかの改善候補を考え、シミュレーションによって SCW に絞った。また、背景事象となる昇圧回路のセラミックコンデンサーの放射線量を抑えるために、新しい低コスト・低バックグラウンドコンデンサー、FPC コンデンサーの開発を進めて、それを用いた CW 回路の動作確認も行った。

第 7 章：今後の展望

SCW の動作確認には電源が 2 つ必要であるが、本論文を書く前には 2 個目の電源の製作が間に合わなくて行えなかった。したがって、今後は 2 個目の電源を作成して SCW の動作確認を行い、パワーロスを抑えるために FPC コンデンサーを再設計して容量を最大化する。最終的に、先行研究で問題となったコロナ放電の対策を実施し、 -76.4kV の目標電圧に達成したい。

謝辞

本研究を行うときに御指導、御鞭撻していただいた皆様にこの場を借りてお礼を申し上げます。

指導教員の市川温子教授には、研究活動全般でお世話になりました。昇圧回路の改善候補を SCW 回路に絞っていた私が、問題となるのを認識していなかったセラミックコンデンサーの放射線量のことを指摘してくださり、その解決方法である FPC コンデンサーを提案してくださり、大変助かりました。実験を行うときに気を付けるべきことや研究に関する知識がまだまだ未熟な私にとっては大変学びたいロールモデルのような存在である。深くお礼を申し上げます。

東北大学の中村輝石助教には、回路の設計や発注などの場面で大変ご指導をいただきました。何をすべきかわからなかった私に御丁寧に説明してくださり、行き詰まったところで実験に同伴して解決方法を提案してくださり、大変助かりました。心より感謝を申し上げます。

博士課程の秋山さんおよび修士課程の小林さんには、研究開始から大変お世話になりました。研究についての疑問に相談して解決してくださったり、細かいことを見落とす私に何度も優しくリマインドしてくださったり、大変助かりました。高電圧実験の危険性やその安全対策の重要性を強調していたおかげで、私はこの研究をここまで進めました。誠に感謝いたします。

AXEL 実験の他のメンバー、京都大学の岩下芳久准教授、博士課程の疋田さん、博士課程の浦野さん、修士課程の初見さん、修士課程の佐々木さんにもご丁寧なご指導をいただいて、大変お世話になりました。誠にありがとうございました。

東北大学の素粒子（加速器）実験室の皆様にも、色々助けられました。皆様のおかげで研究生活が楽しく感じました。誠にありがとうございました。

最後に、私を支えてくださった家族や友人に感謝の気持ちを申し上げます。

卒業研究テーマとしてこの研究ができたことを大変嬉しく思います。ありがとうございました。

参考文献

1. 吉田将、京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻物理学第二教室 高エネルギー物理学研究室。「ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊探索に向けた高圧 Xe ガス TPC AXEL のための高電圧ドリフト電場形成の研究」。
Published 2018/2/15. Last accessed 2025/5/31. https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/research/Neutrino/AXEL/pdf_thesis/yoshida_20180125_Mth.pdf
2. 小林綜太、東北大学理学部物理学科素粒子実験（加速器）研究室。「AXEL 実験 1000 L 検出器運用に向けた コッククロフト・ウォルトン回路の容量性負荷の対策」。Published 2024/4/3. Last accessed 2025/5/31.
https://epx.phys.tohoku.ac.jp/wordpress/wp-content/uploads/2024/04/20240403_kobayashi_bt.pdf
3. S. Abe, et al. KamLAND-Zen Collaboration. “Search for the Majorana Nature of Neutrinos in the Inverted Mass Ordering Region with KamLAND-Zen”. Published 2023/1/30. Last accessed 2025/5/31.
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.130.051801>
4. Ruzbehani, Mohsen. Laser & Optics Research School, NSTRI. “A Comparative Study of Symmetrical Cockcroft-Walton Voltage Multipliers”. Published 2017/1/16. Last accessed 2025/5/31. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2017/4805268>