



# AXEL実験

## コッククロフト・ウォルトン回路の 容量性負荷に対する対策と 昇圧効率の改善

小林綜太

市川温子, 中家剛<sup>A</sup>, 中村輝石, 廣瀬昌憲<sup>C</sup>, 岩下芳久<sup>B</sup>, 中島康博<sup>C</sup>,  
吉田将<sup>A</sup>, 菅嶋文悟<sup>A</sup>, 秋山晋一, 疋田純也<sup>A</sup>, 浦野壮規, 初見聡太,  
他AXEL collaboration

東北大理, 京大理<sup>A</sup>, 京大複合研<sup>B</sup>, 東大理<sup>C</sup>

# ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊

## $0\nu\beta\beta$ 探索実験

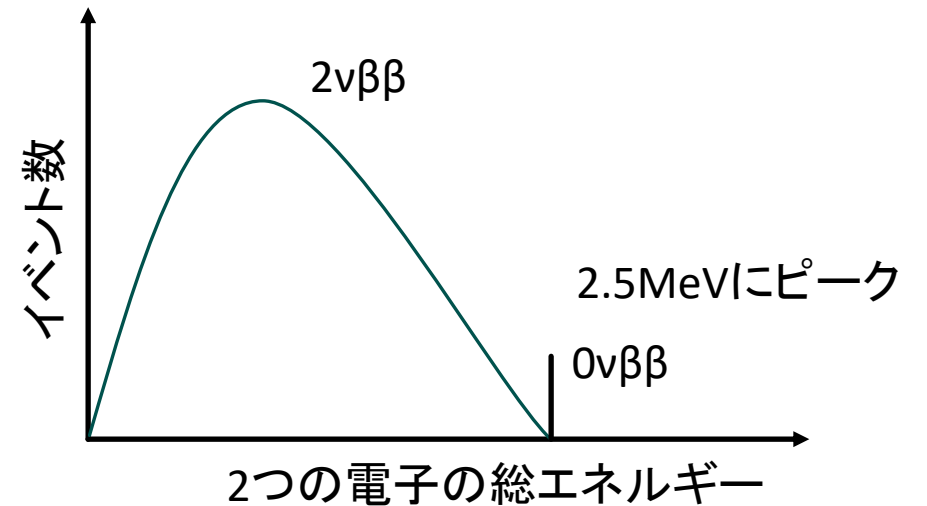
$0\nu\beta\beta$ は単一エネルギーを持つ稀な特徴的なイベント

$T_{1/2} > 2.3 \times 10^{26}$ 年 for  $^{136}\text{Xe}$ [1]

1. 高エネルギー分解能
2. 大質量
3. 背景事象除去

この三つを同時に満たす検出器が必要

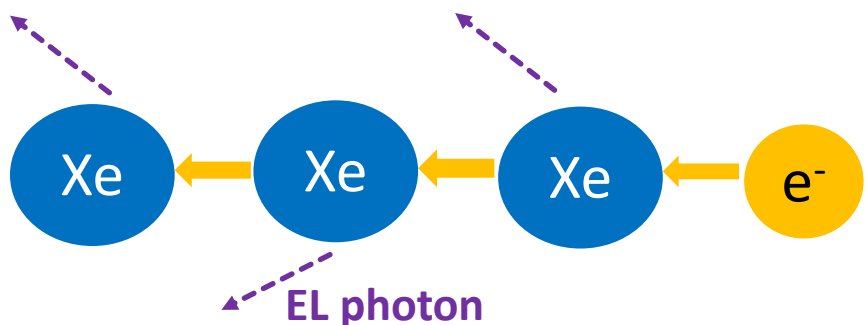
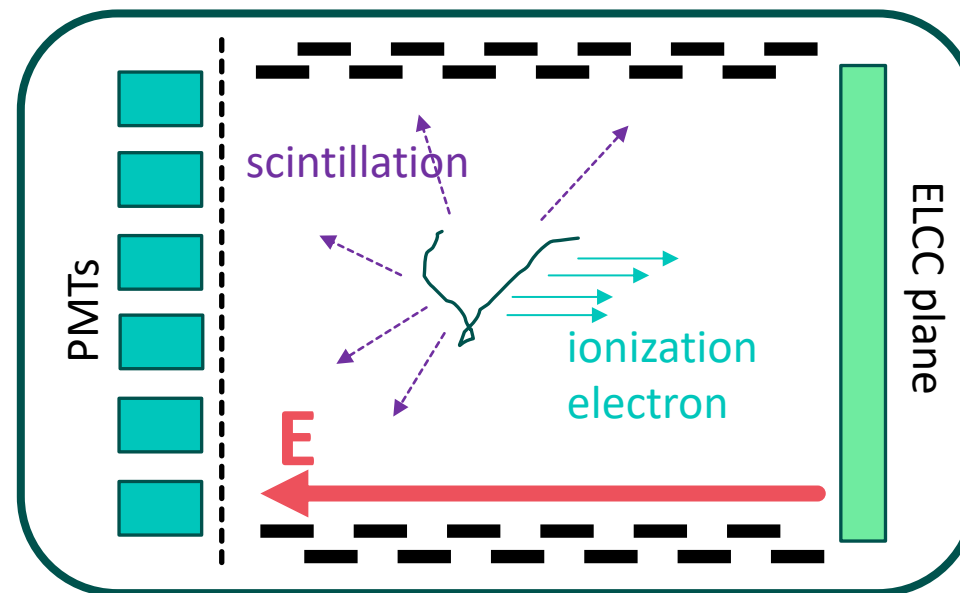
[1] PRL 130, 05180 (2023), KamLAND-Zen Collaboration



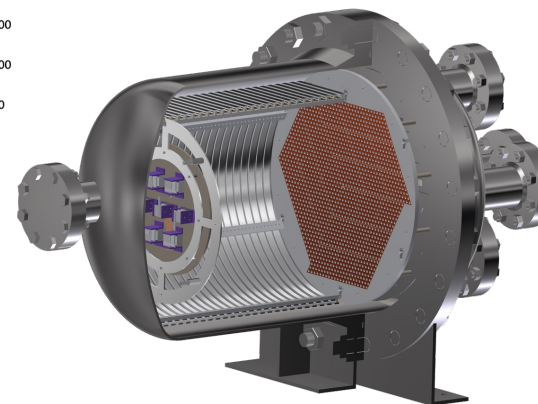
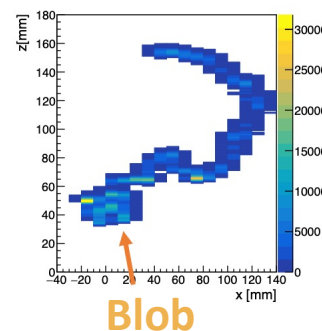
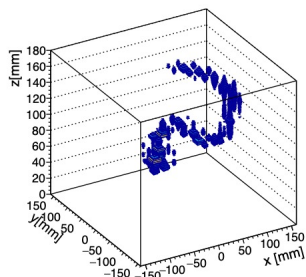
発見すればニュートリノのマヨラナ性の  
直接的な証拠  
→軽いニュートリノ質量の起源に迫る

# A Xenon ElectroLuminescence detector

- Electroluminescenceの読み出し
- 高圧キセノンガスの使用
- TPCによる三次元飛跡再構成
- 100kV/cm/atmの電場で再結合を抑制



Electroluminescence過程



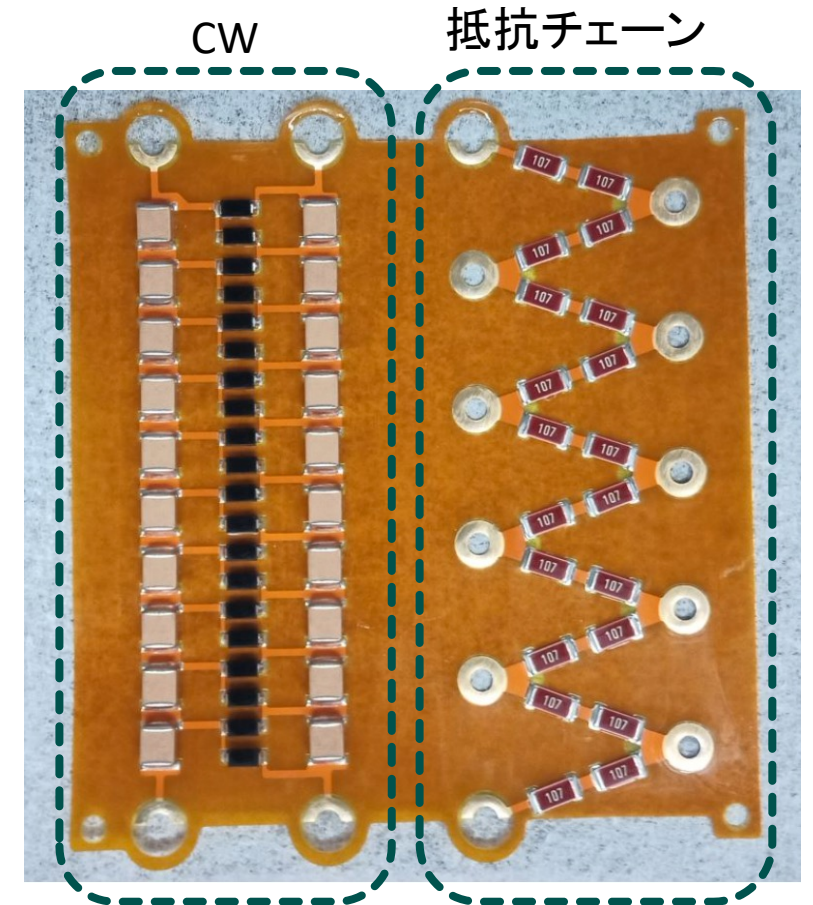
関連講演  
足田:18T1-4  
秋山:18T1-5  
浦野:21T2-1

# ドリフト電場用高圧発生器

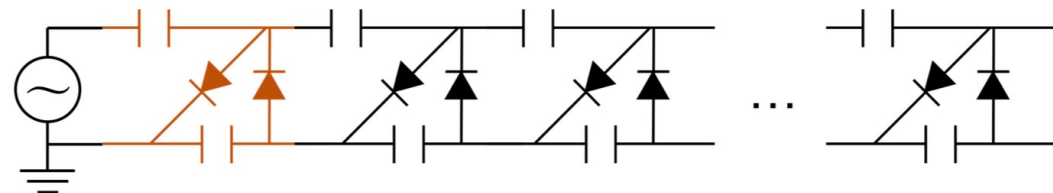
大きな気密フィールドスルーを避けるために  
コッククロフト・ウォルトン(CW)回路でchamber内で昇圧

## ○ コンデンサとダイオードからなる回路

- N段の回路にPeak to Peakが $V_0$ のAC電圧を印加すると、最上段から $N \cdot V_0$ のDC電圧を取り出せる。
- 抵抗分割してフィールドケージに電位を与える
- 抵抗チェーンを流れる電流による  
CW回路の電圧降下は周波数が高いほど抑えられる  
→実験では10kHz以上を用いたい



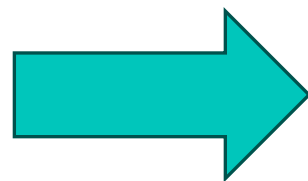
1000L検出器では-76.3kVが必要



# ドリフト電場用高圧発生器

## 問題点

周波数をあげるほどCW回路の容量に流れる電流が増えて、電圧降下が飽和する前に入力用ACアンプの定格電流(10mA)に達する。



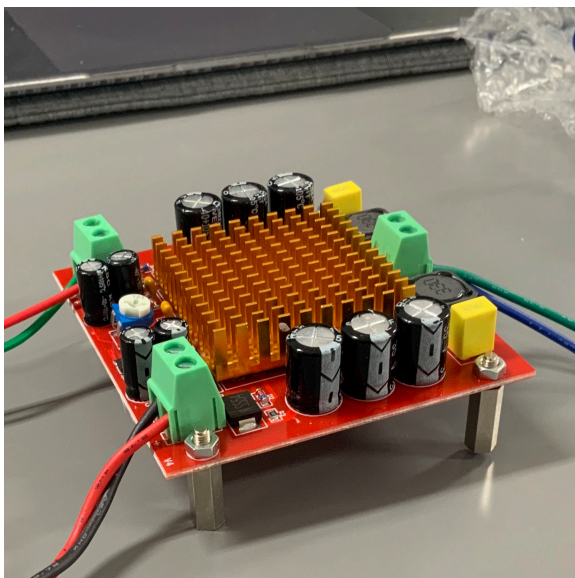
## 解決案

1. オーディオアンプと昇圧トランスを用いて、安価で大電力のAC電源を自作する
2. コイルを入れて並列LC共振を起こすことで、AC電源が負担する電流を削減する

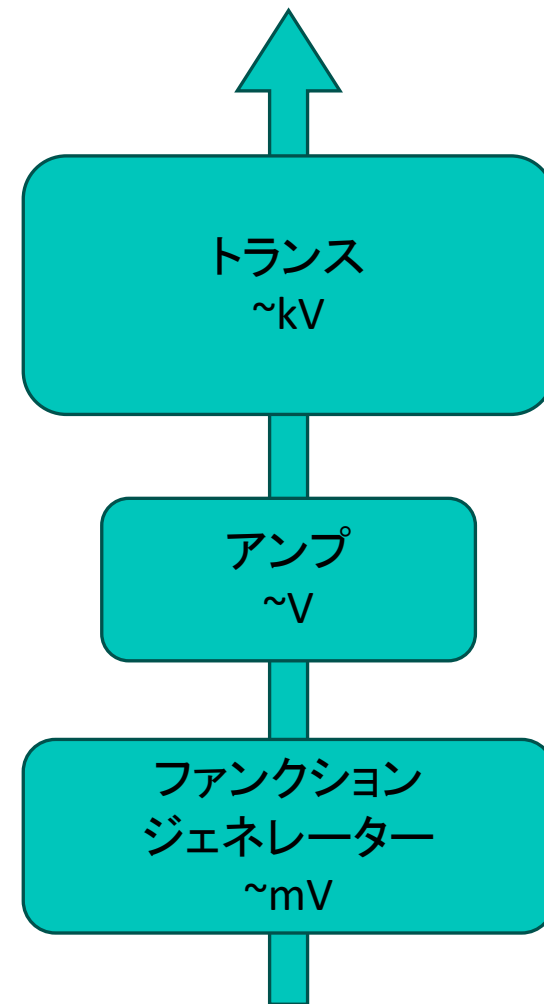
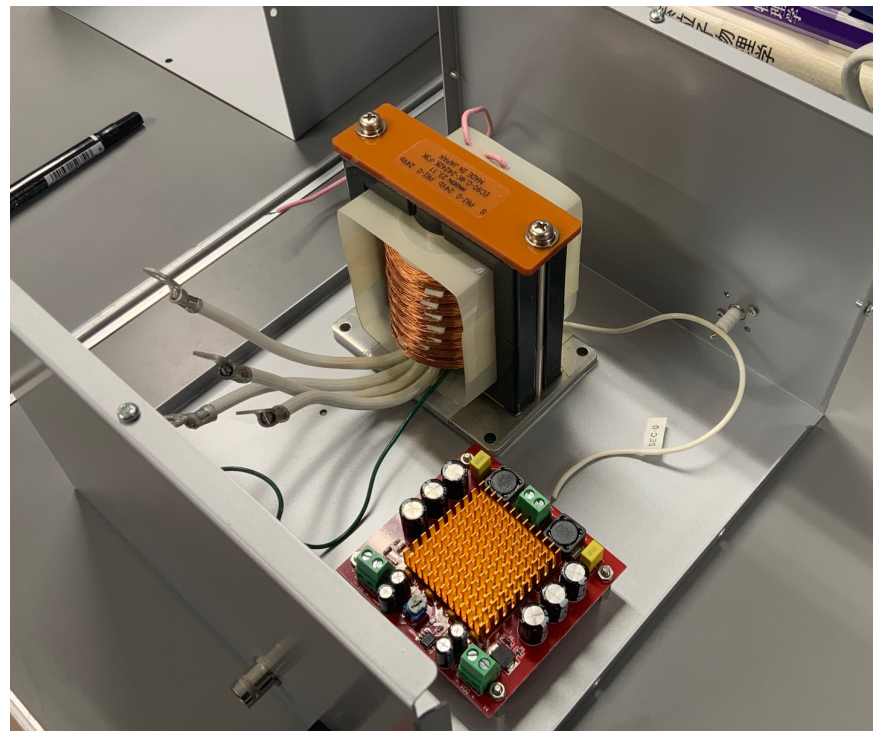


# 解決案1: 新しいAC電源の開発

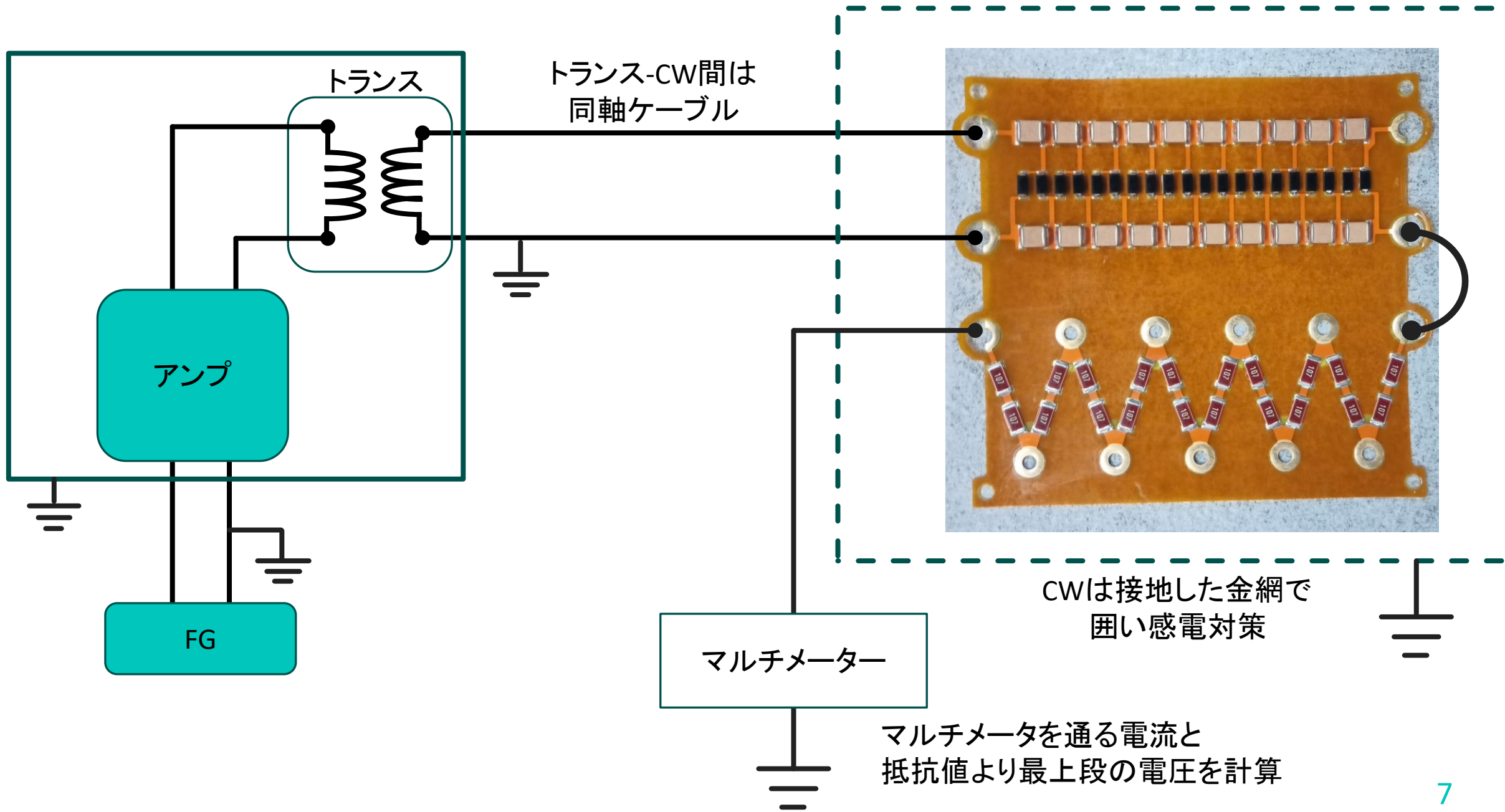
オーディオアンプ(XH-M544)  
50W~150W



高周波高圧トランス  
約80倍に昇圧



総額@@万円!

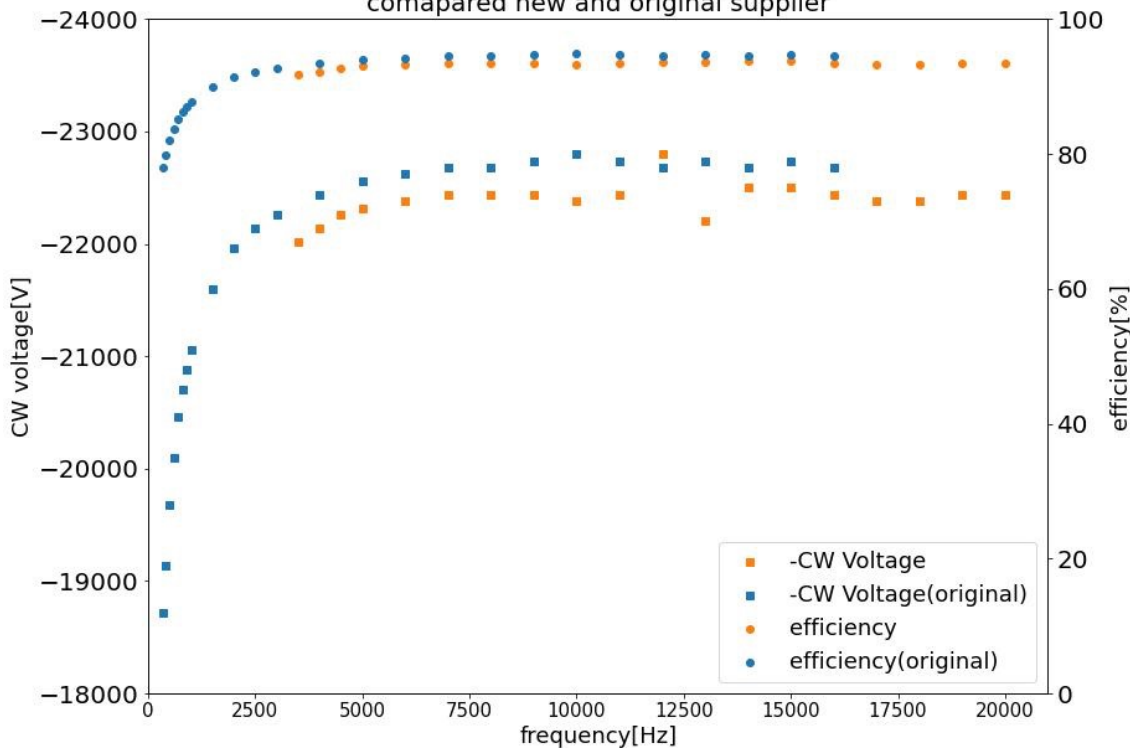


# 電源の性能

- CW30,40,50段のそれぞれで、トランス出力電圧800Vpp,1200Vppを印加
- 周波数は4kHz~20kHz

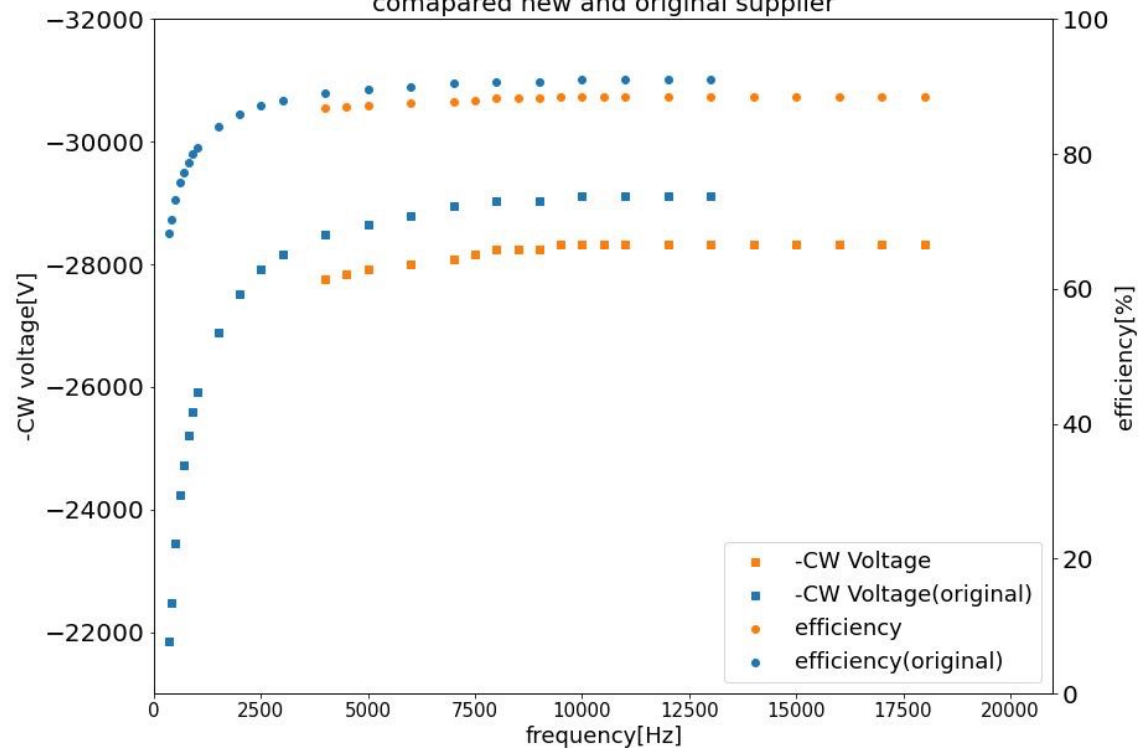
30段,800Vpp

compared new and original supplier



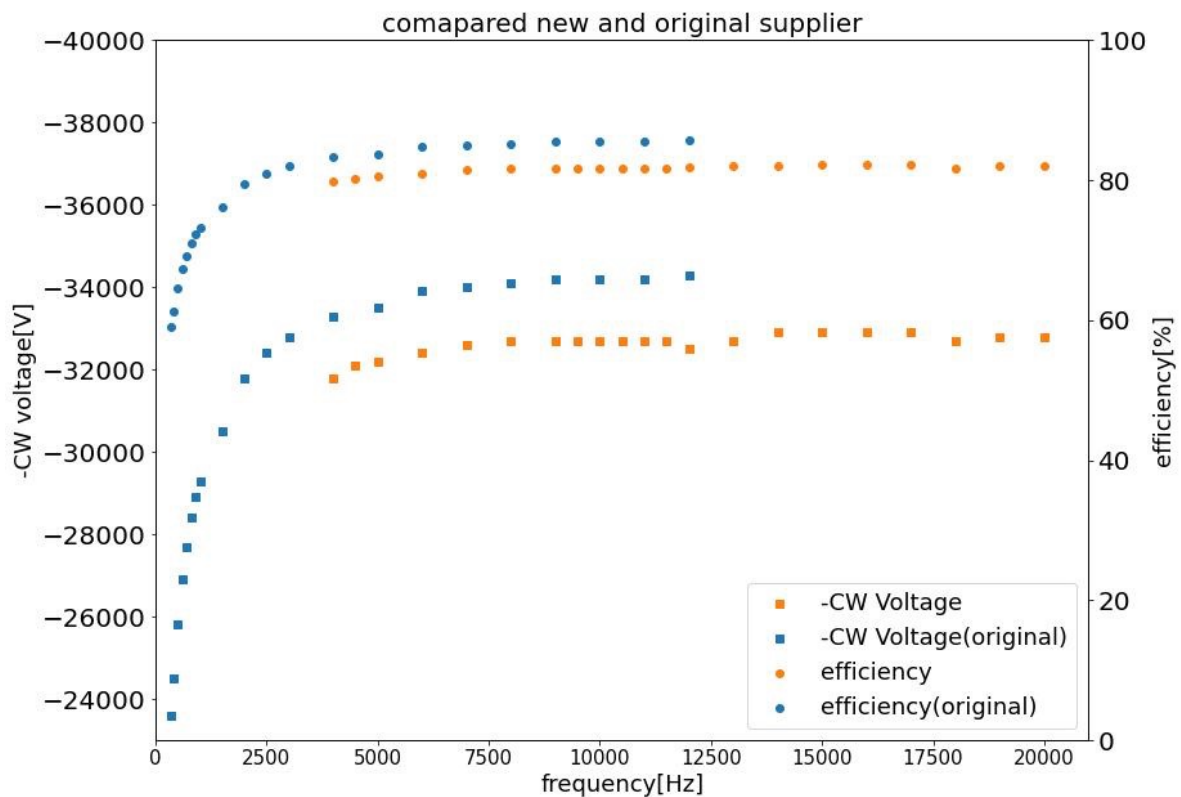
40段,800Vpp

compared new and original supplier

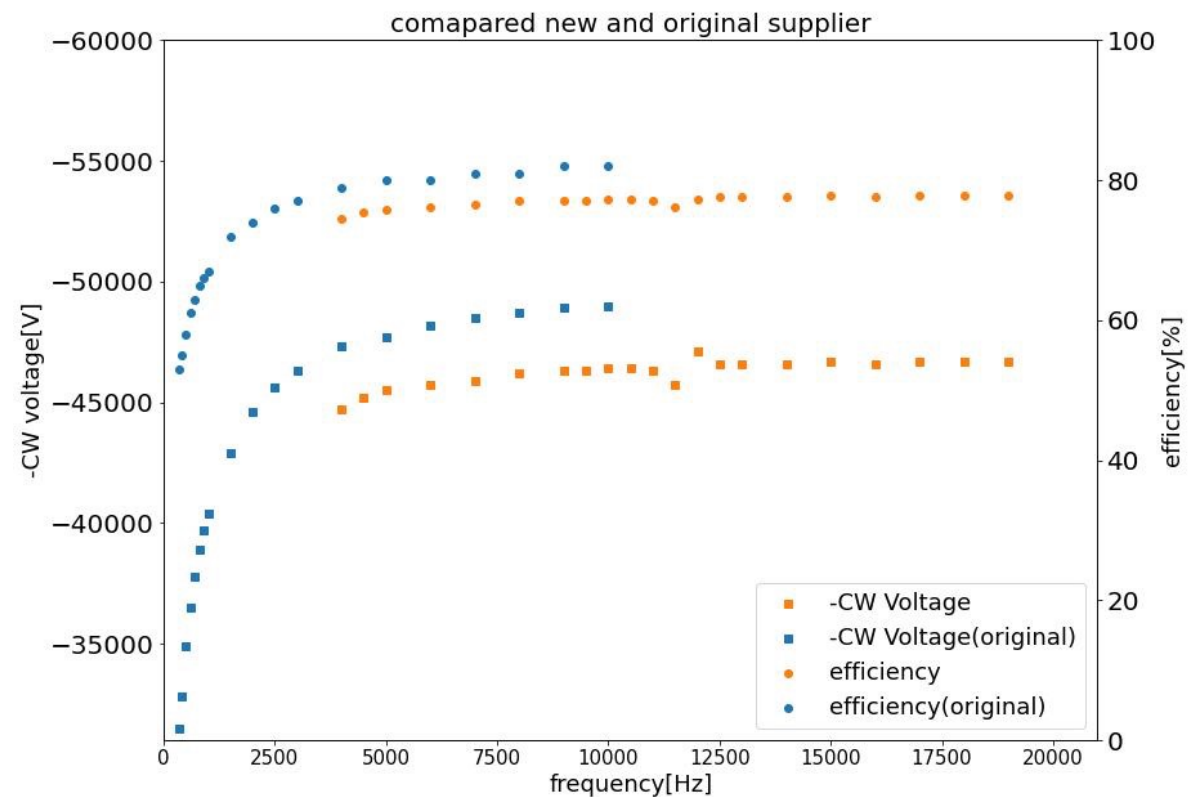


# 電源の性能

50段,800Vpp



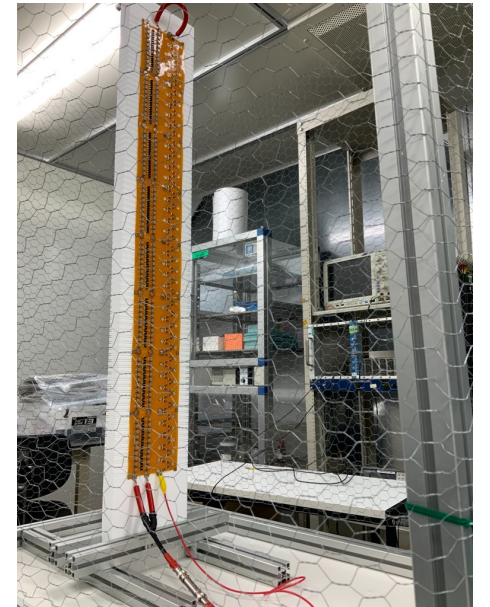
50段,1200Vpp



# AC電源についてのまとめ

- 昇圧効率は数%(数kV)下がっている。
  - 原因は新たに同軸ケーブルを用いたことだと考えられる。  
実験の安全性から同軸ケーブルは必要。
- より高い周波数で印加できている。
  - 段数を上げていくと容量性は増えるため、古い電源では電圧降下が飽和する前に不安定になる見込みだった。

新しいAC電源によって高段のCW回路でも安定して昇圧ができるようになった。  
実際に大気中の80段のCW回路で  
-73.0kVまで昇圧できた(グループ最高記録)

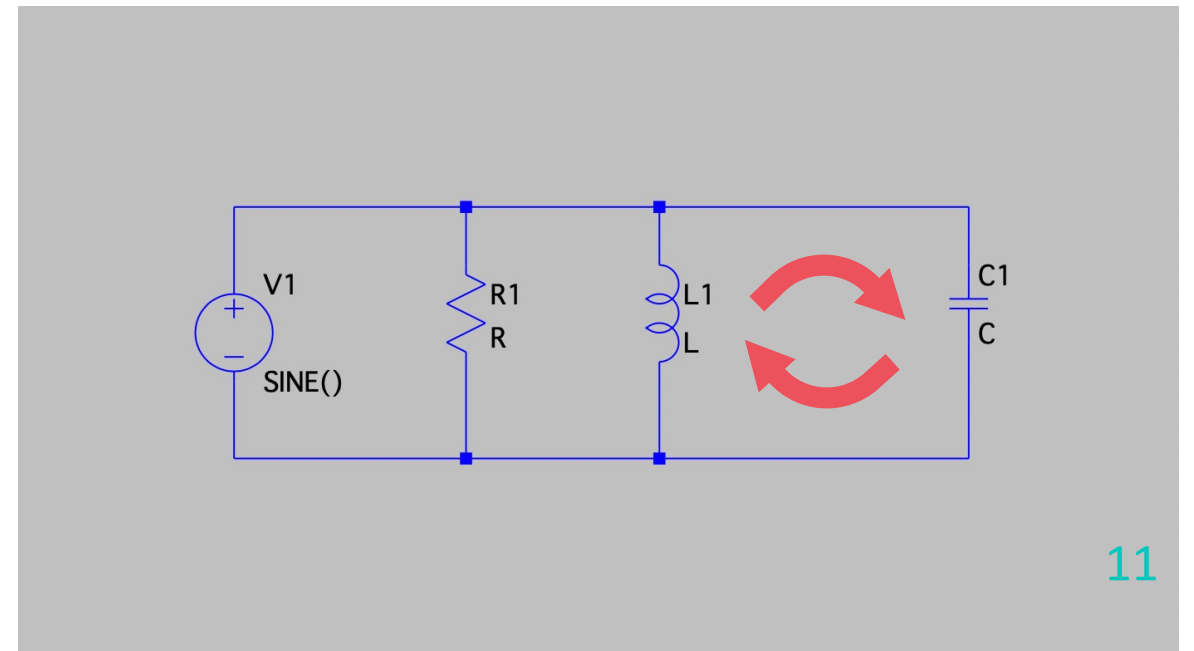
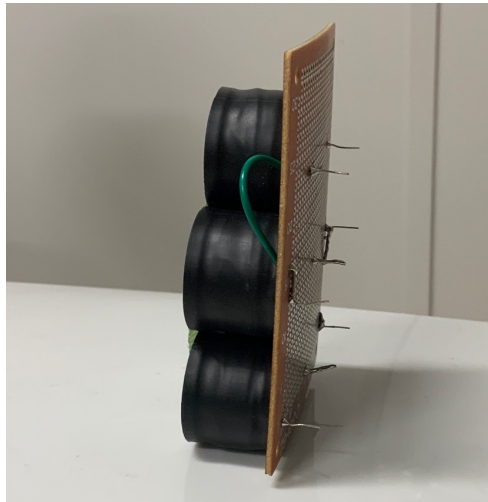


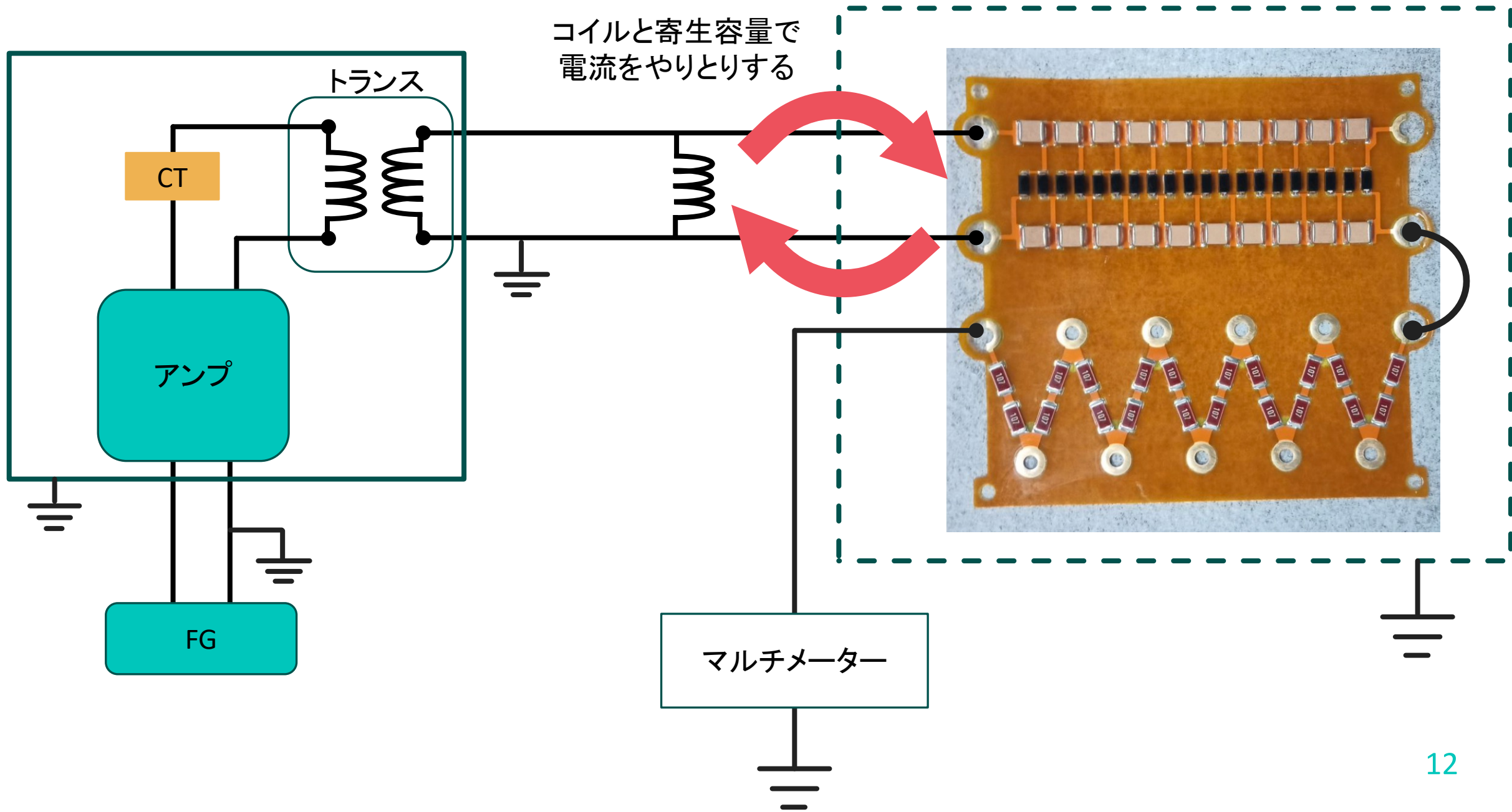
# 解決案2: コイル追加による共振

CWの容量性負荷はダイオードの寄生容量  
および同軸ケーブルに由来すると考えられる。

↓  
シミュレーションでケーブルを含めたCW全体のキャパシタンスを求め、  
狙った周波数で共振するようなインダクタンスを回路に並列に追加して共振を起こす。

↓  
AC電源が出力する電流が減る。



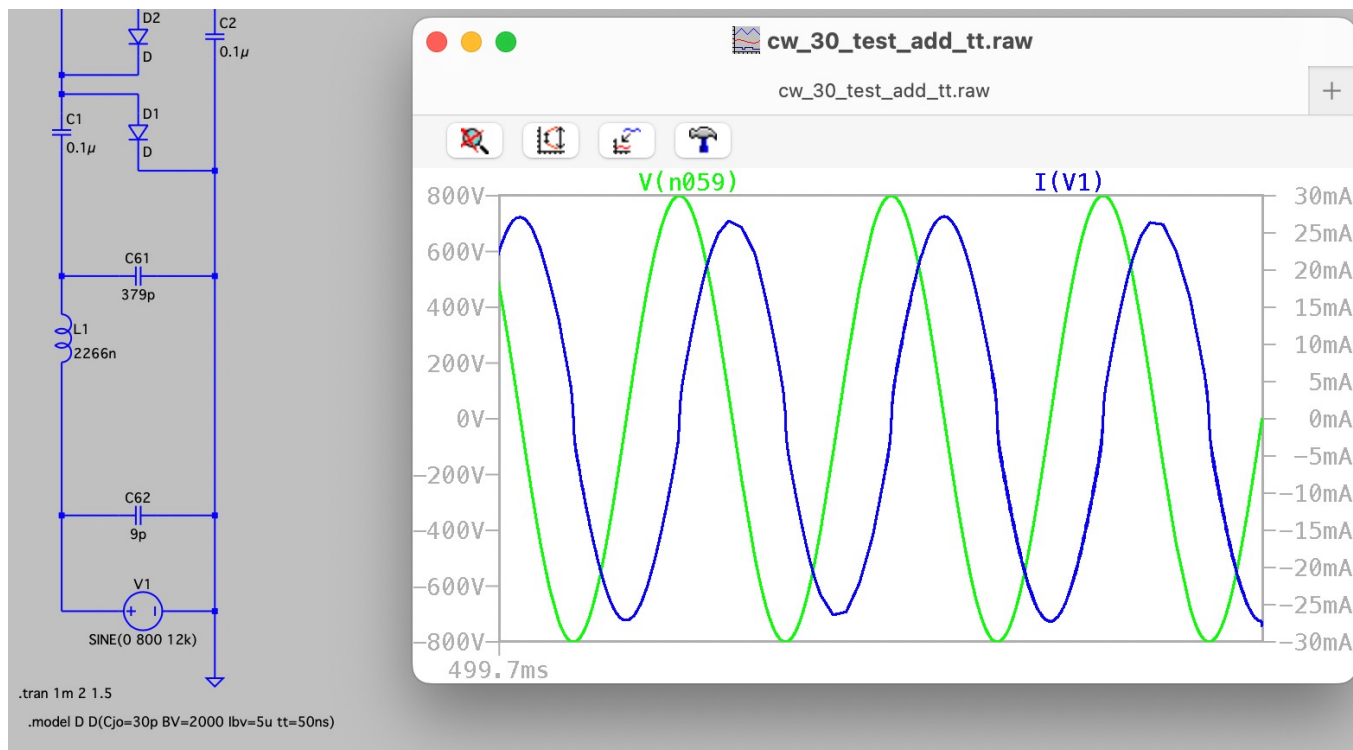


# LTspiceによる実効的な容量の計算

30段を想定。

$$C_{eff} = \frac{I_{pp}}{2\pi f V_{pp}} \rightarrow 2\pi f = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{よりその周波数で共振するLが求まる。}$$

本実験ではコイル選定の制限からインダクタンスはあらかじめ決まっており共振する周波数を推定した。



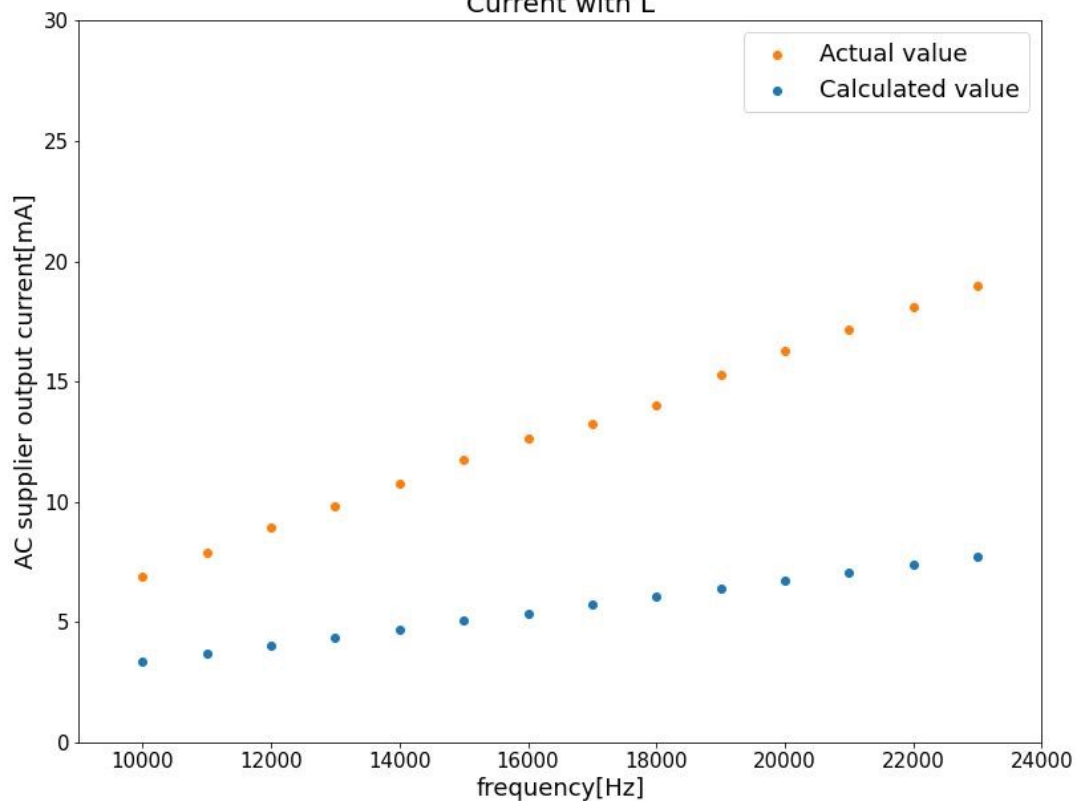
左のシミュレーションでは  
 $I_{pp}=52\text{mA}$ ,  $V_{pp}=1600\text{V}$   
 $\rightarrow C=431\text{pF}$   
100mHのコイルでは  
約24kHzで共振する

# 実験結果

30段のCWに200Vppを印加。計算値は  $I_{pp} = 2\pi f C_{cable} V_{pp} + \frac{V_{pp}}{2\pi f L}$  で計算。

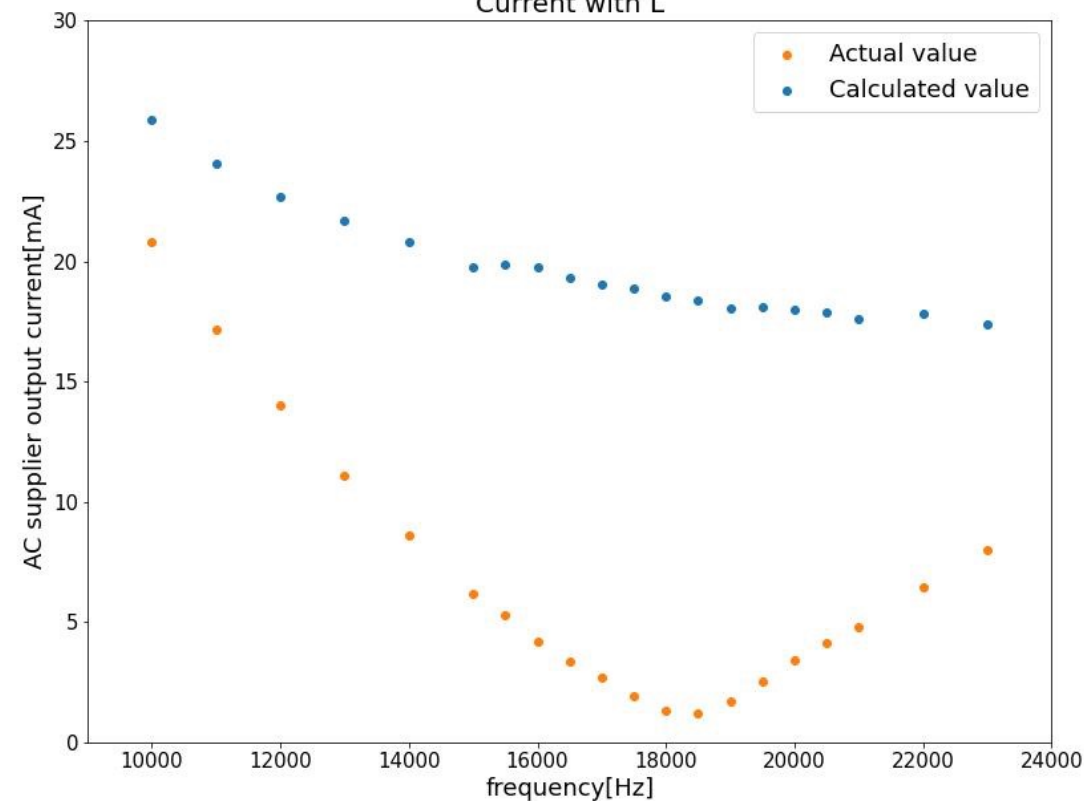
コイル無し

Current with L



コイル有り

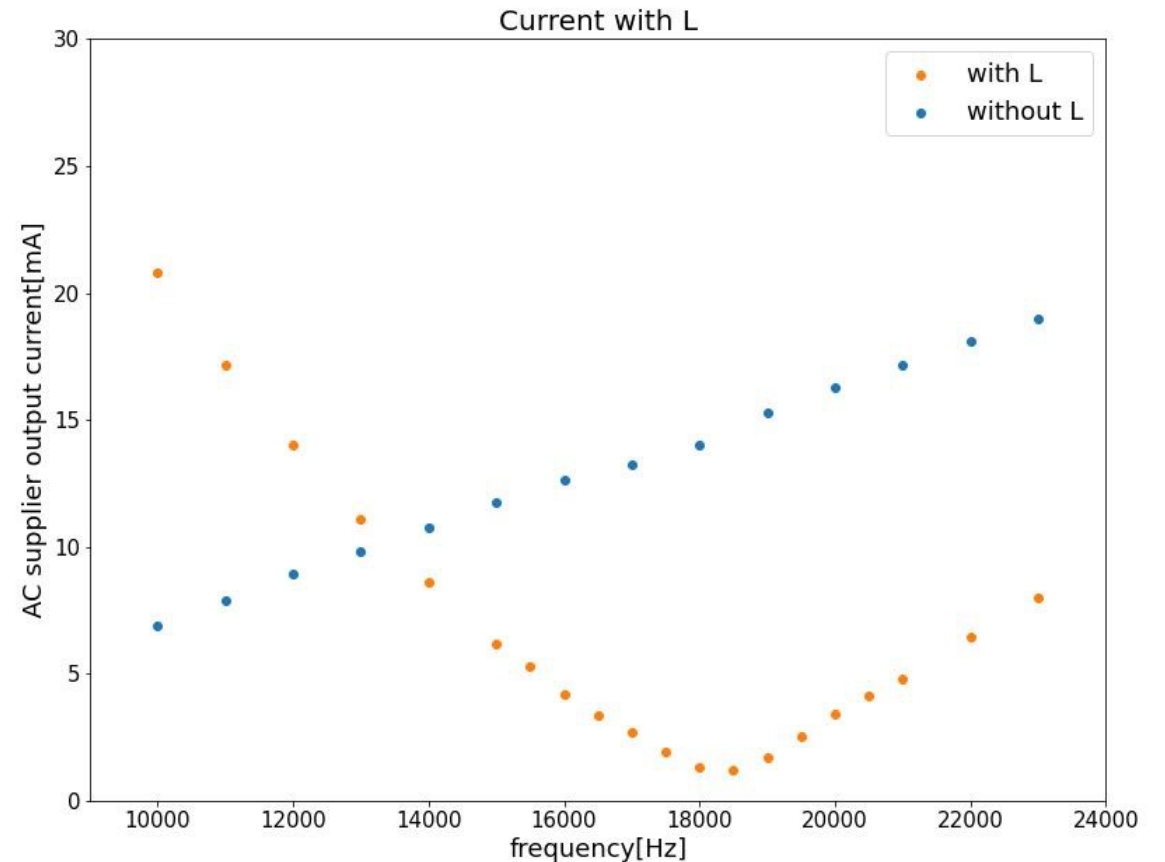
Current with L



# 考察

- 昇圧効率に変化しなかった
- 18kHzで電流が大きく異なる  
コイル有り:1.22mA、コイル無し:14.02mA
- 共振周波数が予想値と大きく異なる
  1. simulationのダイオードモデル
  2. トランスのインダクタンス
  3. コンデンサのCの電圧依存の考慮が足りていない可能性がある。
- 共振周波数周辺で異なる振幅を持つ波形が周期的に現れて不安定になった。

コイルの有無の比較



# まとめ

- AXEL実験
  - 高圧キセノンガスTPCによる0v $\beta$ 探索
  - 耐高圧の巨大なフィールドスルーを避けるためにチェンバー内で高電圧を生成
- 新しい電源の開発
  - オーディオアンプと昇圧トランスを用いて、安価に大電力の電源を開発
  - 元の電源より昇圧効率は少し落ちたが、CWの多段化に対応可能
- コイル追加による共振
  - 容量性負荷に対して並列共振を起こし、電源の出力電流を削減
  - 小電力のAC電源で同軸ケーブルを通して安定して昇圧できることが期待できる
- 今後：目標電圧到達を目指して放電対策

# Backup

## 0ubbの崩壊の詳細