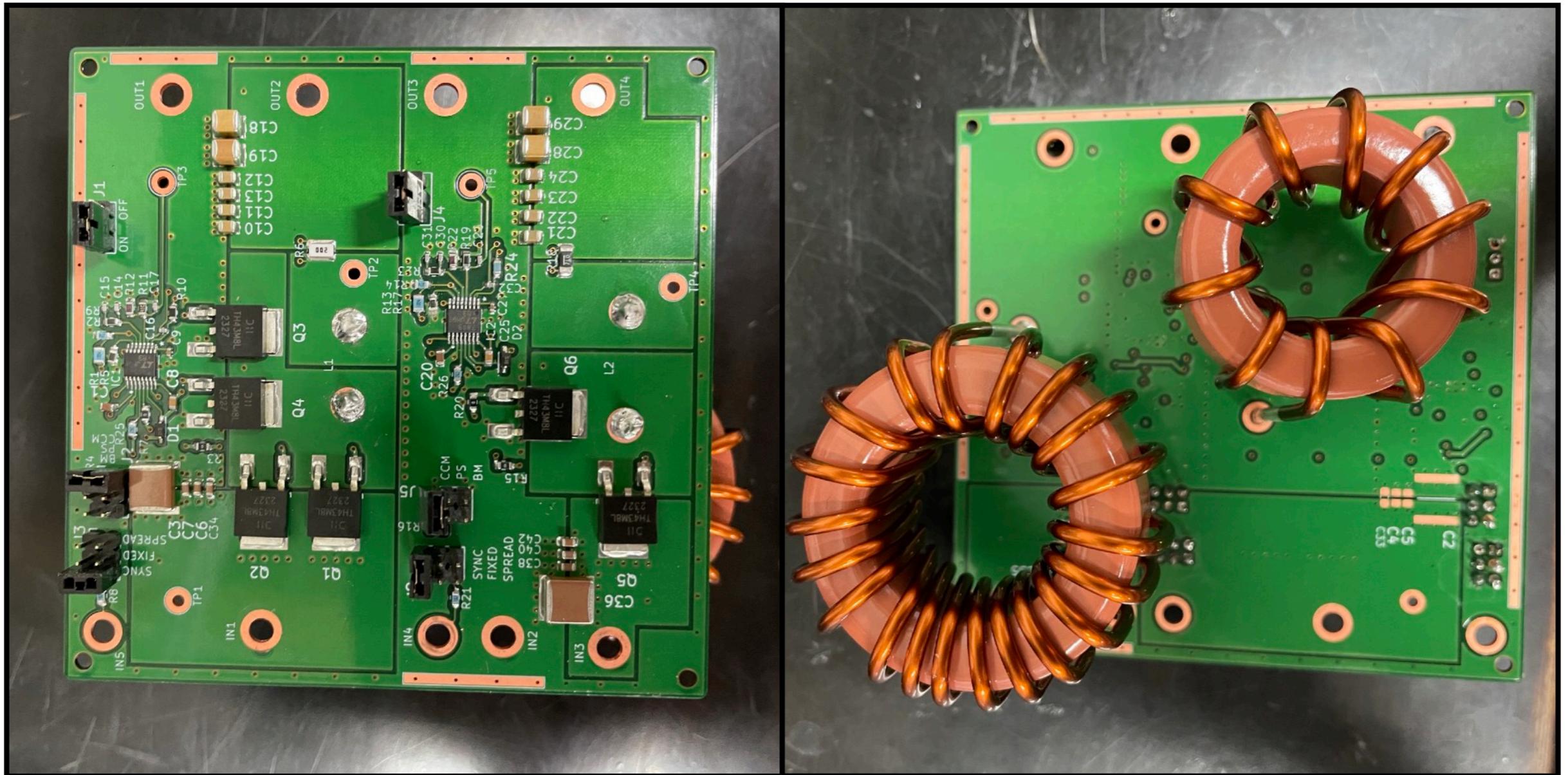


# J-PARC muon $g-2$ /EDM実験用

## DC/DCコンバーターの開発状況及び課題

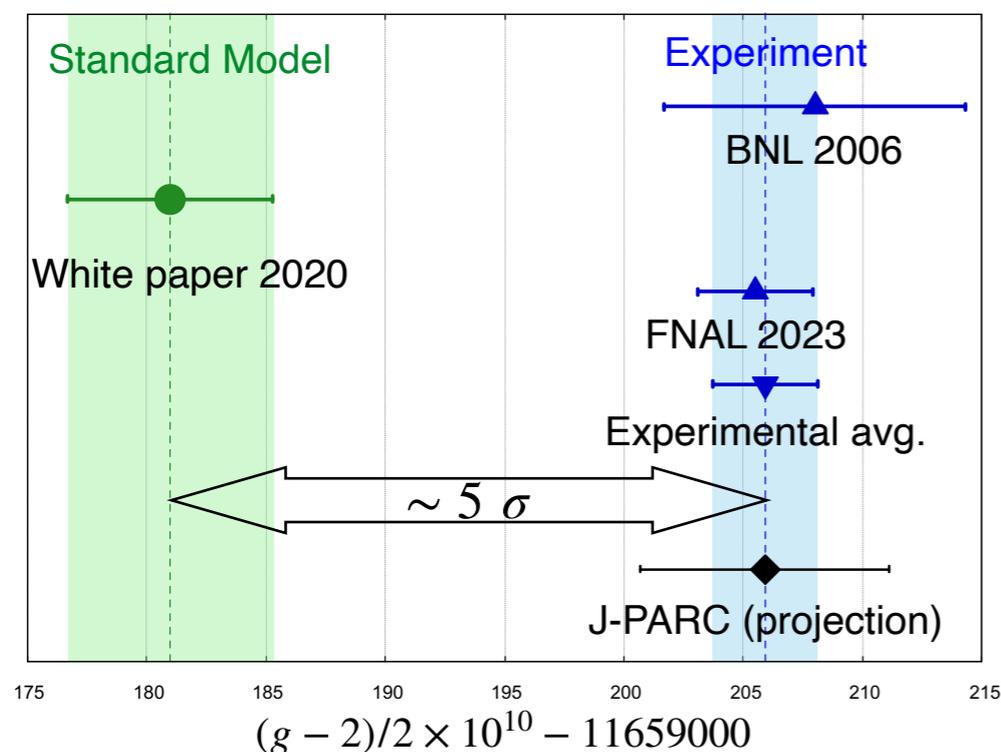


2024/11/18

S.Fukumura

# Muon $g-2$ and EDM

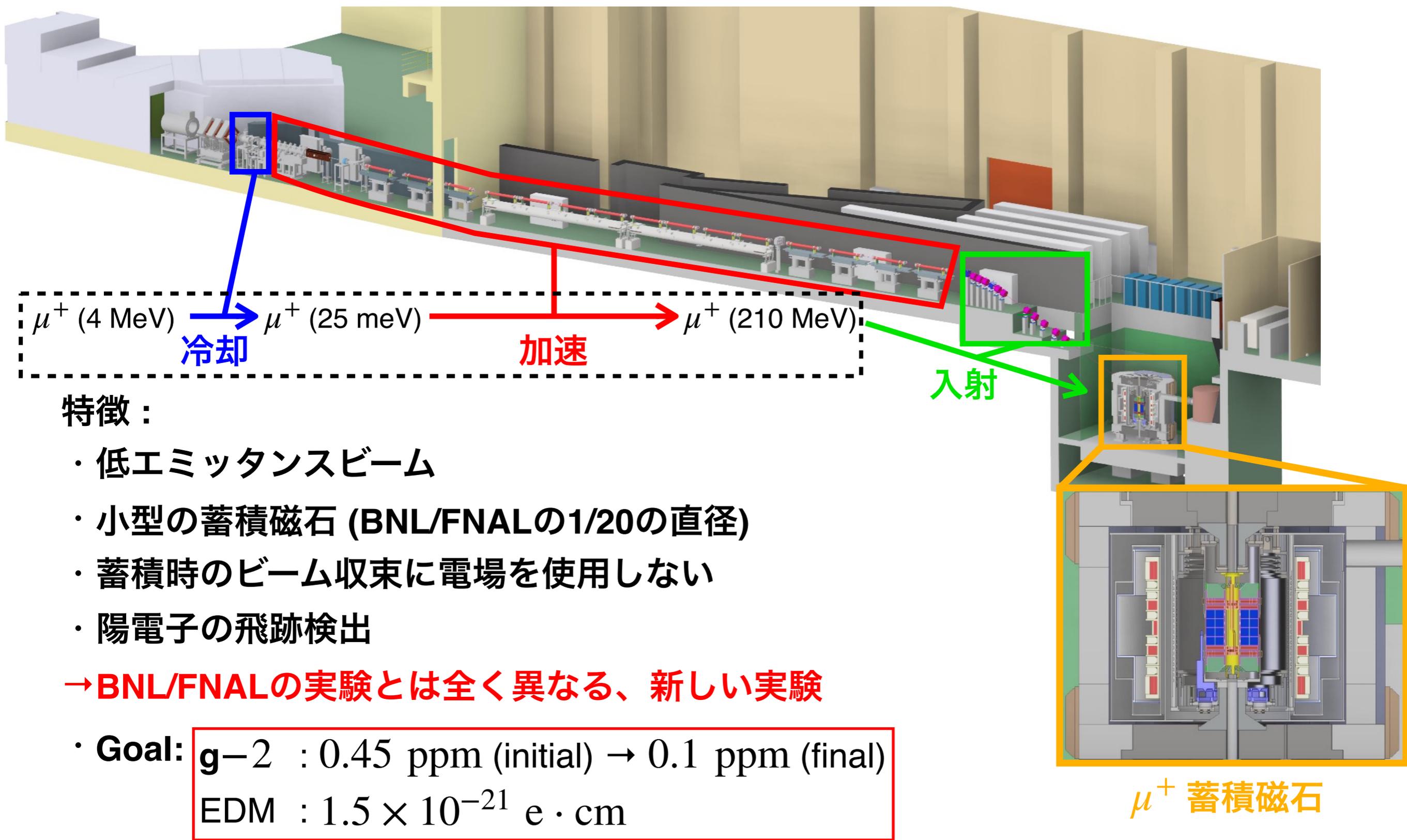
- $g-2$  : 異常磁気能率。磁気能率  $g$  と2の差を表す
- ミューオンの $g-2$ は素粒子物理学において非常に重要な値



- ... – 標準模型での予測値と実験値は  $5\sigma$  程度乖離している
- 近年では実験値に近い理論計算結果も報告されている
- ex). CMD-3 の結果を使用した例, lattice QCD  
→ **標準模型の予測値のアップデートが進行中**

- 測定精度の高い実験は同じ装置、同じ手法が使われている  
→ **独立した新しい実験が必要**
- ミューオンEDMも同様に重要な値  
... EDMが存在すれば、CPT定理によりCP対称性の破れが示唆される
- 現在のミューオンEDMの実験上限 :  $1.8 \times 10^{-19} \text{ e} \cdot \text{cm}$   
...Phys. Rev. D. **80** 052008 (2009)

# J-PARC muon g-2/EDM experiment

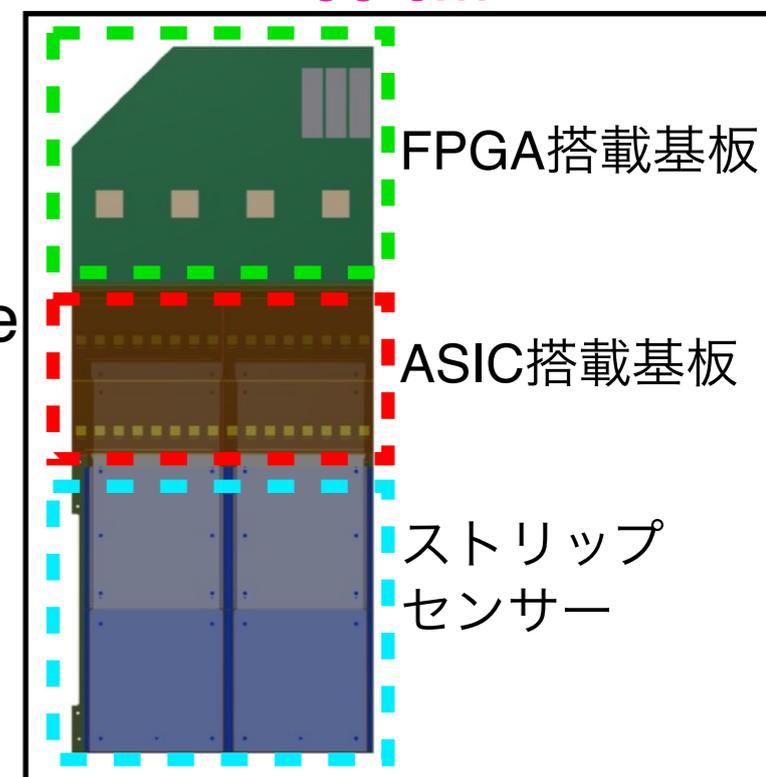
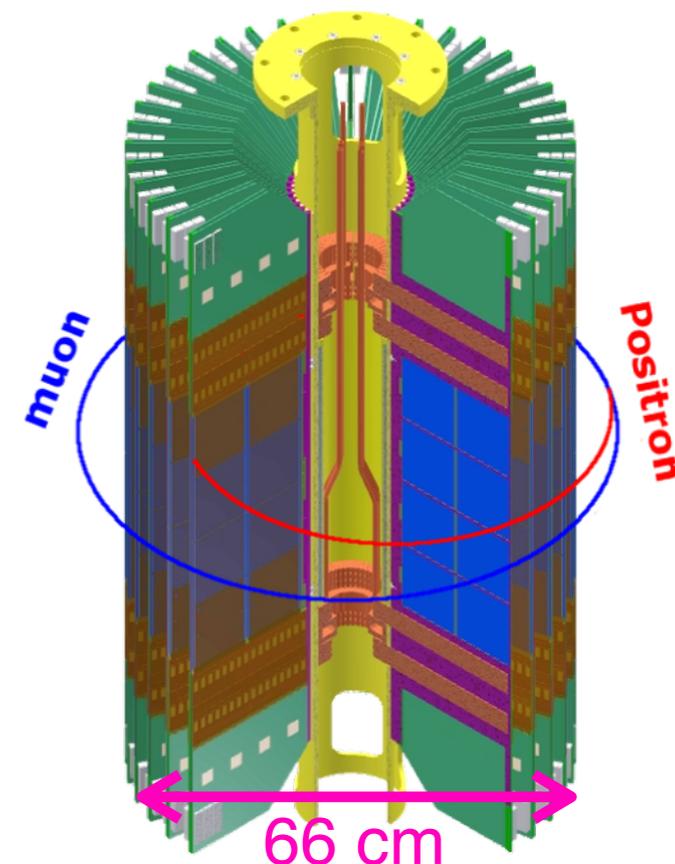


# 陽電子飛跡検出用シリコンストリップ検出器

- 崩壊陽電子の運動は軌道半径から決定できる
  - 崩壊陽電子の飛跡を再構成する
    - ...  $\mu^+$  の崩壊時刻は  $e^+$  の飛跡を周回軌道に外挿して決定
- $\mu^+$  蓄積磁石がコンパクト (BNL, FNAL の1/20の直径)
  - 崩壊  $e^+$  の生成量が多い (最大  $30 e^+ / 5 \text{ ns}$ )
  - 検出器の設置スペースが限られる

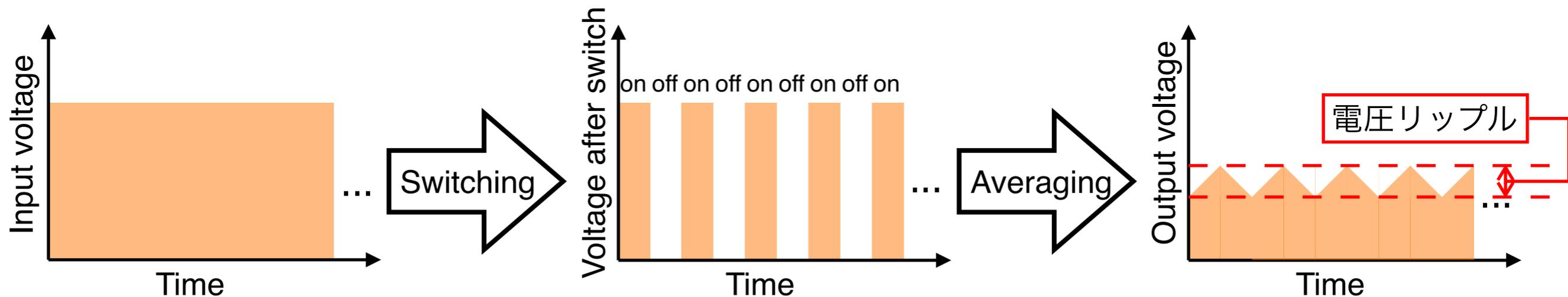
## ➡ シリコンストリップ検出器を放射状に配置する

- 検出器は全40層 (ベーン)
    - 各ベーンは4台の検出器モジュール(Q-vane)で構成
  - ストリップ幅  $190 \mu\text{m}$ ,  $1024 \text{ ch} \times 4 \text{ sensor} / \text{Q-vane}$
  - 信号増幅処理時間  $100 \text{ ns}$
  - タイムスタンプ  $5 \text{ ns}$
- ・ **検出器は蓄積磁石 (真空・3 T) 内に設置する**



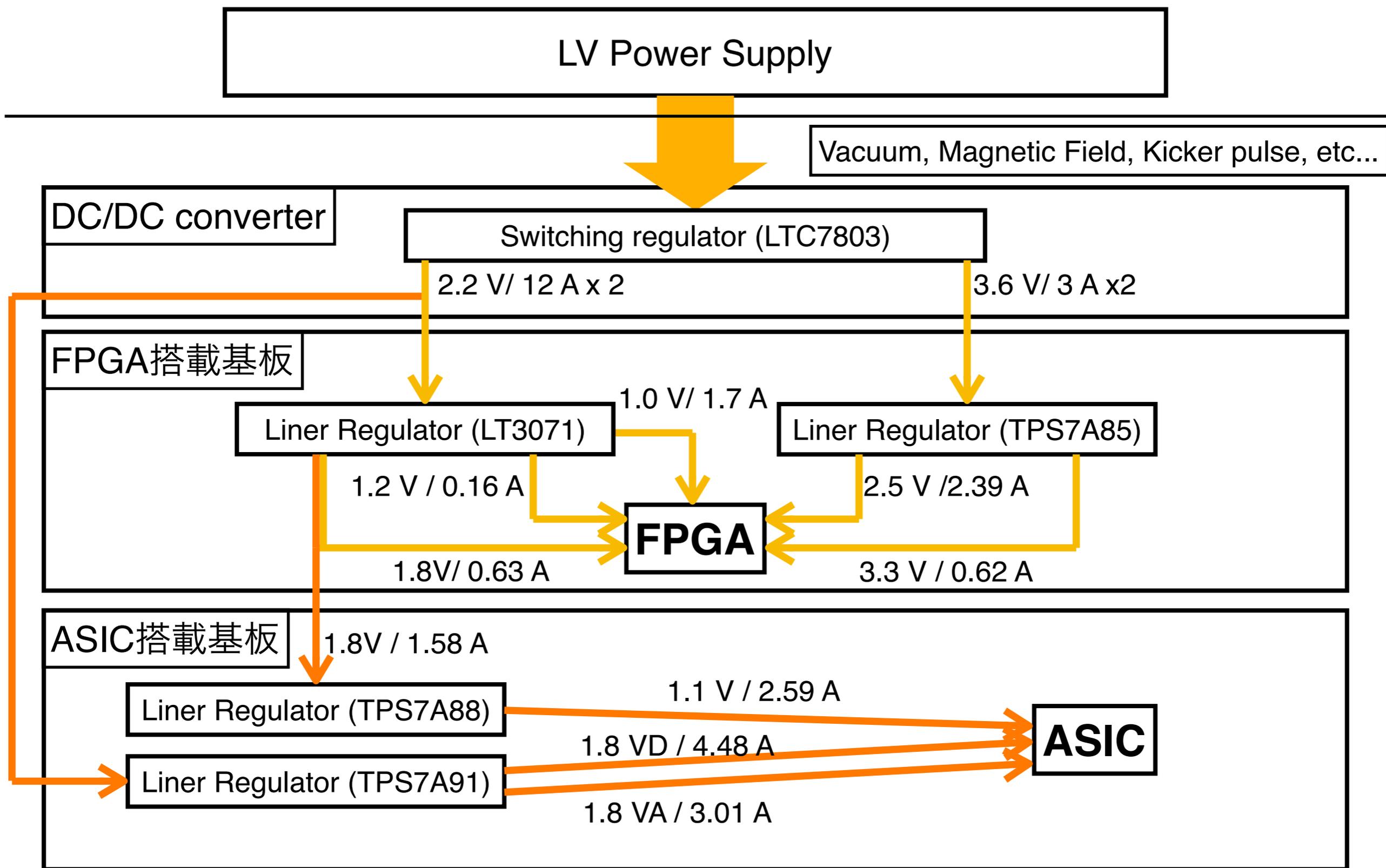
# DC/DCコンバーター

- ・ 検出器全体に合計  $36.2 \text{ W}$  ( $15.01 \text{ A}$ ) x 160台の電力を供給する必要がある  
→ 電源系の占めるスペースや電圧損失を削減するため、  
DC/DCコンバーターを使用する
- ・ DC/DCコンバーター：DC電圧を別の電圧に変換する装置  
... 降圧型のDC/DCコンバーターは、大まかには供給電圧をチョップし  
時間的に平滑化して電圧を下げる



- ・ コイルとコンデンサーで電圧を平滑化するスイッチングインダクタ方式と  
コンデンサーのみで電圧を平滑化するフライングキャパシタ方式がある  
→ ATLAS等で、磁場中での使用実績があるスイッチングインダクタ方式を試作中

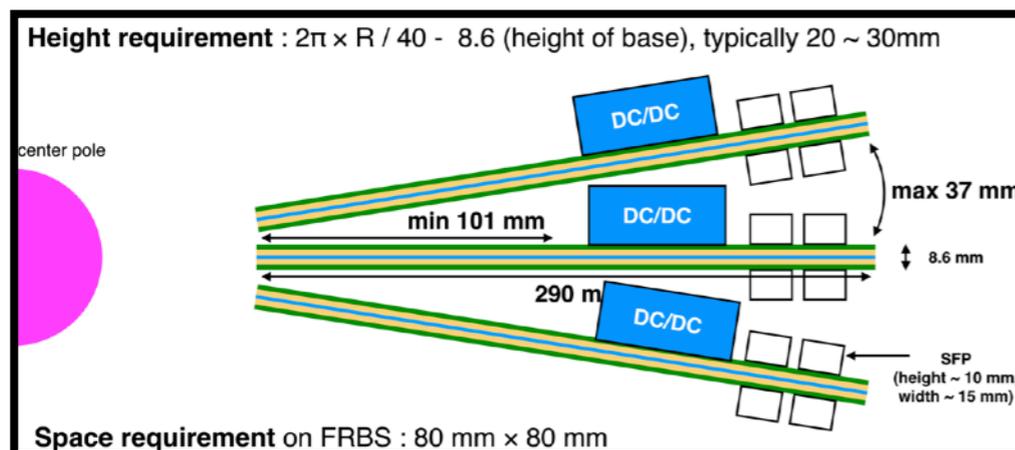
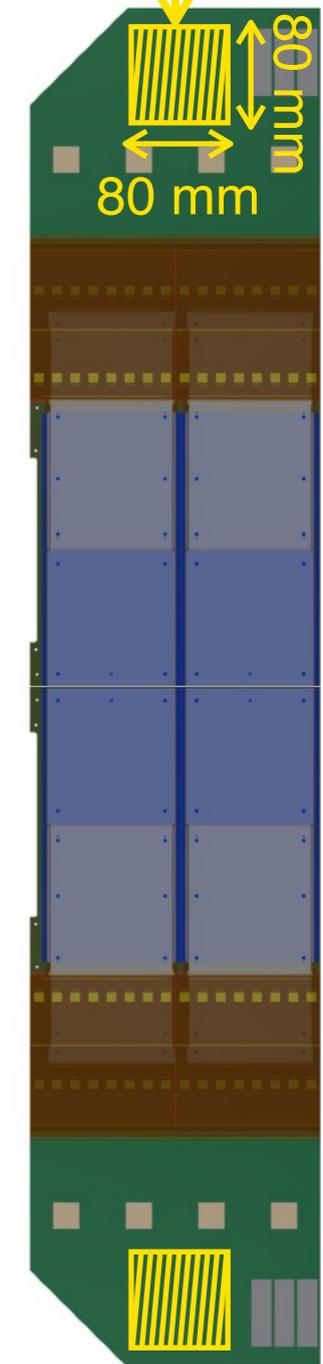
# 電力供給の流れ



# DC/DCコンバーターへの要求

- 1台で2Q-vaneへ電力を供給  
→ 2.2 V - 24 A と 3.6 V - 6 A を同時に出力
- レギュレーターを通した後の電圧変動がFPGAとASICに影響しない  
... **FPGA (XC7A200T-1FFG1156C) が許容できる変動幅は60 mV**  
... ASICについてはDC/DCコンバーターを接続した際のASICのノイズから許容範囲を推定予定
- 1台あたりの発熱量 < 10 W が暫定目標 (= 変換効率 > 85%)  
... 現在設計されている冷却系での熱シミュレーションからの推定  
目標変換効率を下回ると読み出し基板の温度が100度を超える
- DC/DCコンバーターを配置する空間にも制限がある

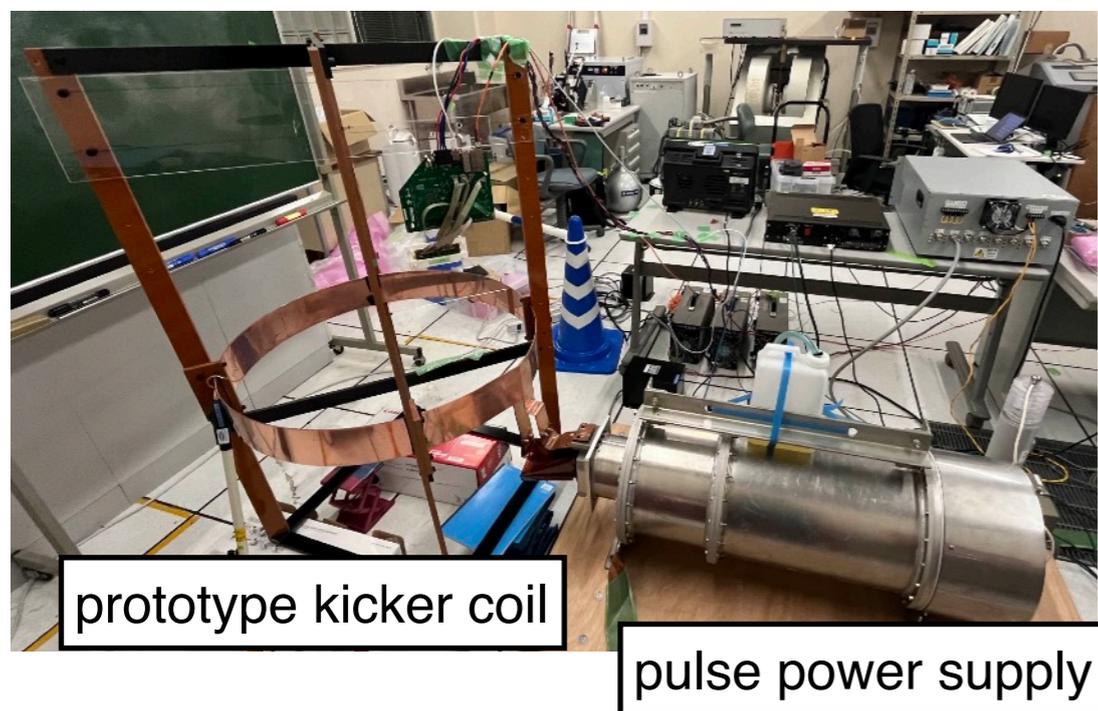
DC/DCコンバーター  
想定搭載領域



→  $W < 80 \text{ mm}$   
 $D < 80 \text{ mm}$   
 $H < 20 - 30 \text{ mm}$   
 でなければならない

# DC/DCコンバーターへの要求 (本実験特有)

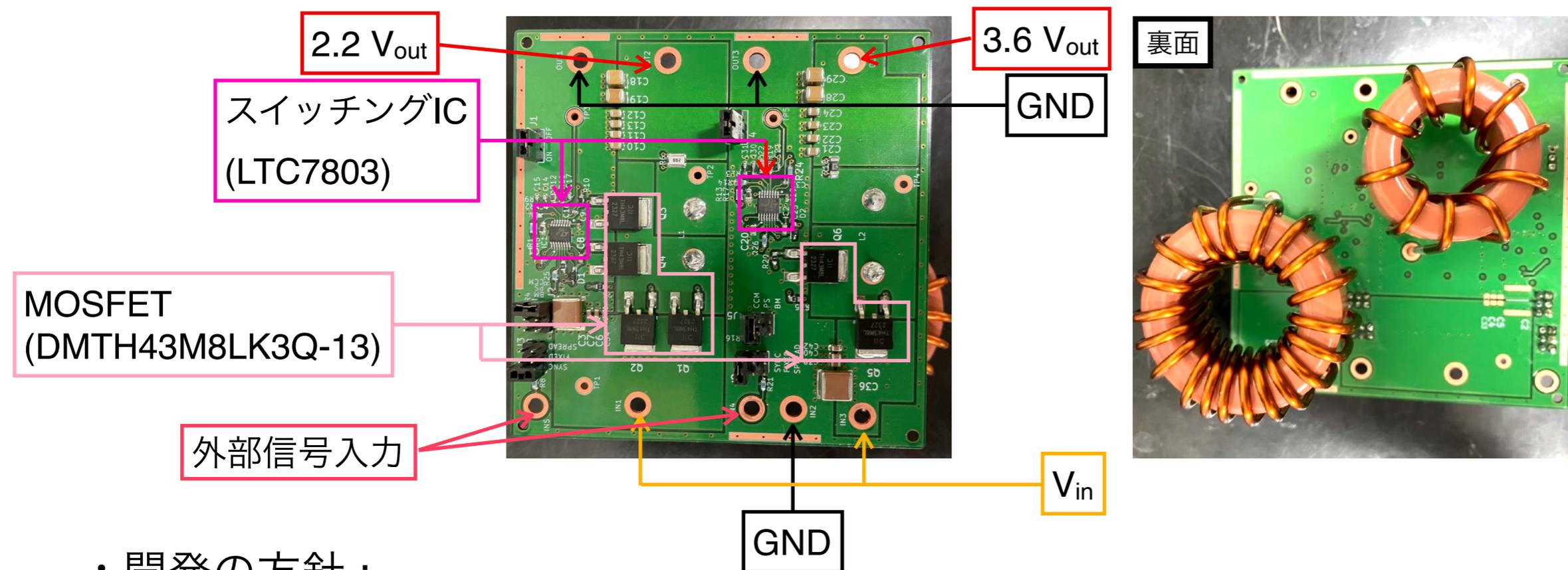
- 一般的な要求に加え、J-PARC muon g-2/EDM 実験での検出器の使用環境から以下の要求も満たす必要がある
  - 真空、3 Tの磁場中でも問題なく動作する
  - ミューオン蓄積磁場は高度にデザインされている
    - 生じる電磁場がミューオン蓄積領域に影響してはいけない  
( $< 3 \mu\text{T}$ ,  $1 \text{ V/m}$  @ 蓄積領域)
  - 全ての要件を、 $\mu^+$ 入射用パルス磁場 (キッカー磁場) 中でも実現



銅製ワンターンコイル ( $\sim \Phi 70 \text{ mm}$ ) に瞬間的に **1.5 kA - 2 kV** を印加して生成 (25 Hz) (磁場強度は  $\sim 1 \text{ mT}$ , 200 ns間のみ印加)

# DC/DCコンバーターv2

- ・現在試作DC/DCコンバーターver.2 の試験中



- ・開発の方針：

- 磁場中で使用する上、漏れ磁場も減らしたい
  - 非磁性コアのトロイダルコイルを特注 (小型化のために低インダクタンス)
- 電源配線での発熱を抑えたい
  - 入力電圧を大きくするため、耐電圧の大きい (~40 V) 部品を使用
- スイッチング周期をミュールオンの寿命 (O( $\mu$ s)) から離したい
  - 最大スイッチング周波数の大きいスイッチングICを使用

# 考慮すべきパラメーター

- ・スイッチングICによる制限でDC/DCコンバーターに流せる電流の上限は

$$I_{L(\max)} = \frac{V_{\text{SENSE}(\max)}}{R_{\text{SENSE}}} - \frac{V_{\text{out}}}{2fL} \left[ 1 - \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \right]$$

- …  $V_{\text{SENSE}}$  : 電流検出用ピンの電圧       $f$  : スwitching周波数 [HZ]
- $R_{\text{SENSE}}$  : 電流検出用抵抗       $L$  : コイルのインダクタンス [H]

- ・データシートから、 $V_{\text{SENSE}}$ は以下の値

min      typ      max

$V_{\text{SENSE}(\max)}$	Maximum Current Sense Threshold	$V_{\text{FB}} = 0.7\text{V}, V_{\text{SENSE}^-} = 3.3\text{V}$	●	45	50	55	mV
--------------------------	---------------------------------	---	---	----	----	----	----

→最大電流は他のパラメーターで決まる

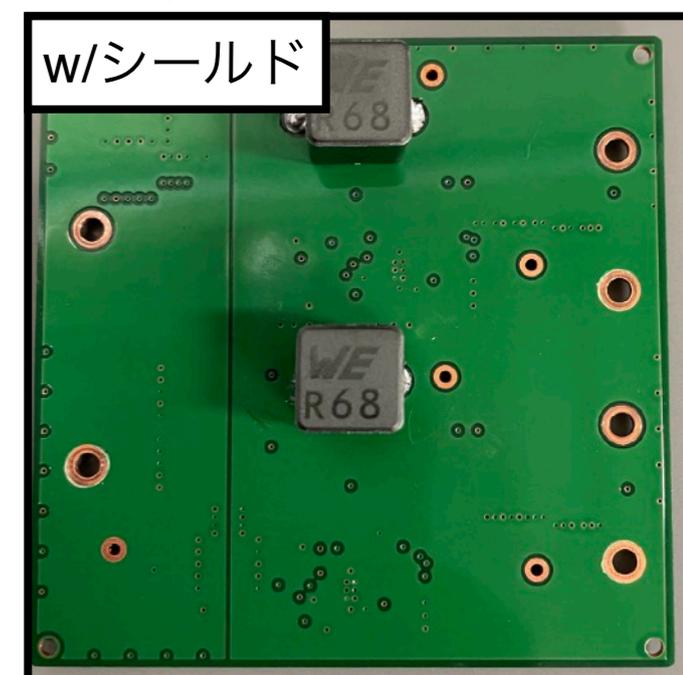
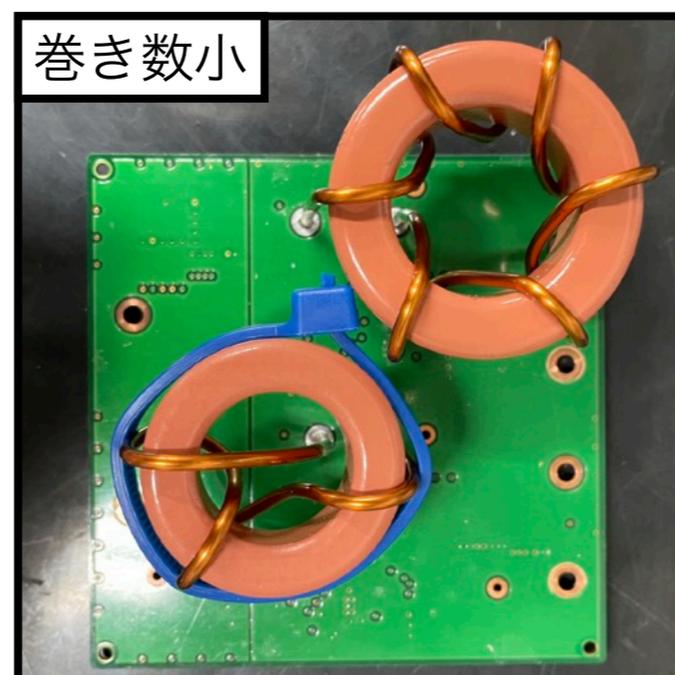
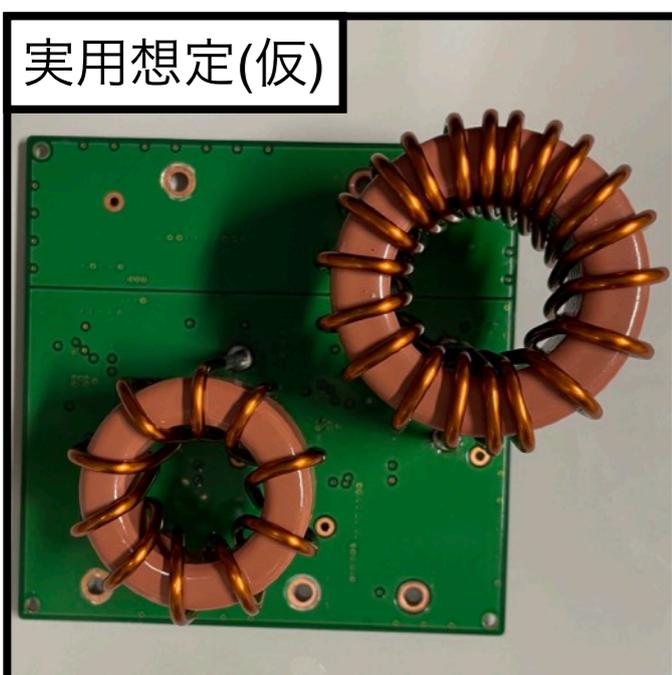
- ・一般的に、DC/DCコンバーターの変換効率はスイッチング周波数や $V_{\text{in}}$ に反比例  
→ $f$ は大きくしたいが変換効率とトレードオフ
- ・ $L$ が小さければコイルも小さくできるが、最大電流とトレードオフ  
… $f$ への要求がない場合、変換効率とトレードオフにすることもできる
- ・ $V_{\text{in}}$ を小さくした場合、電源配線の発熱が大きくなってしまふ
- ・差し当たりは $f = 3 \text{ MHz}$ に合わせてパラメーターを設定

# 出力波形の確認

- $V_{out}$  (3.6 V) を TPS7A85 評価基板に接続し、出力波形を確認  
出力波形の変化を見るために、3通りのコイルを使用

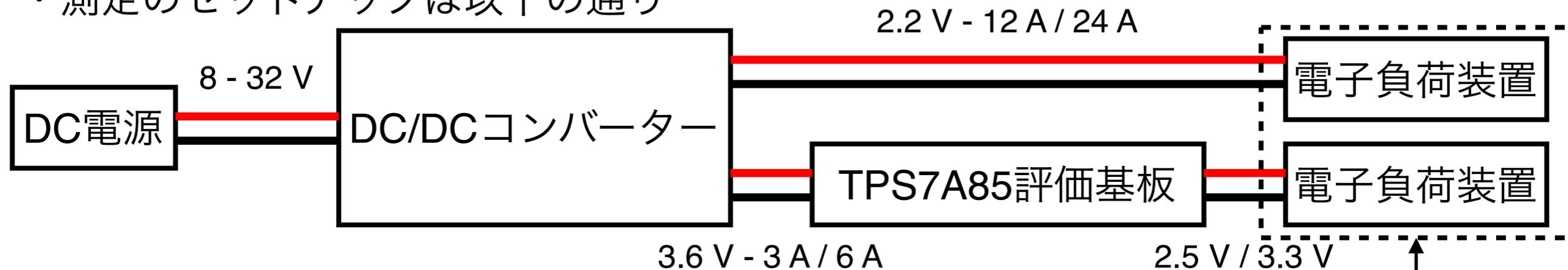
1. 実用性能の評価 : 10 turn ( $2.2 V_{out}$  用、230 nH) と 20 turn ( $3.6 V_{out}$  用、910 nH)  
... インダクタンスやサイズを検討する指針  
製作上の都合で、想定しているサイズより外径が 10 - 15 mm ほど大きい
2. 小巻き数での動作確認 : 3 turn ( $2.2 V_{out}$  用、70 nH) と 6 turn ( $3.6 V_{out}$  用、160 nH)  
→ 非磁性コアトロイダルコイル : 磁場中での使用を想定した特注品

3. 磁気シールドの効果の確認 : 市販品のソレノイドコイル (640 nH)



# 出力波形の確認

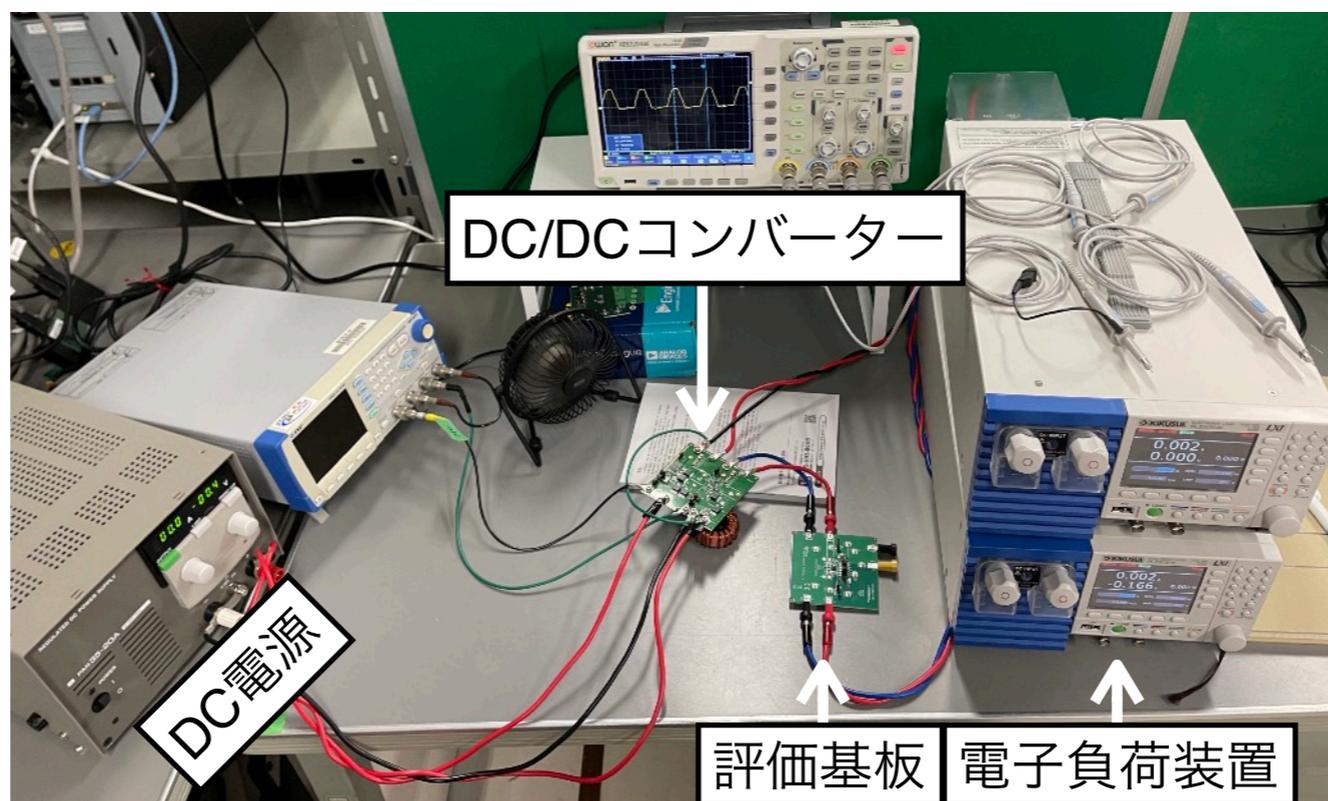
- 測定のセットアップは以下の通り



... 負荷電流は1 Q-vaneあたり12 A (2.2 V) + 3 A (3.6 V)

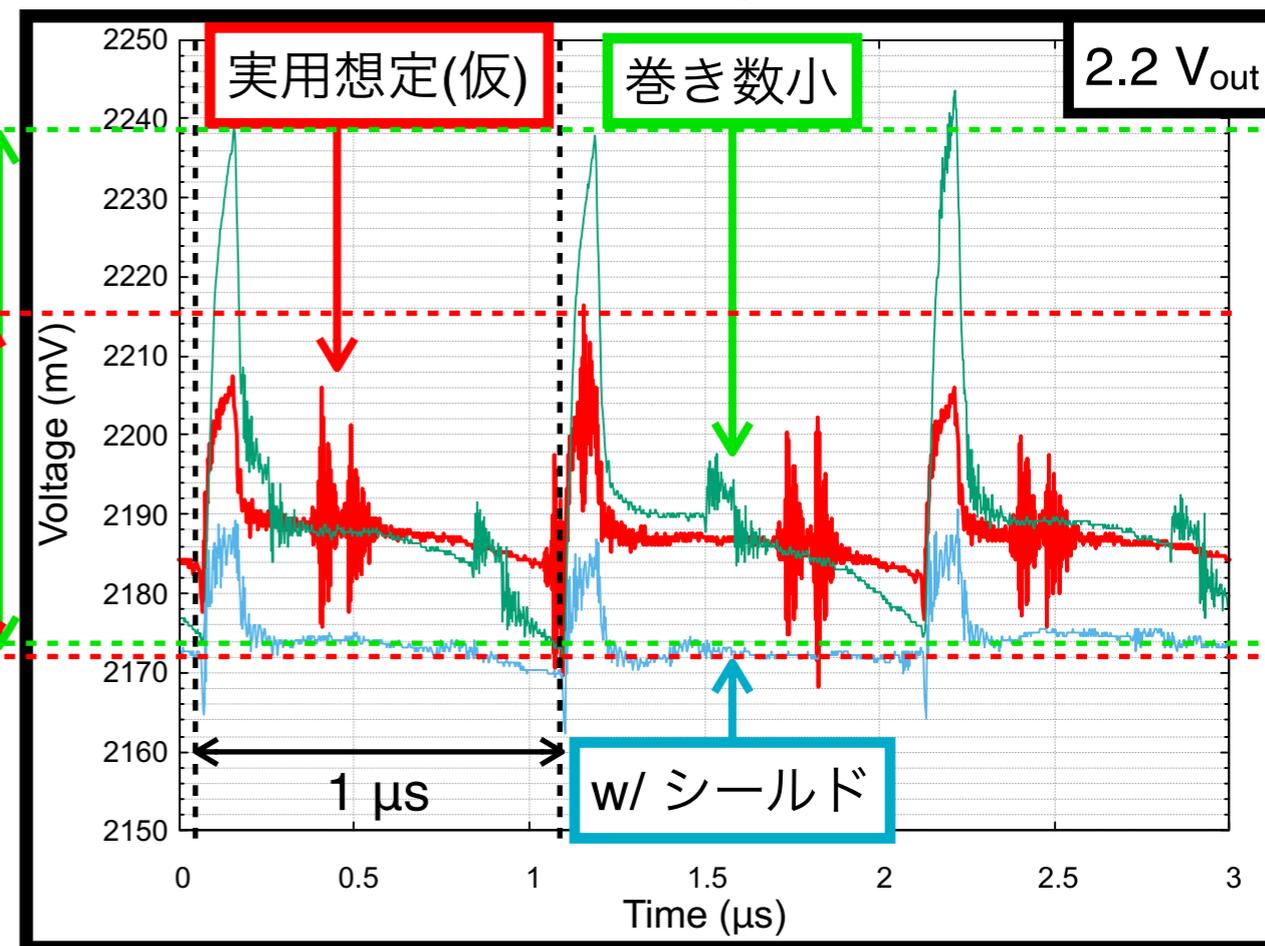
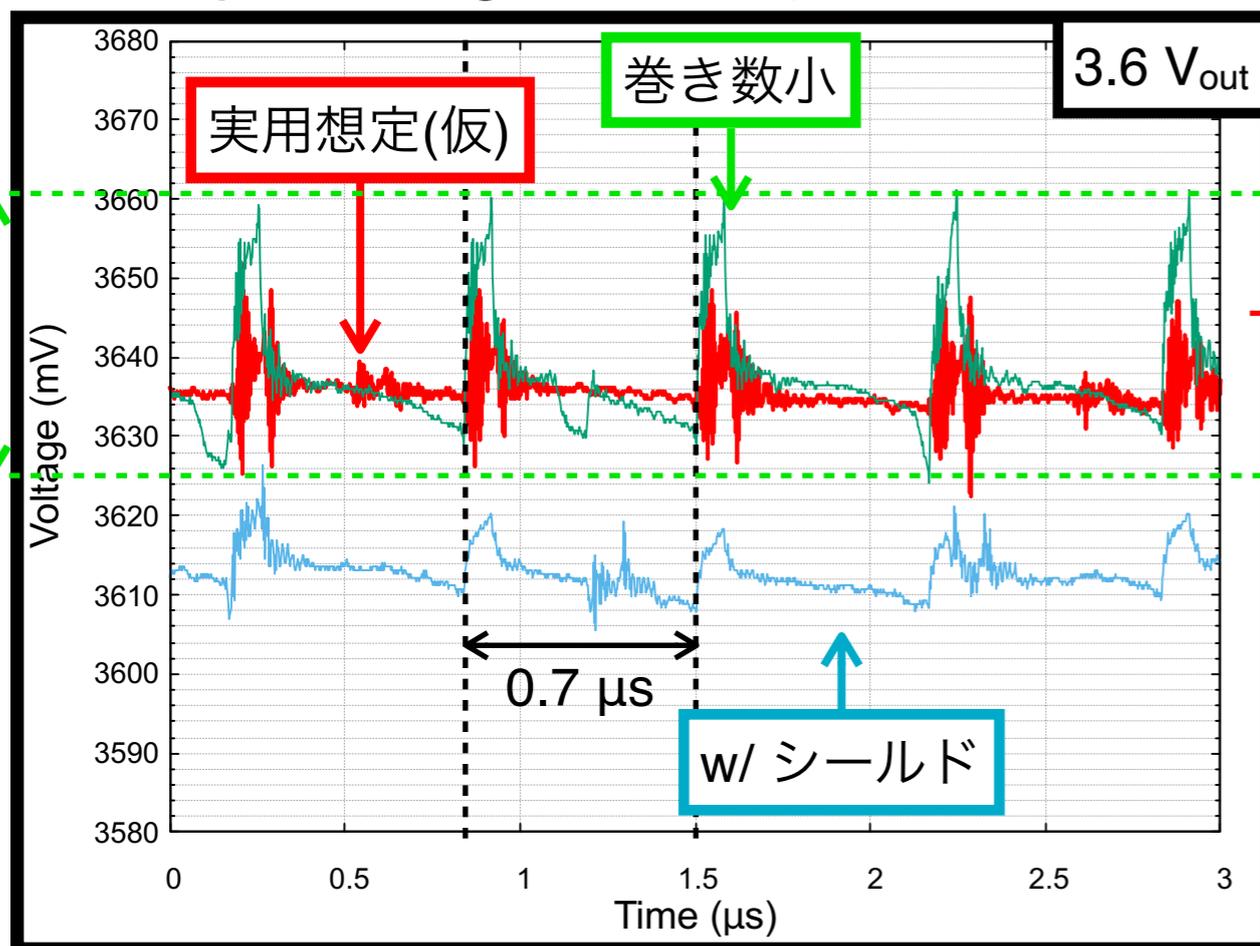
1 DC/DCコンバーターは2 Q-vaneに電力を供給するので  
最終的には24 A (2.2 V) + 6 A (3.6 V)を出力

任意値の電流を引き出す  
電子制御できる可変抵抗  
(のようなもの)



# 出力波形 (DC/DC converter)

- @input voltage = 32 V (1Q-vane分の負荷 : 2.2 V - 12 A + 3.6 V - 3A)



- どの条件でも隣のchのノイズを拾っている

... 3.6 V<sub>out</sub>側は影響が小さい

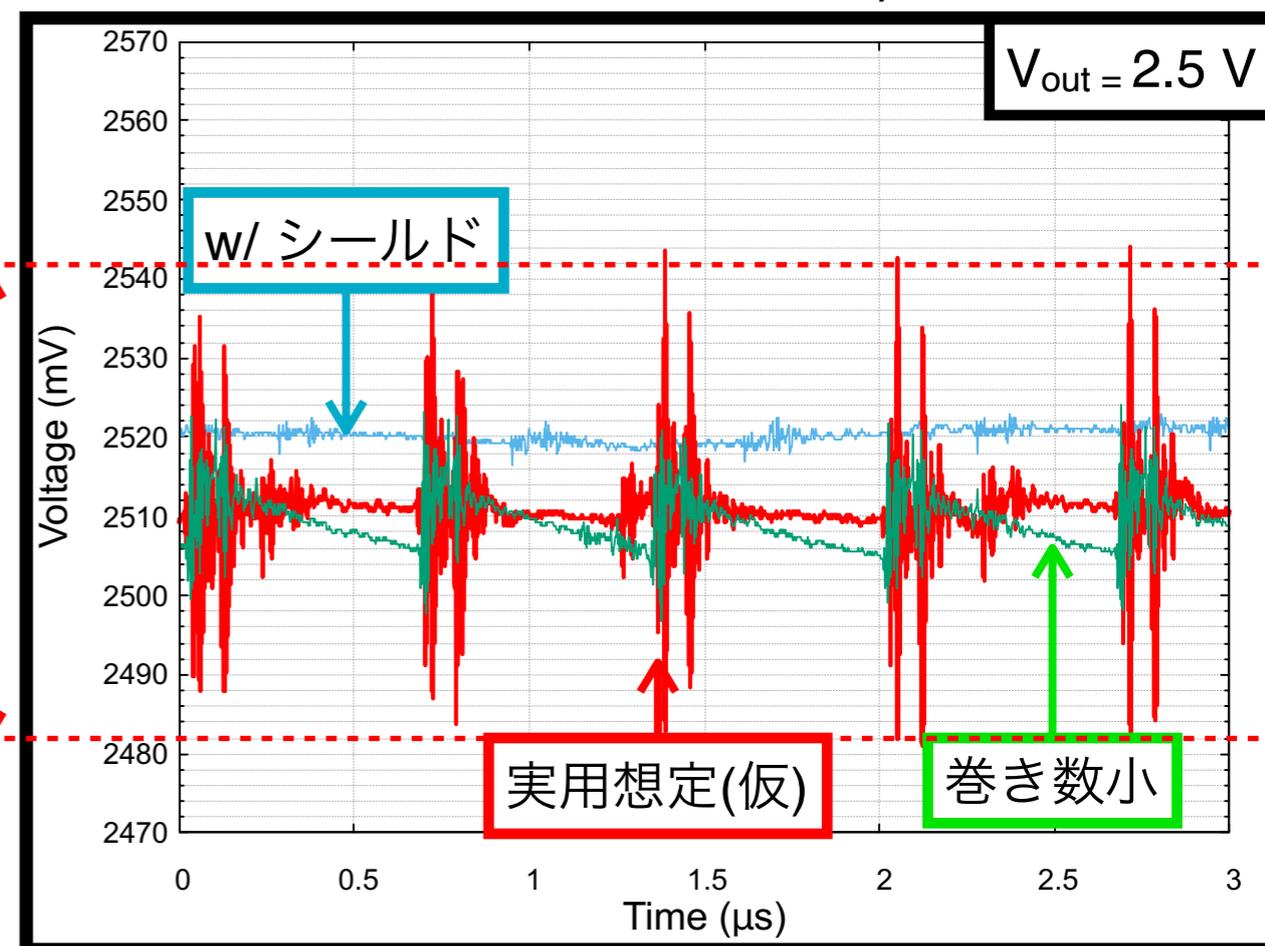
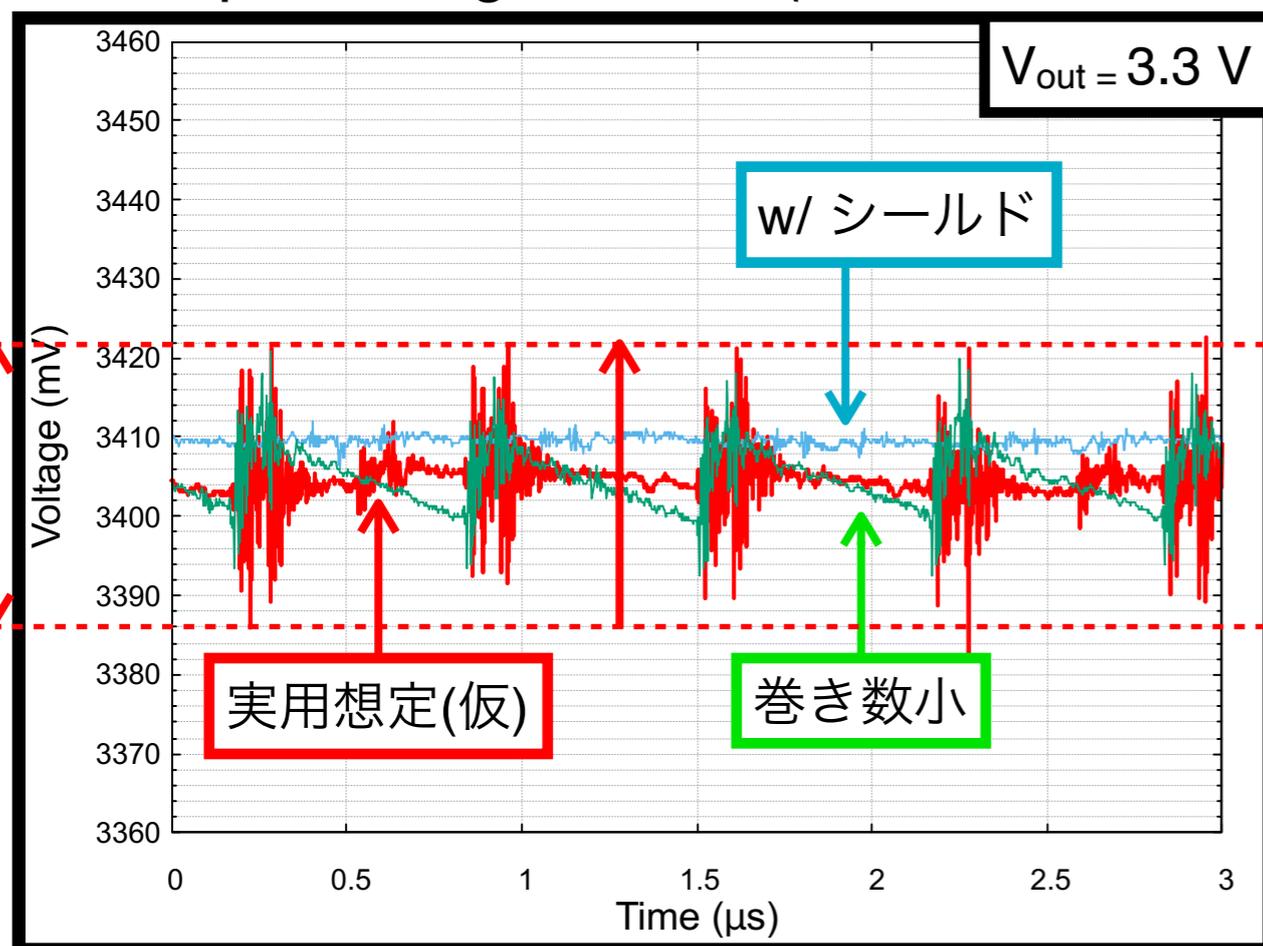
巻き数小 ≧ 実用想定 ≧ w/シールドの順で影響が大きい

→ 漏れ磁場の影響?

- 理想的な場合、スイッチングノイズの大きさはインダクタンスに比例するはず

# 出力波形 (Regulator)

- @input voltage = 32 V (負荷電流は3 Aのまま。運用条件より大きい負荷)



- どのパターンもスイッチングノイズの振幅は減少  
... 実用想定のパターンの変化が最も小さい
- 短期間に激しく振動するようなノイズはそのまま残っている  
... このノイズはw/ シールドにはほぼない → 漏れ磁場の影響?
- いずれの場合も出力電圧はFPGAの推奨電圧範囲に収まる

# 電流値の制限

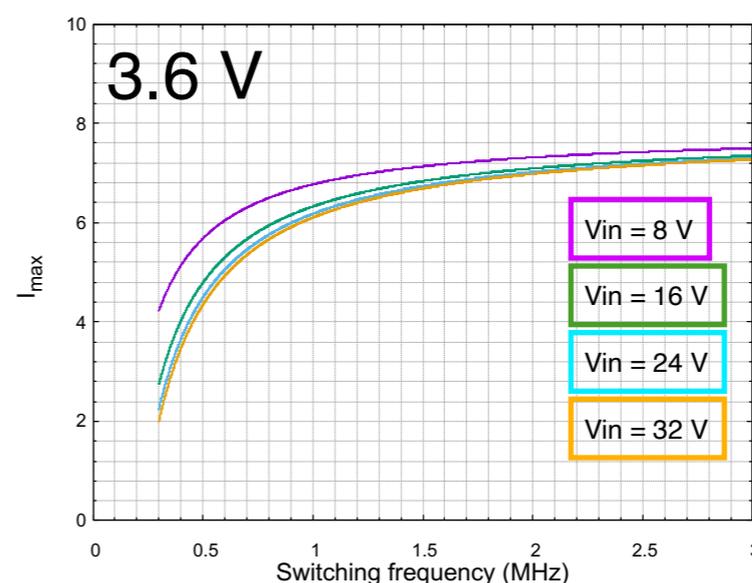
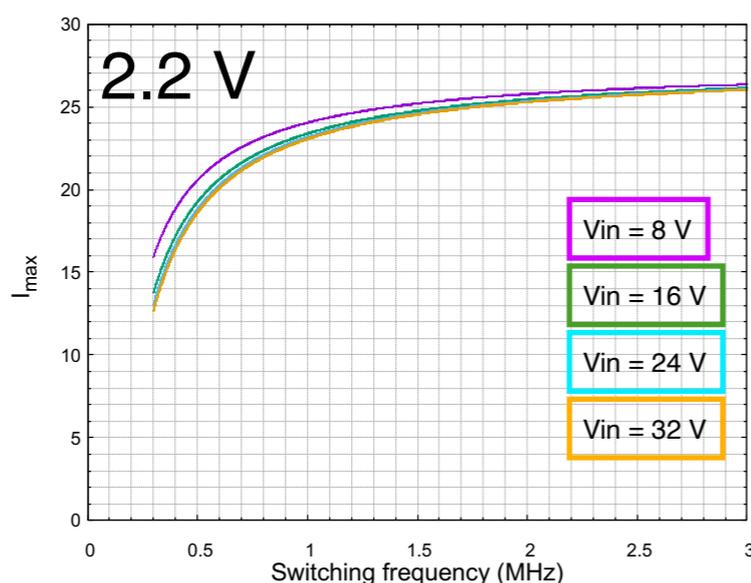
- 現状、ICによる制限でDC/DCコンバーターに流せる電流の上限は

$$I_{L(\max)} = \frac{V_{\text{SENSE}(\max)}}{R_{\text{SENSE}}} - \frac{V_{\text{out}}}{2fL} \left[ 1 - \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \right]$$

- … 現在の基板では  $R_{\text{SENSE}(2.2\text{ V})} = 2\text{ m}\Omega$ 、 $R_{\text{SENSE}(3.6\text{ V})} = 7\text{ m}\Omega$  としている  
 $V_{\text{SENSE}}$  については

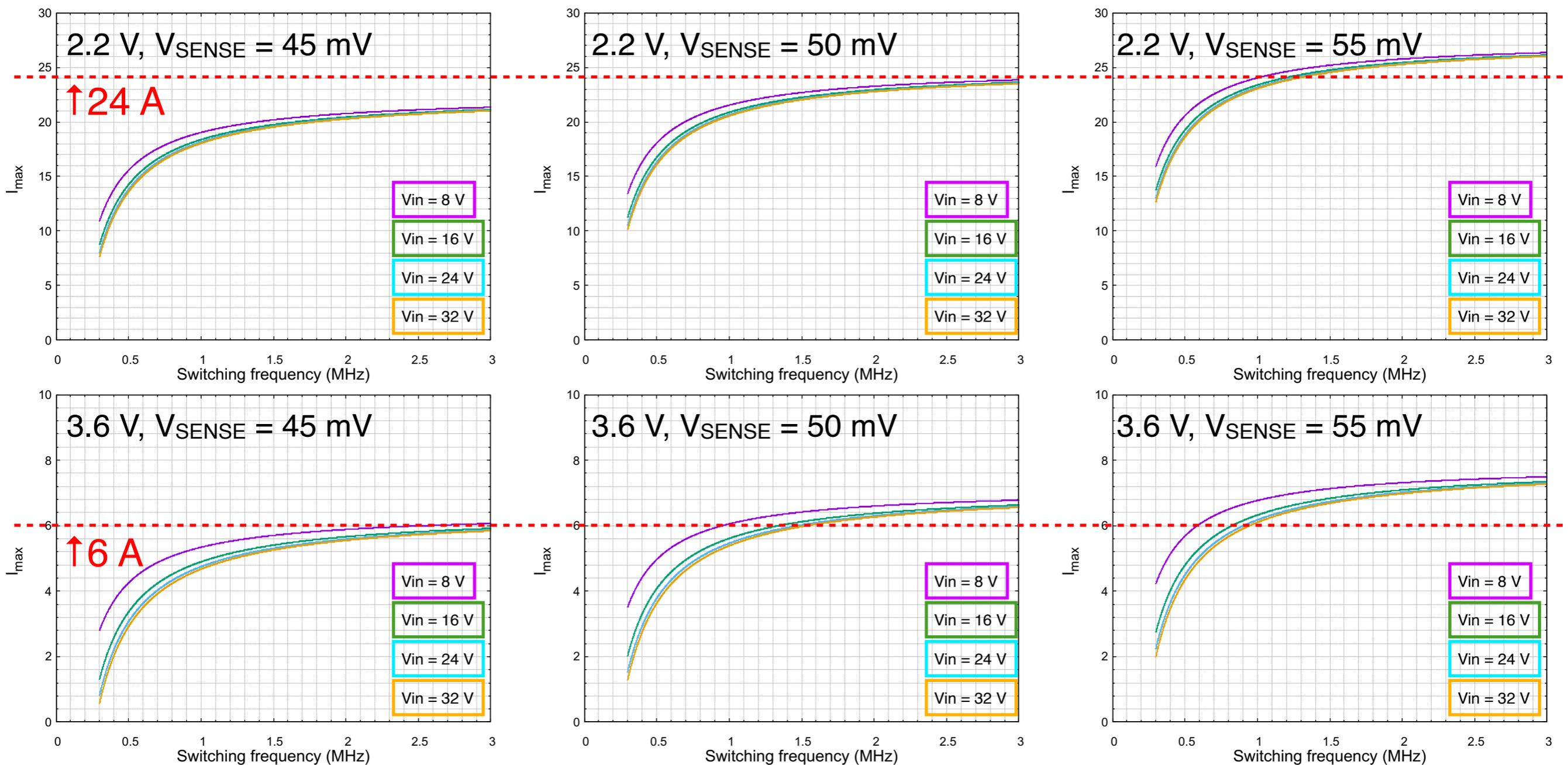
$V_{\text{SENSE}(\text{MAX})}$	Maximum Current Sense Threshold	$V_{\text{FB}} = 0.7\text{V}$ , $V_{\text{SENSE}^-} = 3.3\text{V}$	●	45	50	55	mV
--------------------------------	---------------------------------	--	---	----	----	----	----

→最も楽観的な場合 ( $V_{\text{SENSE}} = 55\text{ mV}$ ,  $L_{2.2\text{ V}} = 230\text{ nH}$ ,  $L_{3.6\text{ V}} = 910\text{ nH}$ ) でも  
 スイッチング周波数が小さいと想定している電流は流せない



# 電流値の制限

・ 3通りの $V_{\text{SENSE}}$ で計算すると以下の通り

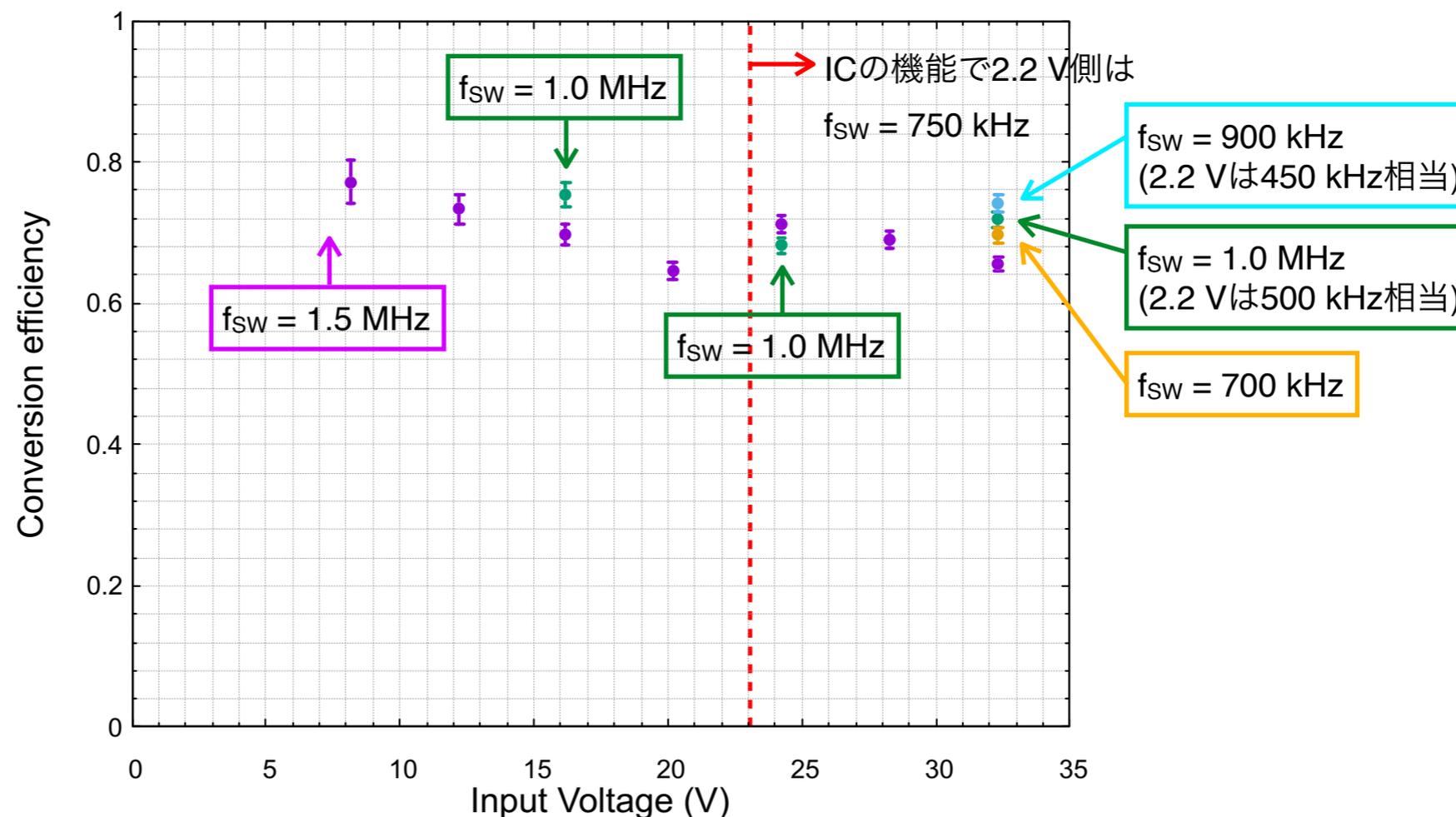


... 2.2 V側はtypicalの場合でも24 A流せるか怪しい

→ 安定した動作のために、 $R_{\text{SENSE}}$ の調節が必要

# 変換効率

- ・現状でも  $f_{sw} = 1.5 \text{ MHz}$  以上では  $V_{in} = 8 - 32 \text{ V}$  で問題なく動く  
→  $f_{sw} = 1.5 \text{ MHz}$  + 他の  $f_{sw}$  でも動く 限り測定した変換効率は以下の通り

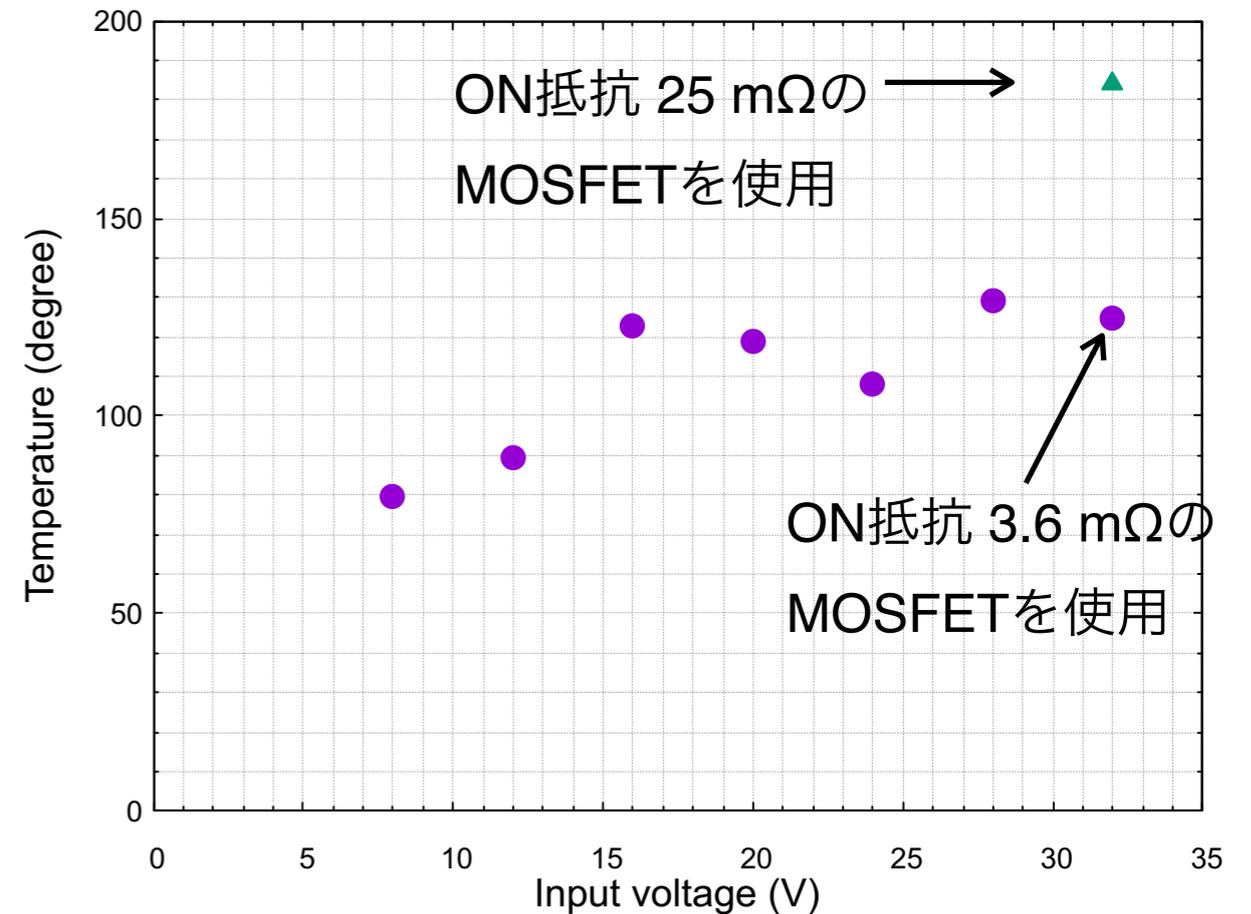
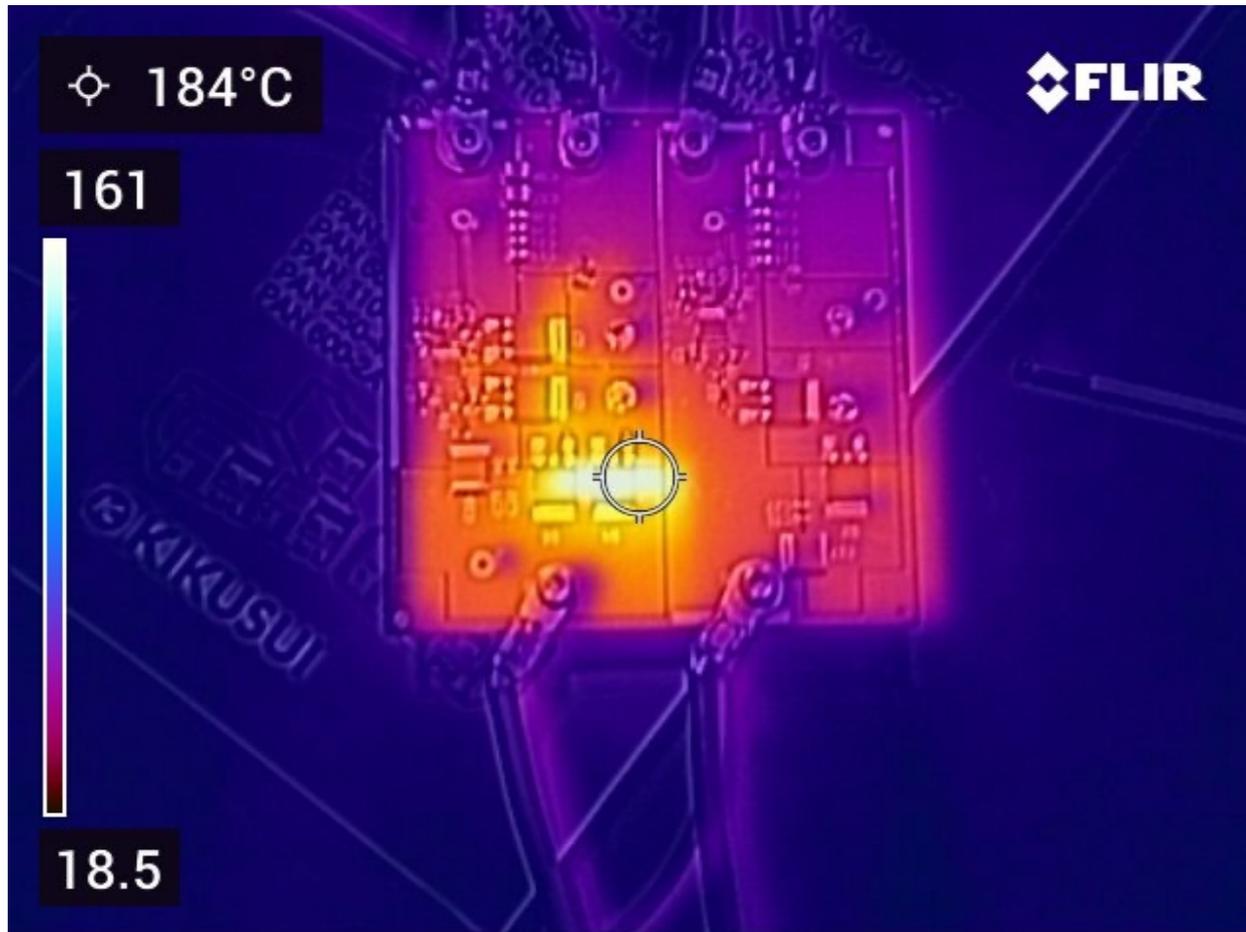


... 電圧 : オシロスコープの1ADC, 電流 : 電源の最小目盛を不確かさとしている

- ・傾向としては  $V_{in}$ ,  $f_{sw}$  共に小さいほど変換効率は向上する  
→ 最大電流を変えないのであれば、 $L$  を大きくして補償する必要がある  
= 変換効率向上と空間的制約 (コイルのサイズ) がトレードオフ

# 発熱の状態

- ・サーモカメラで熱の状態を確認すると、2.2 V側MOSFETが激しく発熱している  
... 2 Q-vane分の負荷 (2.2 V - 24 A + 3.6 V - 6 A) ,  $f_{sw}$  の設定値は2500 kHz



... 変換効率と温度上昇はおおよそ対応している?

(サーモカメラの不確かさを考慮していないので微妙かも)

- ・ MOSFETのON抵抗は小さい方が良さそうだが、抵抗値と発熱は比例してもいなさそう...?

# Problems

- ・現在のバージョンの問題点:
  - GNDの接続が弱い
    - ... コイルの漏れ磁場の影響が大きいのもこのため?
  - 目標変換効率85 %が未達
    - ... スイッチング周波数と $V_{in}$ を下げればいけそうではある
  - スイッチングノイズや変換効率等、色々な点でインダクタンスは大きくしたい
    - ... 空間的な制約もあるので、コイルの形状を工夫するしかない
  - 元々想定していたコイル (低インダクタンス) の時点で業者では製作不可能 (なるべく太い銅線を使いたいが、硬すぎるらしい)
  - MOSFETの発熱が大きい
- ・いくつかの条件はトレードオフ
  - 何かしら性能に下限を設定しなければパラメーターを決定できない
    - ... 現在熱シミュレーションから変換効率に下限を設定しようとしている

# 苦勞話

- ・スイッチングICの仕様に少々振り回されている
  - 最小スイッチON時間 < 8 nsとなる場合、スイッチング周波数を定数倍してスイッチON時間 > 8 nsとなるように調整
    - 当初の想定である3 MHzを実現できる入力電圧は限られる
  - 出力最大電流は

$$I_{L(\max)} = \frac{V_{\text{SENSE}(\max)}}{R_{\text{SENSE}}} - \frac{V_{\text{out}}}{2fL} \left[ 1 - \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \right]$$

... 適切にパラメーターを設定しなければ想定している電流は流せない  
変換効率を気にして  $f$  を小さくしたところ、この制限に引っかかってしまった

- ・基板納品時点でICやダイオードの向きが逆になっていたことに気づかず、正常に動作させるまでに数枚消費しつつ1.5ヶ月ほどかかってしまった

... 教訓：

- 火入れの前にICのついている向きを確認する
- レイアウト(製造指示書)を他の人にも確認してもらう

# まとめ

- J-PARC muon g-2/EDM実験が推進中
  - ... ミューオンの冷却、再加速といった世界初の技術を組み込んだ実験
  - 先行研究よりもコンパクトであり、異なる系統的不確かさを持つ
- 陽電子飛跡検出のため、シリコンストリップ検出器を使用する
  - ... 電力供給用DC/DCコンバーターを試作中
  - 現状確認した限りではレギュレーターを通した後のノイズは最大 $\pm 25$  mV
- 目標変換効率85%に対し、現状の変換効率は最大でも80%
  - ... 効率低下 (=発熱) の要因としてはMOSFETが大きそう
  - 単純計算ではコイルでの発熱は0.1 W程度 (損失としては1%未満)
  - ... スイッチング周波数や入力電圧の調整で変換効率は向上しそう
  - ただしコイルのサイズや出力最大電流とトレードオフ
- 実用のために理解しなければならないことがまだ多い
  - 実用環境での動作試験を進めていく予定

# 今後の課題

- 最終的には3 Tの磁場中、真空中、25 Hz周期のパルス磁場中で検出器を運用  
→それぞれ試験が必要
- 25 Hz周期のパルス磁場 (キッカー磁場) は銅のワンターンコイルに瞬間的に1.5 kA - 2kVを印加して生成  
→DC/DCコンバーターがどんな影響を受けるかが未知数  
磁場強度自体は~ 1 mT 程度なので、コイルの誘導電流は小さいと思いたい
- コイルは最終的には80個ずつ必要  
... 手巻き以外の解も探しておきたい...
- DC/DCコンバーターのスイッチングノイズがASICの出力にどう影響するかもまだ未知数  
→場合によってはスイッチング周波数にも制限がかかる  
... ミューオンの寿命は静止状態で2.2  $\mu\text{s}$ , 実験で使用する300 MeVでは約6  $\mu\text{s}$   
 $\mathcal{O}(100 \text{ kHz})$ でのスイッチングだと実験に影響しうる