

# SPring-8/SACLAにおける パルス強磁場を用いた 弱結合未知粒子の探索 II

山崎高幸, 稲田聡明<sup>A</sup>, 難波俊雄, 浅井祥仁<sup>A</sup>, 小林富雄,  
玉作賢治<sup>B</sup>, 田中義人<sup>B</sup>, 犬伏雄一<sup>B</sup>, 澤田桂<sup>B</sup>, 矢橋牧名<sup>B</sup>, 石川哲也<sup>B</sup>,  
松尾晶<sup>C</sup>, 川口孝志<sup>C</sup>, 金道浩一<sup>C</sup>, 鳴海康雄<sup>D</sup>, 野尻浩之<sup>D</sup>

東大素セ, 東大理<sup>A</sup>, 理研/Spring-8/SACLA<sup>B</sup>, 東大物性研<sup>C</sup>, 東北大金研<sup>D</sup>

# 目次

- 試作機の磁場テスト
- 小型で高速充電可能なコンデンサバンクの設計
- 期待感度
- まとめ

# 試作機の磁場テスト

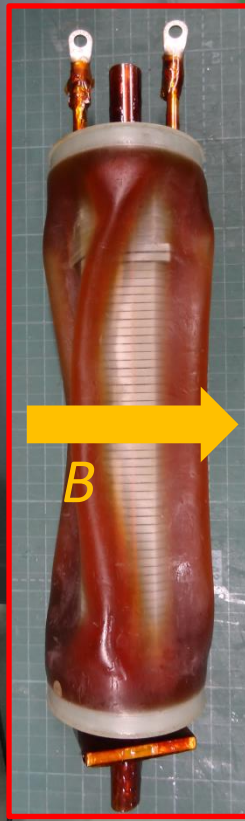
- 柏およびSPring-8の電源を借りて試作機の磁場テストを行った。本番(1<sup>st</sup> stage)で目標とする10T, 0.2m, 30Hzに向けての課題(特に**強度・発熱**)を洗い出すことを目的とする
  - 2/26 柏物性研(コンデンサバンク: 2.5 mF/10 mF, 10kV)
    - ✓磁場マップ作成
  - 3/6 SPring-8 BL19LXU(5 mF/10mF, 10kV)
    - ✓強度テスト(≡最大磁場)
    - ✓発熱テスト(≡繰り返し周波数)

# 磁場テストセットアップ



ピックアップコイル  
磁場 $B$ を測定

@ 柏物性研



1.1m

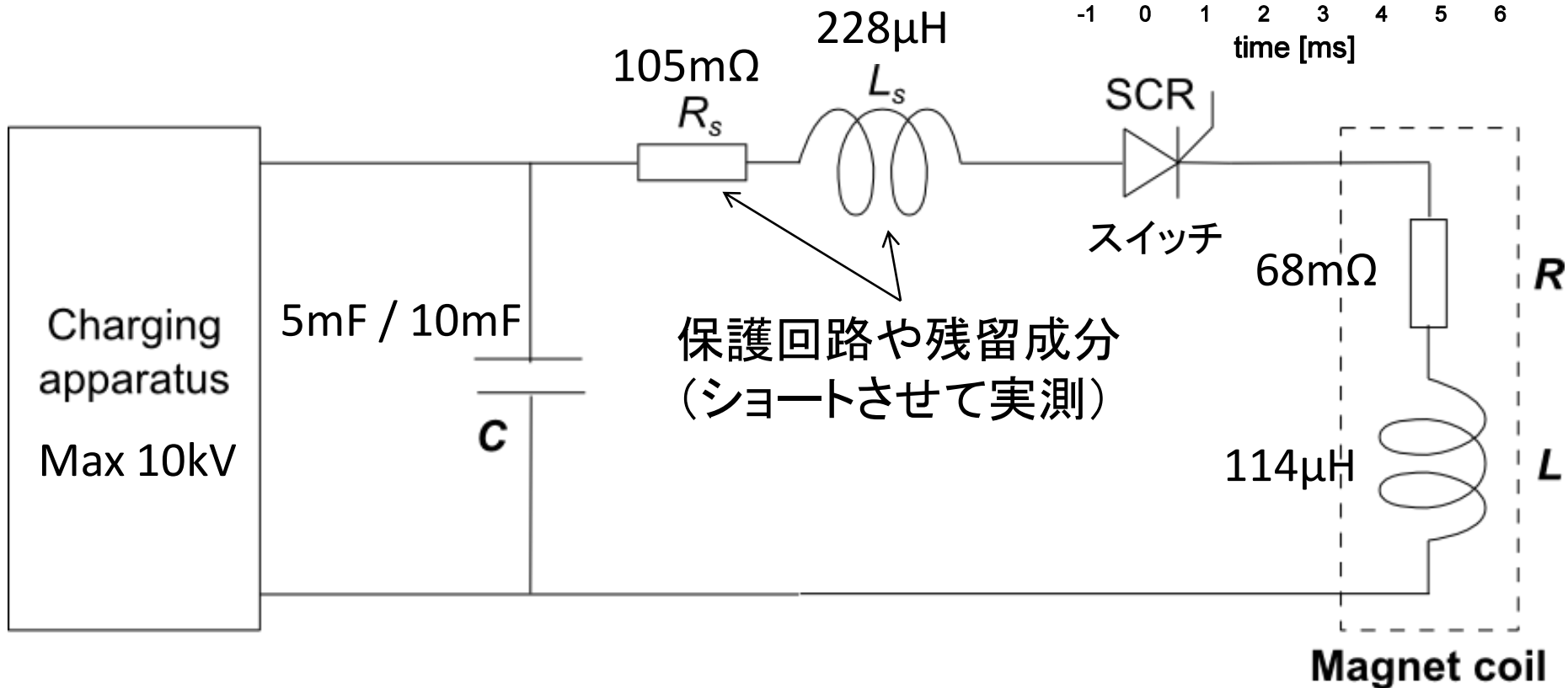
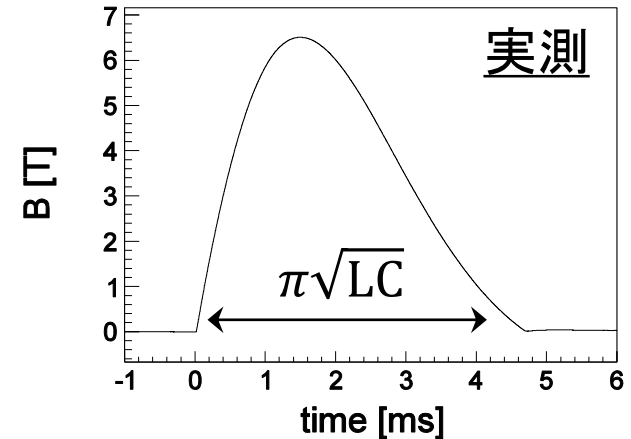
カレントトランス  
電流 $I$ を測定

電源のコンデンサバ  
ンクからの同軸

コイルは液体窒素にじゃぼ漬け  
今回の試験では縦置き

# コンデンサバンク

- C ~ 5 mF のコンデンサに数kV充電し、スイッチで放電させる単純なLCR回路



# コンデンサバンク

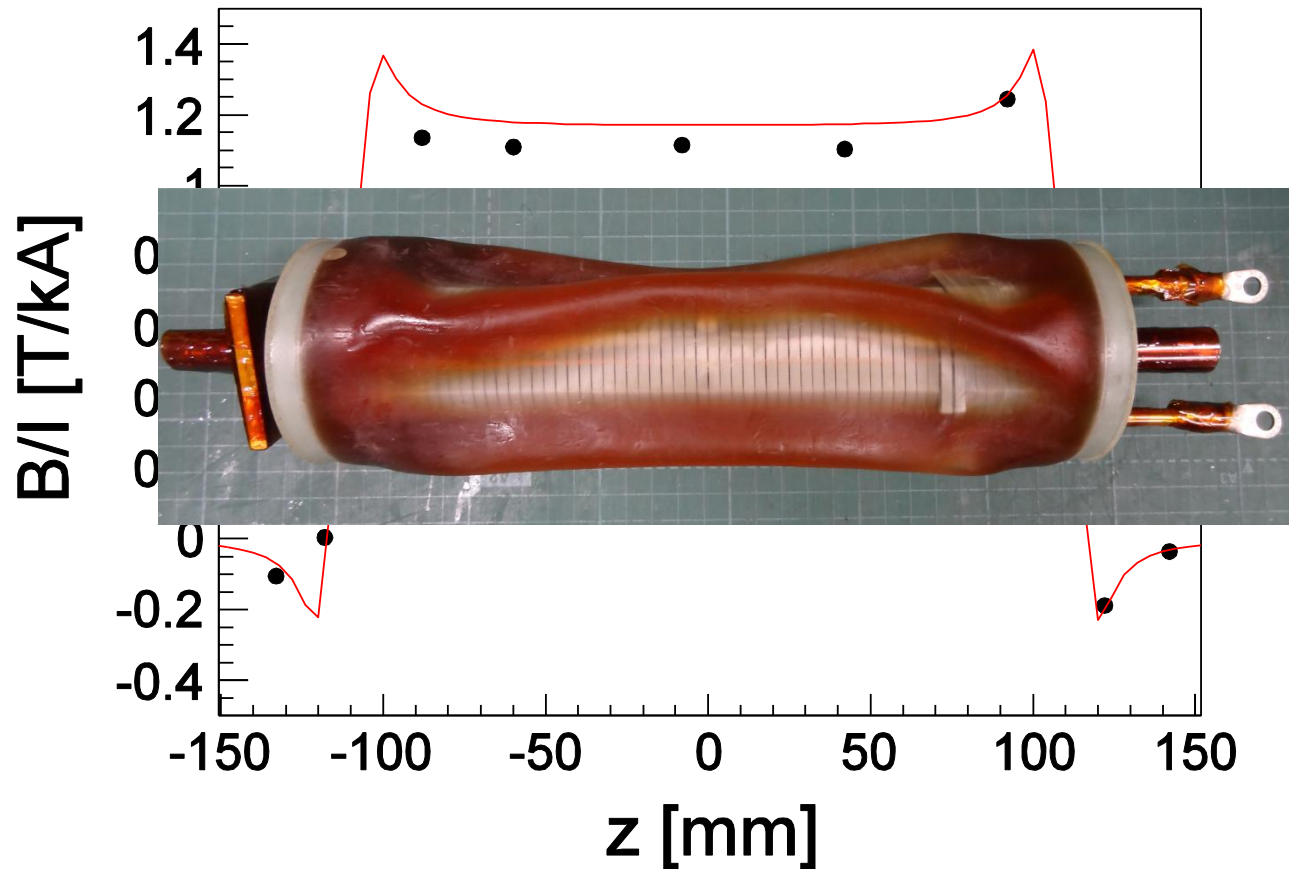
- 装置のサイズはほぼエネルギーで決まる。SPring-8の10mF, 10kV (= 500kJ)だと一部屋サイズ





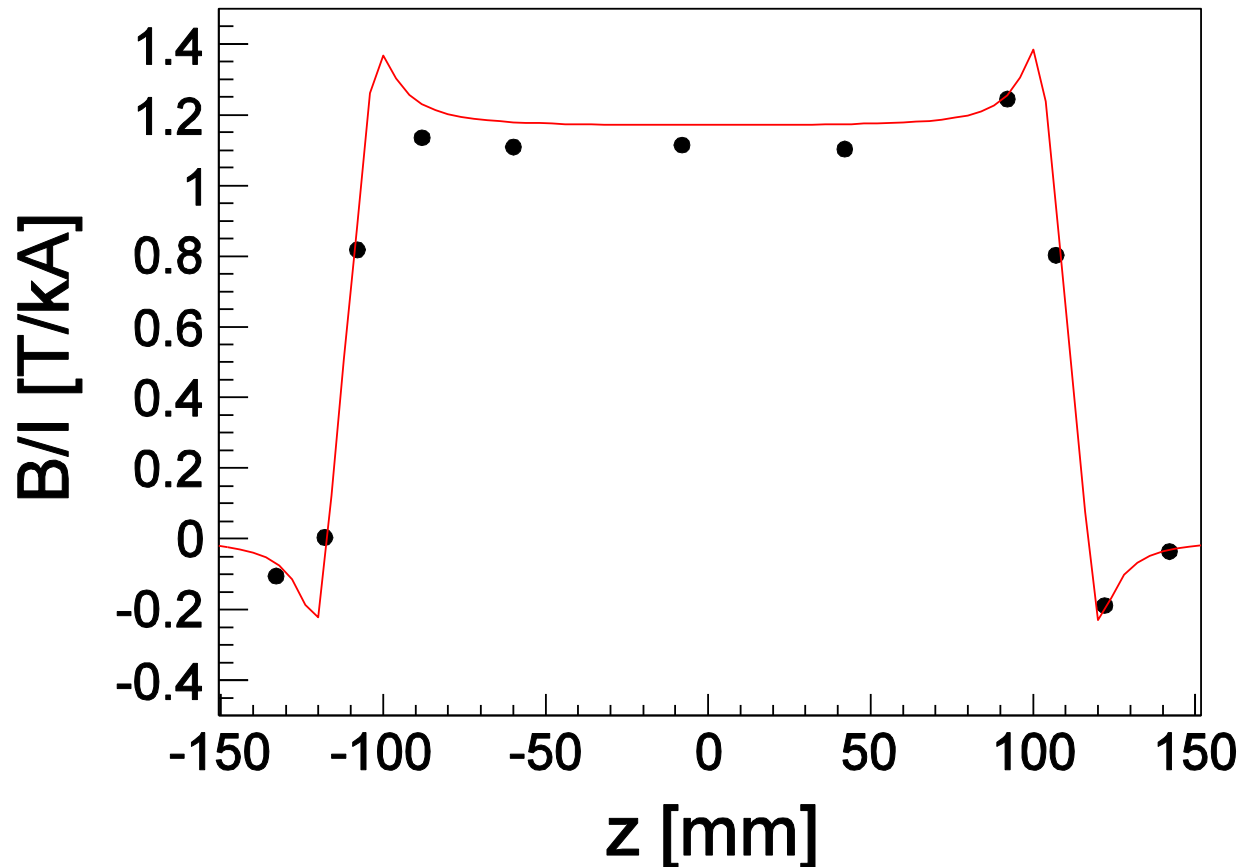
# 磁場マップ測定

- ピックアップコイルの位置をビーム軸方向に動かして磁場マップを測定



# 磁場マップ測定

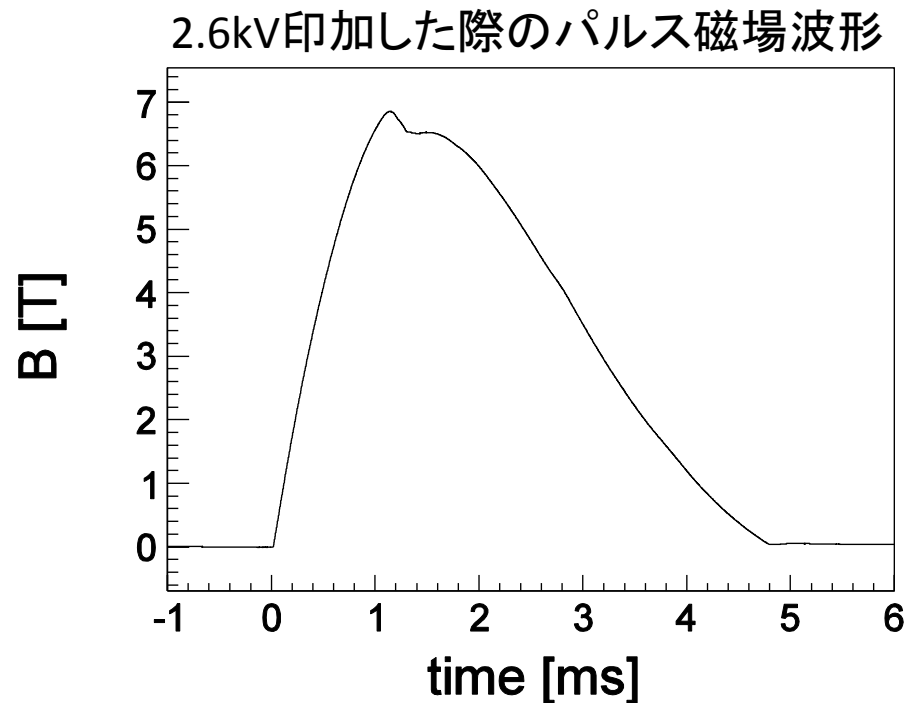
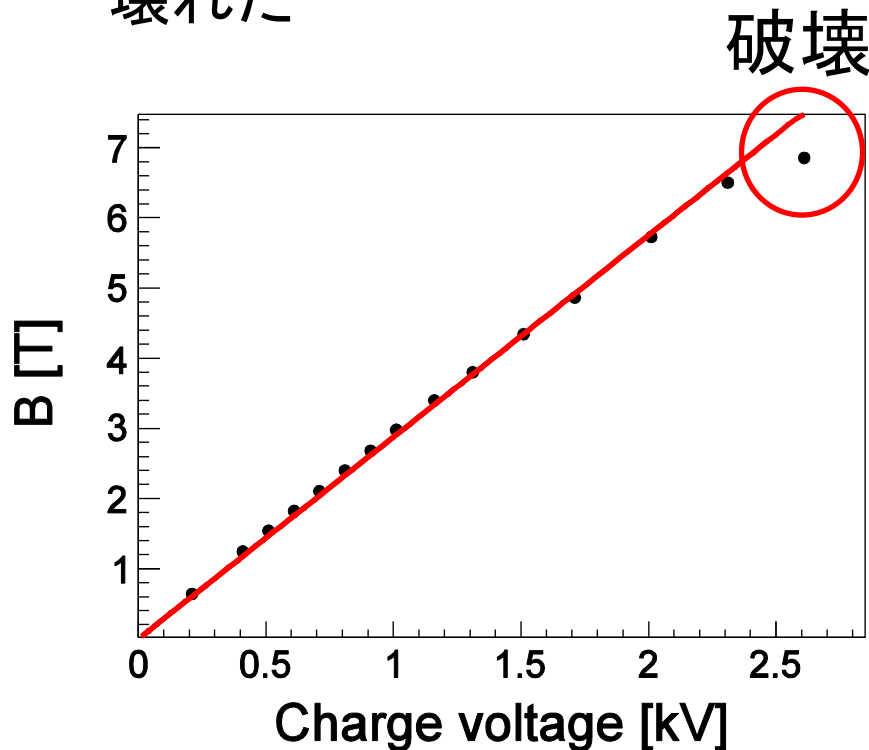
- ピックアップコイルの位置をビーム軸方向に動かして磁場マップを測定。縦軸は磁場を電流で割った値。赤線はコイル形状から計算したもので、ほぼ予想どおり





# 強度テスト

- 1<sup>st</sup> stageの探索実験は10Tが目標。発生可能な最大磁場はコイルの強度で決まる
- バンクの充電電圧を徐々に上げていき、試作機で何Tまで発生可能か調べた。2.6kV印加し磁場が6.9Tに達したところでコイルが壊れた



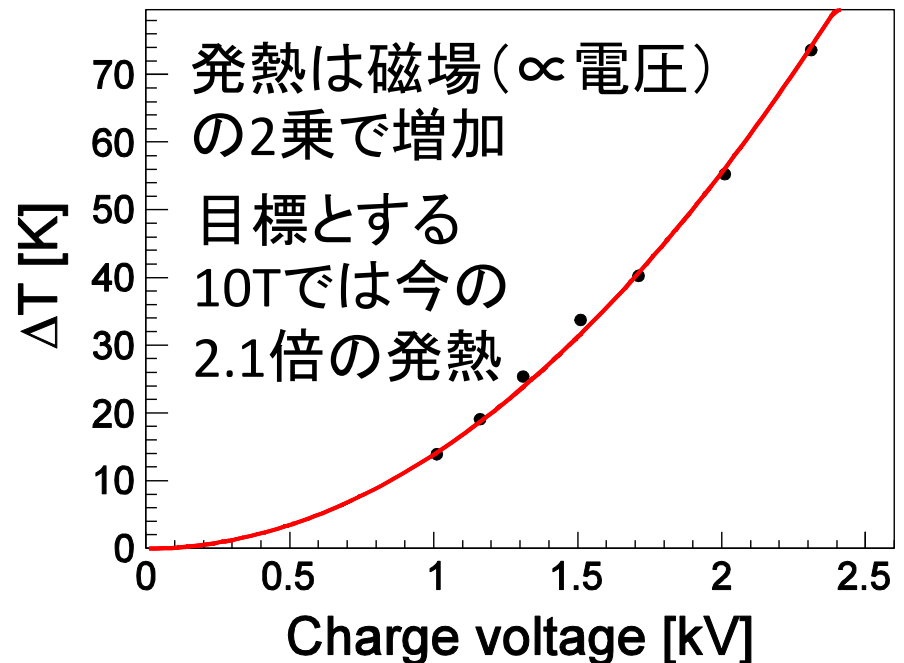
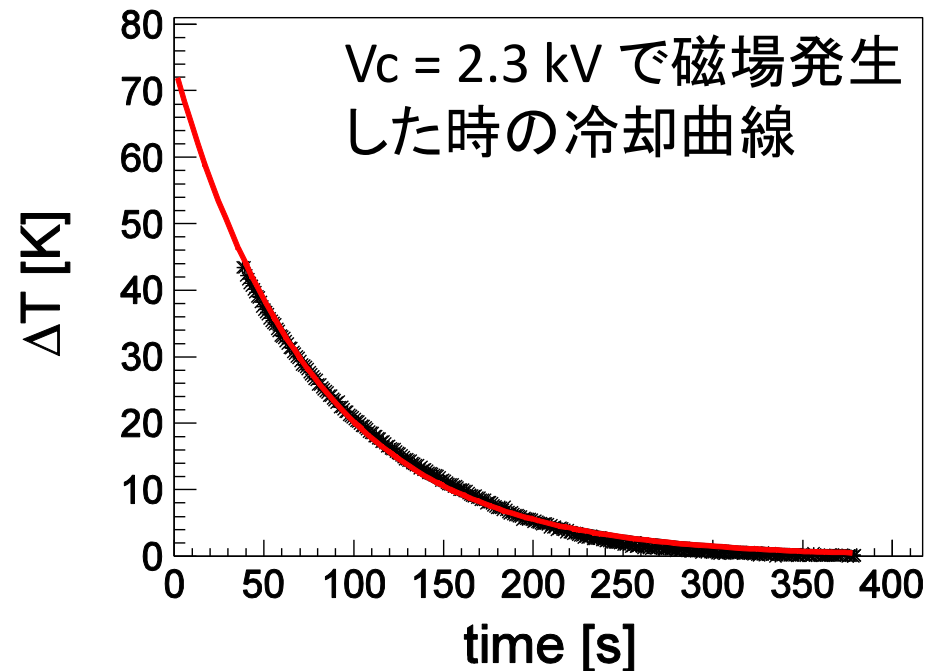
# 破壊の原因と対策



- 外側のエポキシが破壊されたが、ボビン部に不可逆な変形はない  
→エポキシを減らしステンレスで外部補強
- コイルをバラして線を確認したところ、変形や焦げなどはないが脆化していた  
→銅銀線1mmX1.5mmの代わりに一様でより太い銅線1mmX3mmを用いて脆化を防ぐ
- ビームパイプ付近のFRPに割れ  
→コイル間の距離を広げる

# 発熱テスト

- SACLA 30Hzに同期させる際、磁場発生時の発熱がパルス磁場の繰り返し周波数を制限する。これも試作機で実測した(磁場発生後にコイルの電極にLCRメータを接続し、抵抗を測る)
- 破壊直前の6.5T ( $V_c=2.3\text{kV}$ )において $\Delta T=74\text{K}$ で、銅銀線の熱容量のみから予想した値 $\Delta T=108\text{K}$ より小さいが、冷却の時定数は77secと遅い



# 発熱対策

## 1. 温度上昇を減らす

- ✓ 1mmX1.5mmの銅銀線 ( $0.75\mu\Omega\cdot\text{cm}@77\text{K}$ ) ではなく1mmX3.0mmの銅線 ( $0.25\mu\Omega\cdot\text{cm}@77\text{K}$ ) に変更することで、**コイル1個あたりの抵抗が68mΩから10mΩに減る**
  - ✓ 今回のテストではC=5mFで電流保護回路 ( $L_s=200\mu\text{H}$ ,  $R_s=90\text{m}\Omega$ ) の入った電源を使用しているが、本番ではC=1.2mFでエネルギーが小さく保護回路が不要な電源を使用する(後述)ため、**パルス幅が4.5msから0.6msに減る**
- 10T発生させても $\Delta T=3.5\text{K}$**

## 2. 冷却の時定数を短くする

- ✓ 銅線より外側のエポキシ ( $\sim 0.5\text{W/m/K}$ ) を限界まで減らし、ステンレス ( $17\text{W/m/K}$ ) などの金属で外部補強するように変更する

# 高速充電バンクの設計

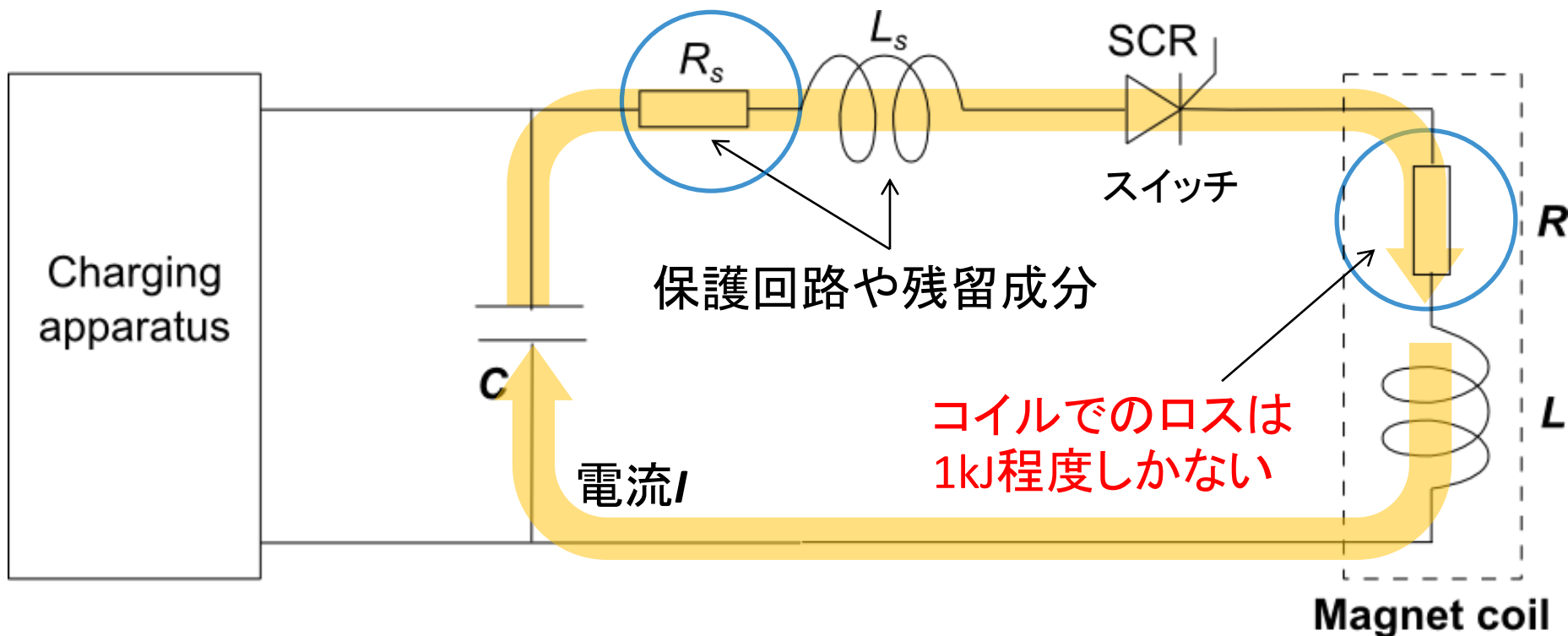
- 今回テストで用いたバンクと本番で必要なバンクでは用途・仕様が大きく異なるため、新たに20kJ程度で小型(ラック2台程度)かつ高速充電可能なコンデンサバンクを製作する

	今回借りたバンク	本番用に製作するバンク
用途	50T程度のソレノイド磁場を長パルス(~5ms)で1発で発生させる	10T程度のダイポール磁場を短パルス(~0.5ms)で繰り返し発生させる
エネルギー	500kJ	20kJ
装置サイズ	1部屋	ラック2台
繰り返し	数分に1発	30Hz

# 高速充電バンクの設計

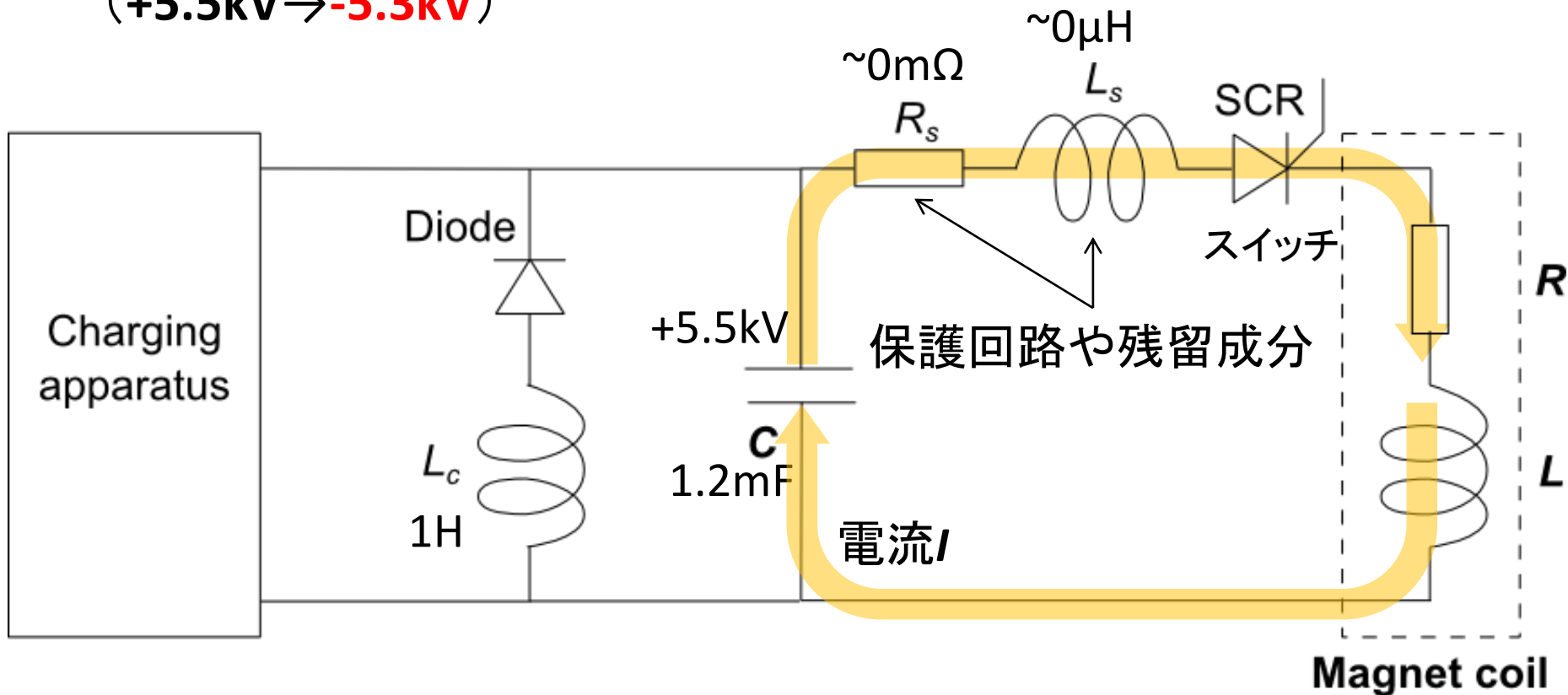
## POINT

20kJの全エネルギーを毎回充電すると時間がかかる。一回のパルスで消費されるのはコイルおよび残留抵抗でのロスのみ。ロスの少ない(コイルおよび)バンクを作り、全エネルギーでなく、ロスした分だけを充電することで繰り返しを上げる



# 高速充電バンク回路図 1/3

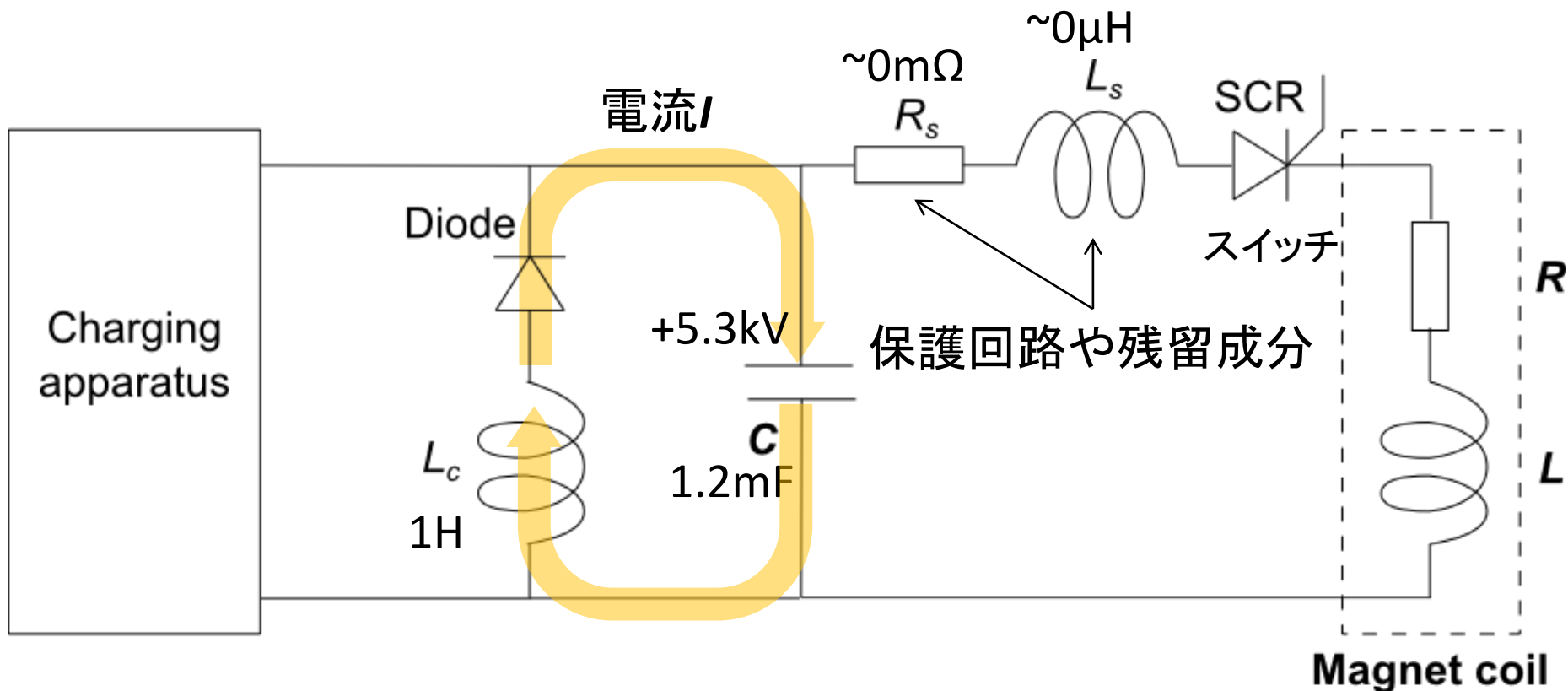
- $C=1.2\text{mF}$ ,  $V_c=5.5\text{kV}$ で $18\text{kJ}$ の小型バンク。残留成分をゼロに近づけエネルギーロスのコイルでのロス( $1\text{kJ}$ 程度)のみに減らす
- 放電シーケンスは同じ。放電後はコンデンサが逆充電される( $+5.5\text{kV}\rightarrow-5.3\text{kV}$ )





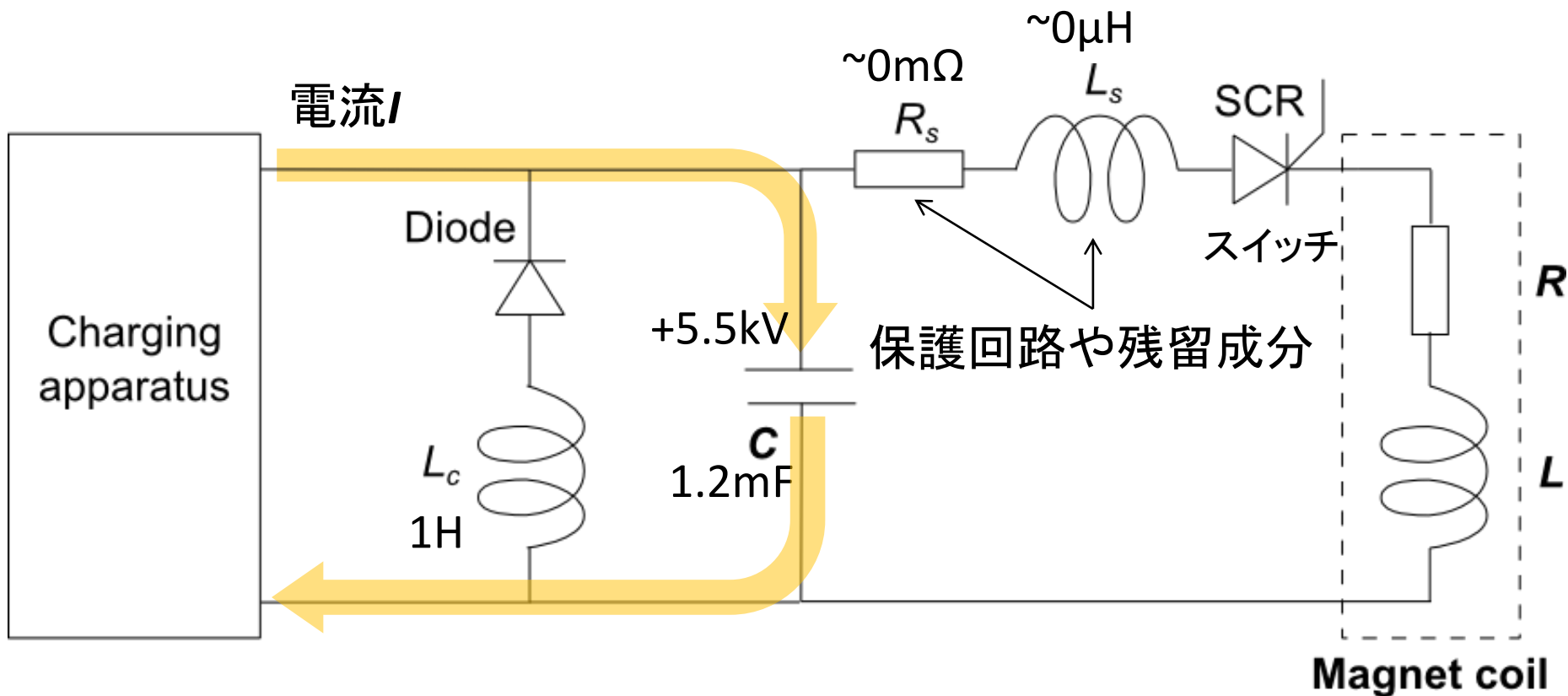
# 高速充電バンク回路図 2/3

- チョークコイルとダイオードを通して電流を流し、極性を元に戻す ( $-5.3\text{kV} \rightarrow +5.3\text{kV}$ )。蓄えられるエネルギーは放電時にコイル抵抗で $1\text{kJ}$ ロスしたので $17\text{kJ}$ に減っている



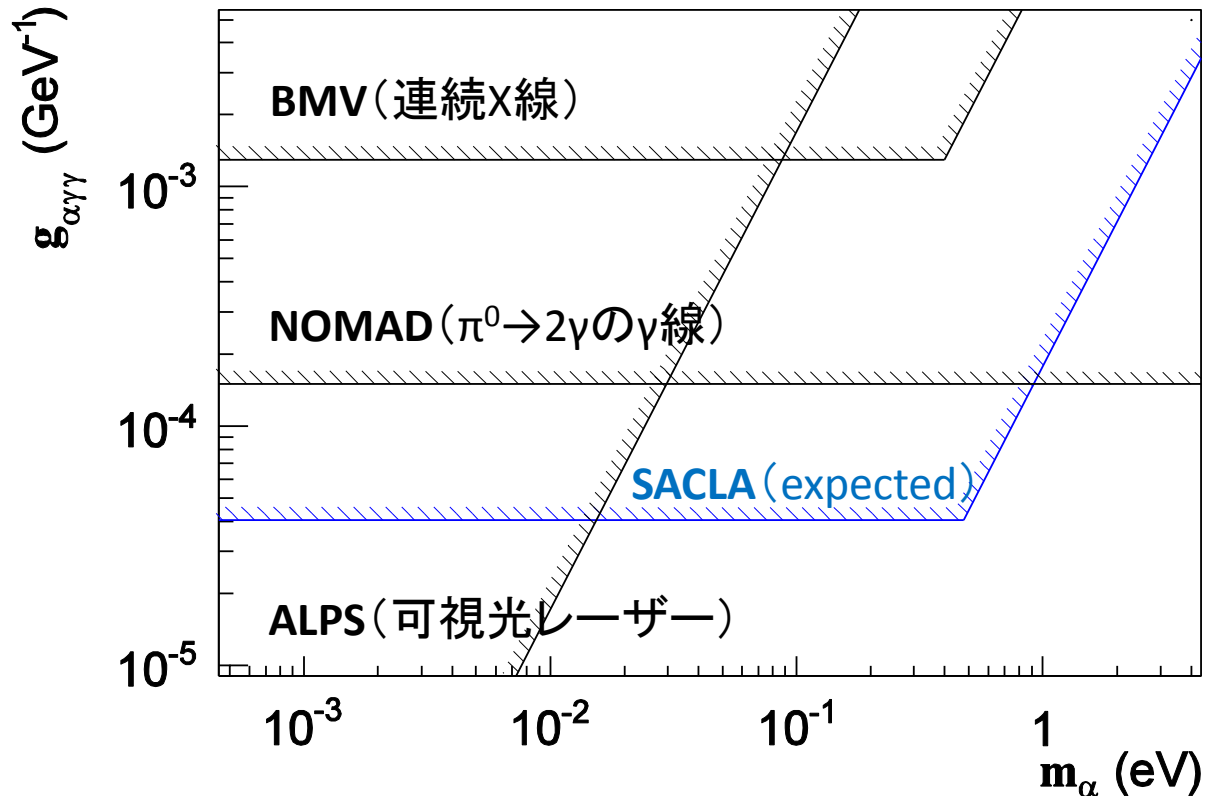
# 高速充電バンク回路図 3/3

- ロスしたぶんの1kJだけを充電する(+5.3kV→+5.5kV)
- 全エネルギー(18kJ)充電する場合0.2Hzが限界なのに対し、この方法では6Hzまで可能(※20kVAの充電装置を使用)



# 期待感度 (1<sup>st</sup> stage)

- 本番用磁石と高速充電バンクによるパルス磁場 (10T, 0.2m x 4, 6Hz) とSACLA (3x10<sup>11</sup> photons/pulse, 30Hz) を用いて 1日測定した場合



- 可視光実験より2桁重い質量領域を探索
- 発見できなかった場合、地上実験におけるリミットを4倍更新
- 2014年SACLA後期で1<sup>st</sup> stageの実験を目指している

# まとめ

- 10T x 0.2mのパルス磁場発生を目指し、試作機を製作・テストし本番用磁石への課題を洗い出した。試作機での到達磁場は6.9Tで、発熱も $\Delta T=74K@6.5T$ と大きいのが、本番用磁石では線材・構造を変更することで、強度を増し発熱を大幅に減らす
- SACLAのパルスは30Hzであり、これと同期した速い繰り返しでパルス磁場を発生させる必要がある。そこで、**20kJ程度の小型（ラック2台程度）で高速充電可能な電源**を自作する。磁場コイルの抵抗でロスしたエネルギーのみを充電することで6Hzで磁場発生可能な回路をデザインした
- **2014年SACLA後期で1<sup>st</sup> stageの実験**を目指している。**10T, 0.2m x 4, 6Hz**のパルス磁場が発生できれば、可視光レーザー実験より2桁重い質量領域において、地上実験としては最高感度（光子との結合定数に対して4倍）の探索が可能である