

パルス磁石を用いた真空複屈折の探索 I

はんしん

樊星, 上岡修星, 稲田聡明^A, 山崎高幸^A, 難波俊雄^A, 浅井祥仁,
大間知潤子, 吉岡孝高^B, 五神真
松尾晶^C, 金道浩一^C, 野尻浩之^D

東大理, 東大素セ^A, 東大工^B, 東大物性研^C, 東北大金研^D



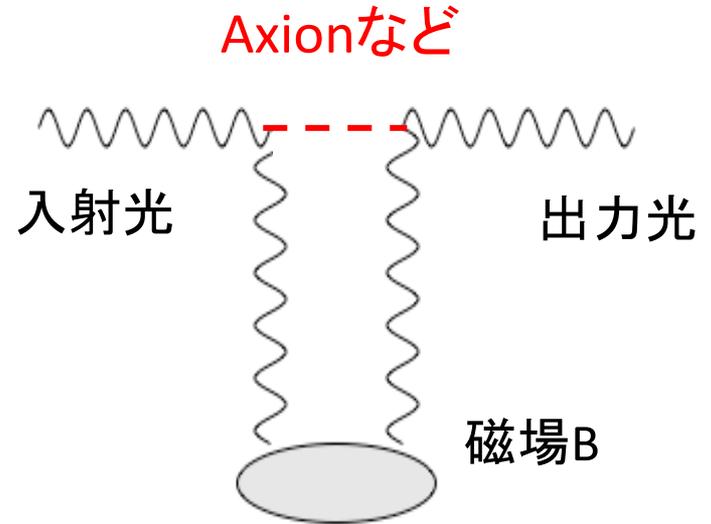
連続講演での内容

- 本トーク
 - 真空複屈折と探索セットアップ
 - 感度向上のための装置開発
 - 組み上げた装置設計
- 次のトーク
 - 9月に行ったテスト実験・解析
 - 今後のアップグレード

「真空」に潜

また、Axionのような
未知粒子からの寄与も大きい

- 場の量子論では、真空を飛ぶ光は仮想電子対などに絶えず対生成・対消滅している
- そこに磁場を印加すると仮想電子対を通じて真空が分極し、光は**磁場に並行・垂直な屈折率に差 $\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}$ を感じる。**この現象を真空複屈折という。



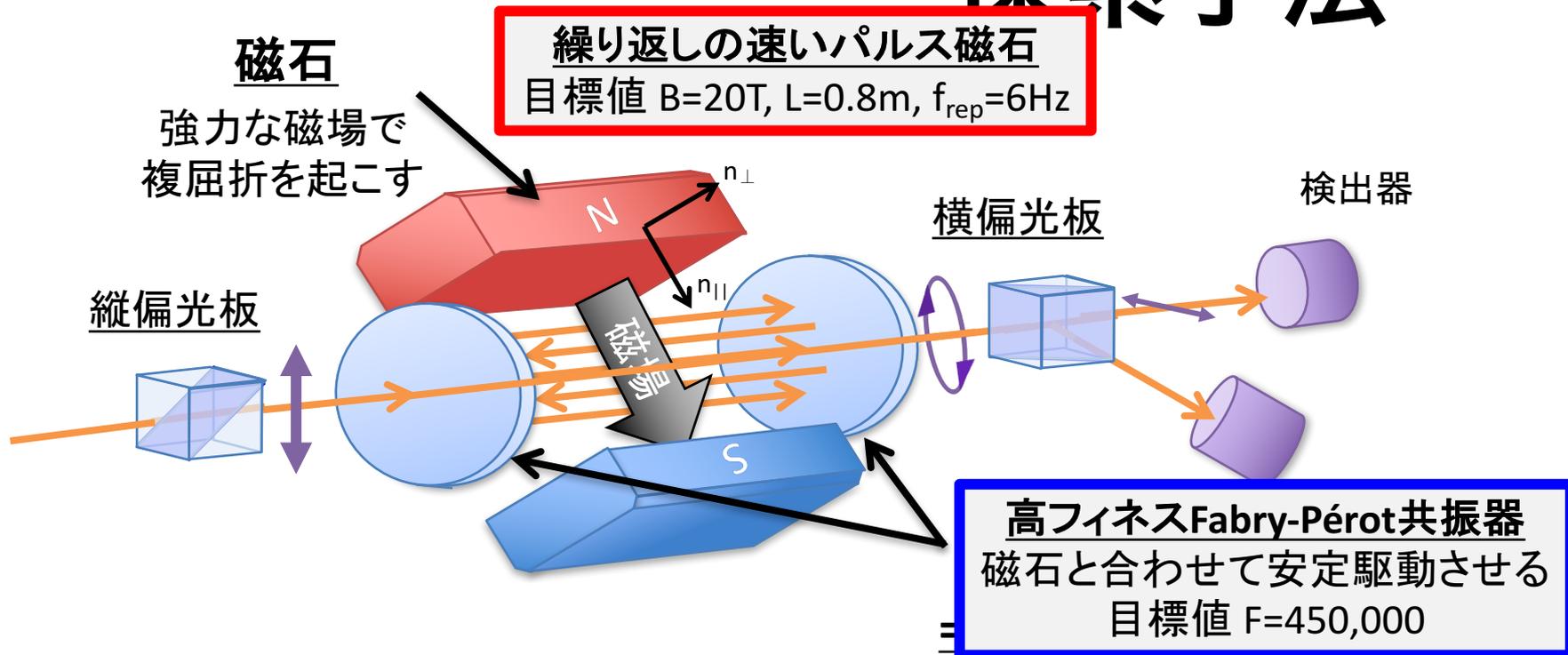
$$= k_{CM} B^2$$

(QED理論値 $k_{CM} = 4.0 \times 10^{-24} [T^{-2}]$)

- 世界中で様々なグループが観測を試み、QED理論値まであとfactor 20と迫るが、**未だ観測されていない。**

われわれもこの競争に参戦する

探索手法

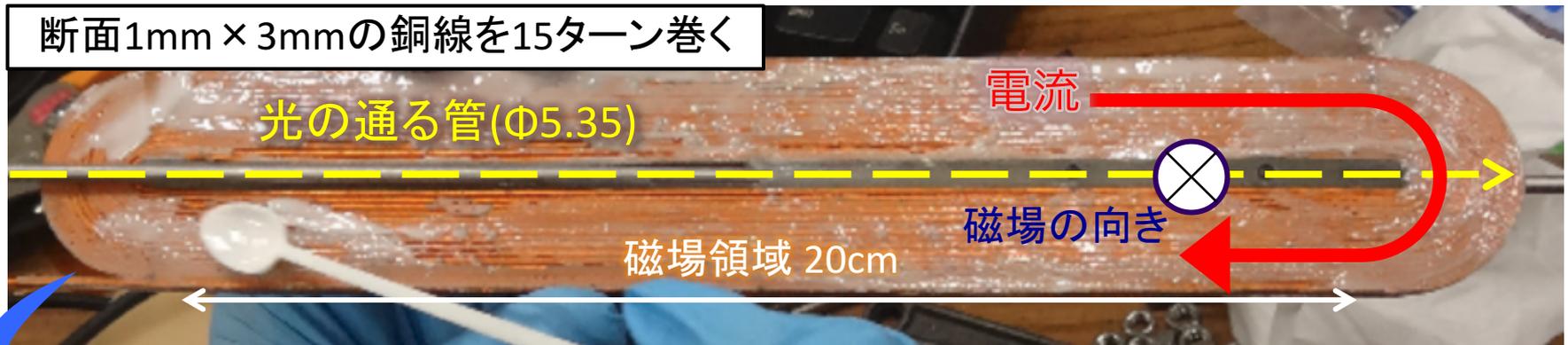


- 複屈折は光の偏光を回す。偏光板二枚使うのを抑える。
- 感度 10時間のRunでQED理論値に到達！
- Fabry-Pérot共振器 世界初の真空複屈折の観測
- 感度 100倍稼げる (F:フィネス=光の反射回数 $\times \pi/2$)
- また、パルス磁石の速い駆動を達成することで統計量を稼ぐ

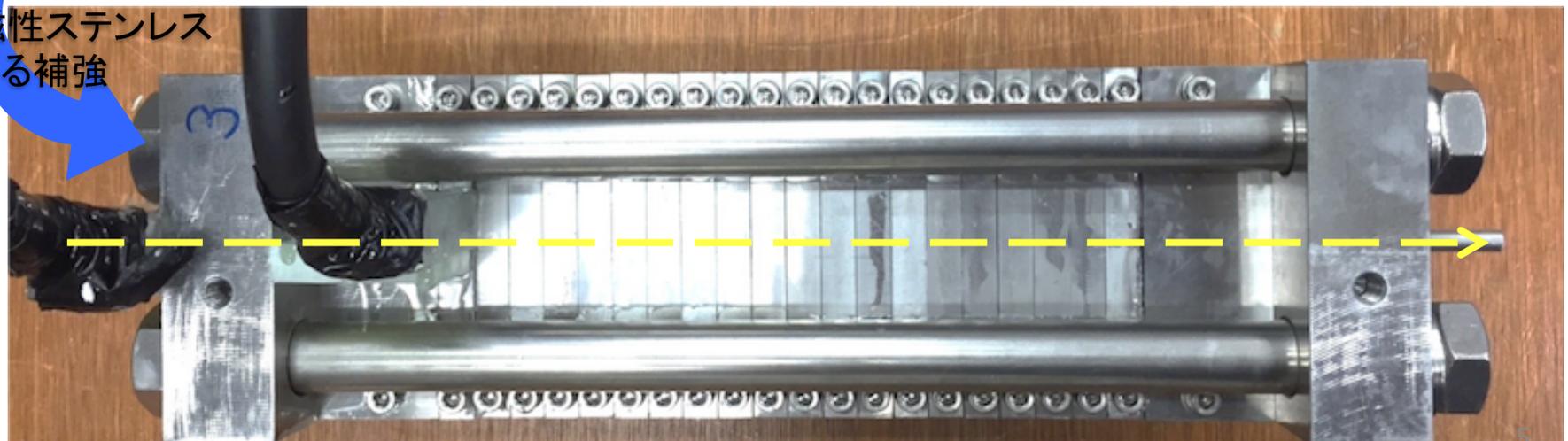
パルス磁石

- 軸方向に長く垂直に磁場を印加できる高繰り返しパルス磁石を開発
- 液体窒素冷却しコイル抵抗を $49\text{m}\Omega$ (@300K) \rightarrow $6.8\text{m}\Omega$ (@77K) に減らす
- 10Tで40MPaの電磁応力が発生するため、ステンレスにより外部補強

断面1mm \times 3mmの銅線を15ターン巻く



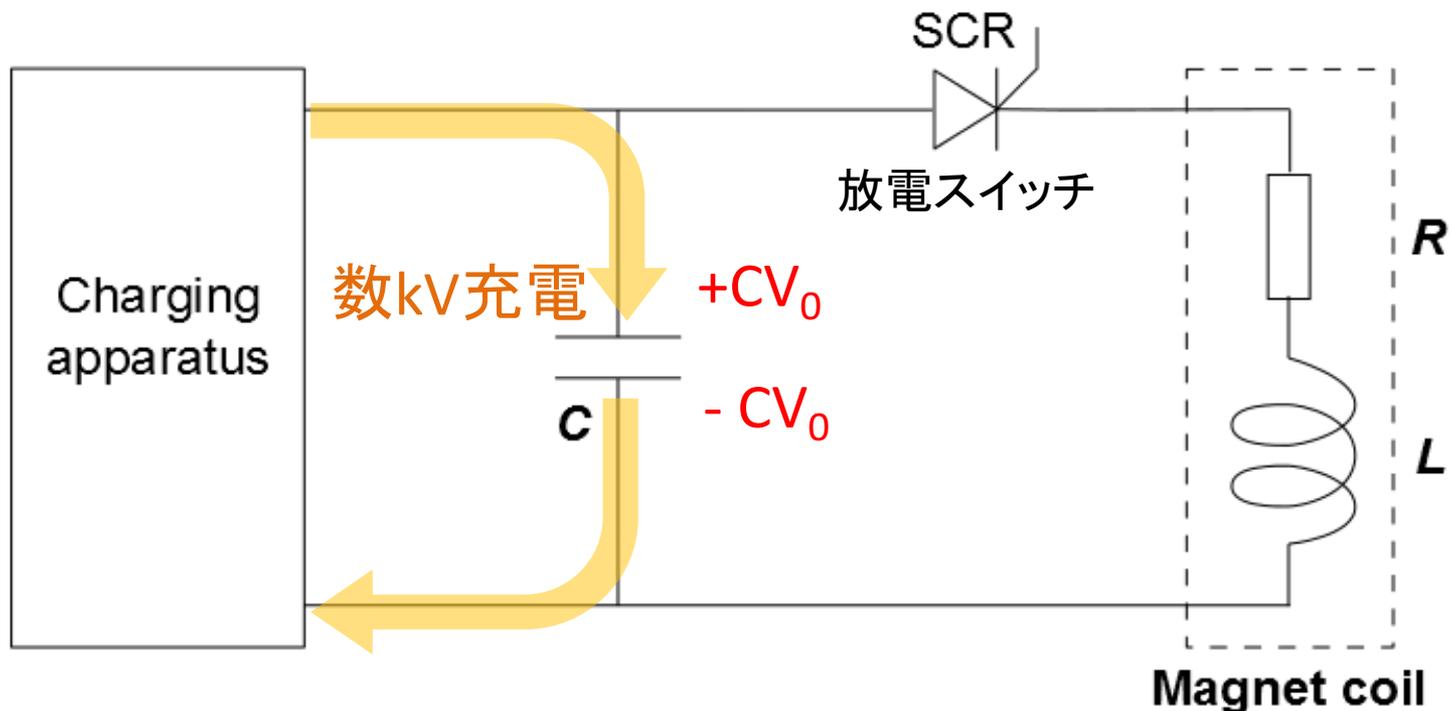
非磁性ステンレス
による補強



液体窒素で冷却して駆動

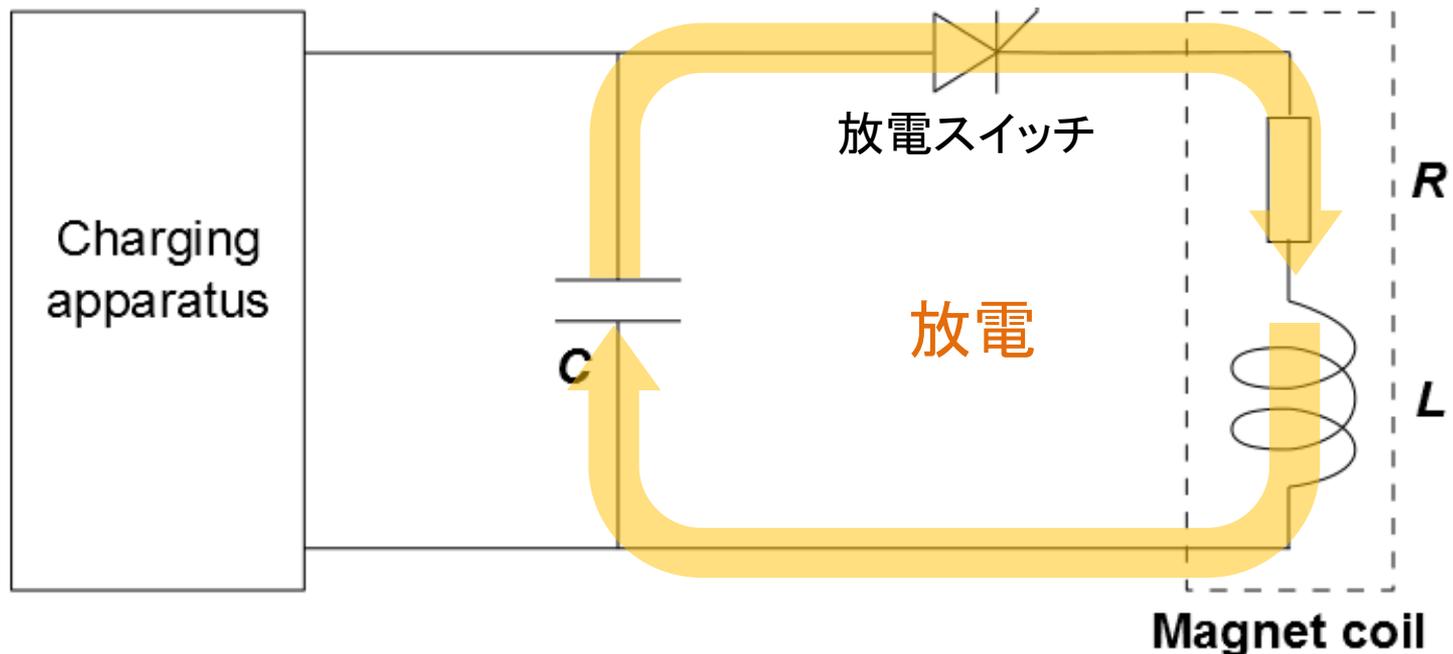
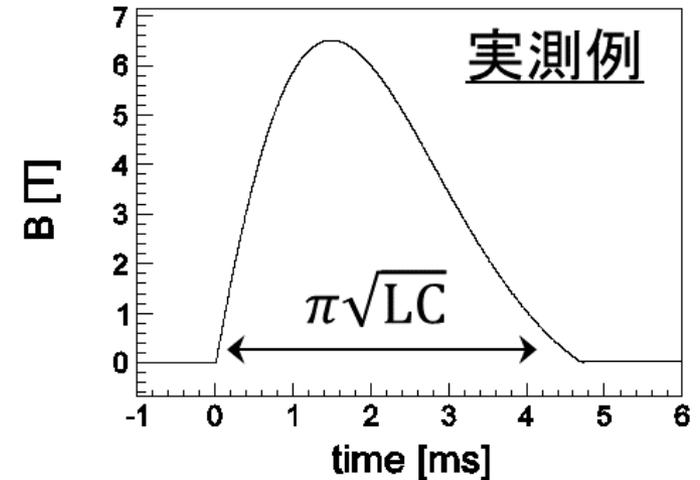
コンデンサバンク

- パルス磁石に大電流を流すコンデンサバンクを制作。
 $C = 3 \text{ mF}$ のコンデンサに数kV充電



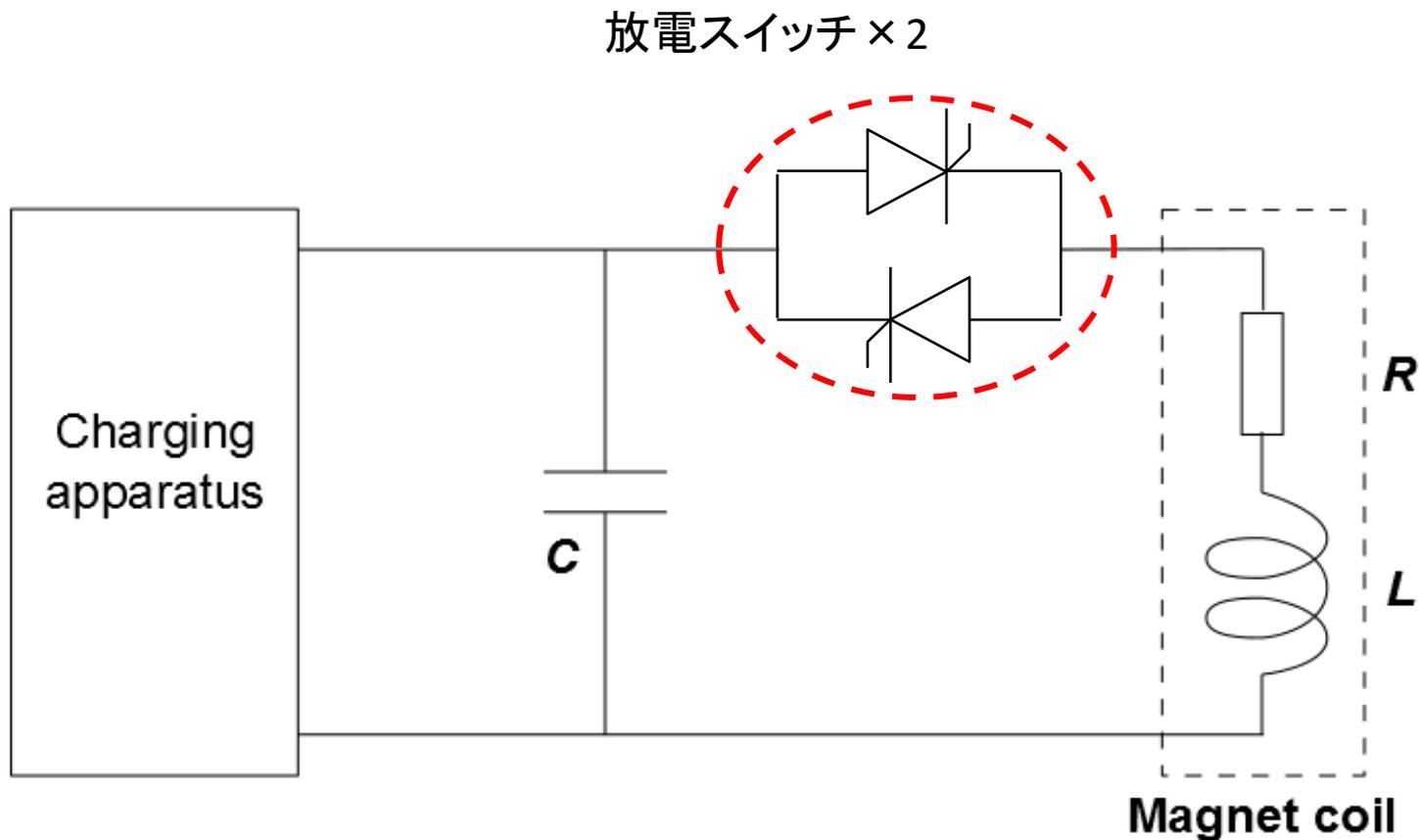
コンデンサバンク

- スイッチを放電させるとパルス電流がコイルに流れる。
単純なLCR回路



高速繰り返しコンデンサバンク

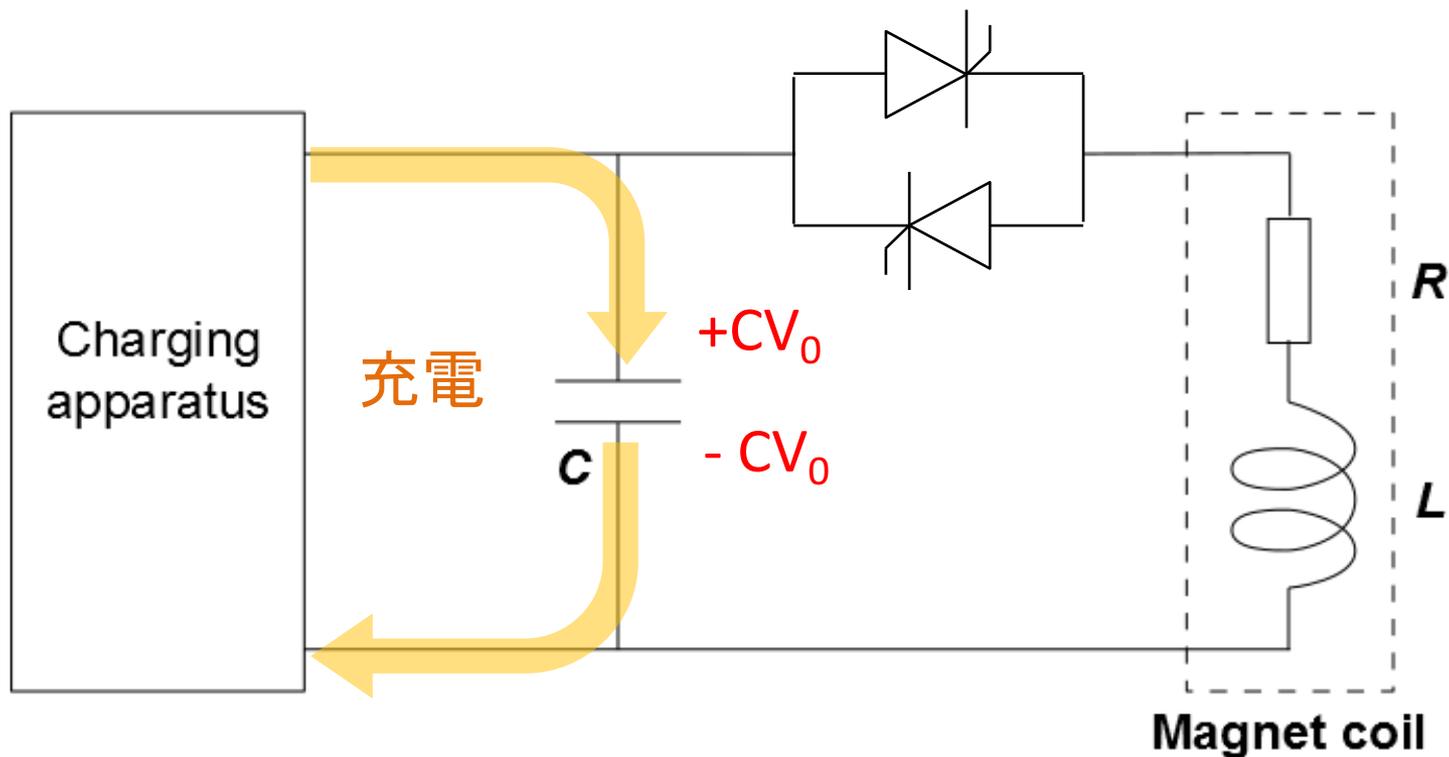
- われわれは放電スイッチを逆並列に2つ接続



高速繰り返しコンデンサバンク

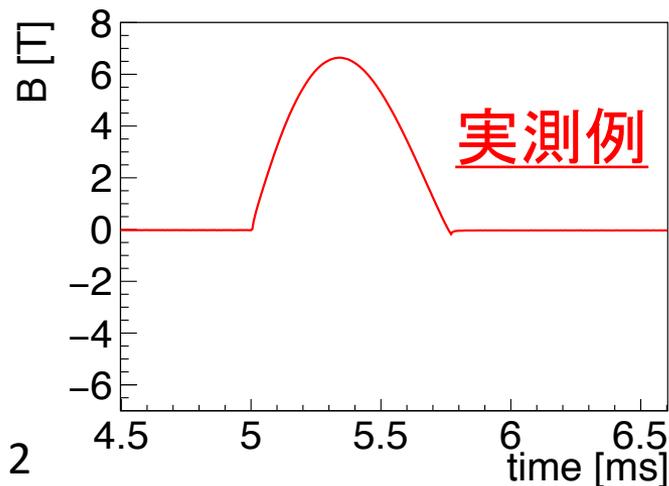
- 最初、普通に電圧 V_0 まで充電

放電スイッチ×2

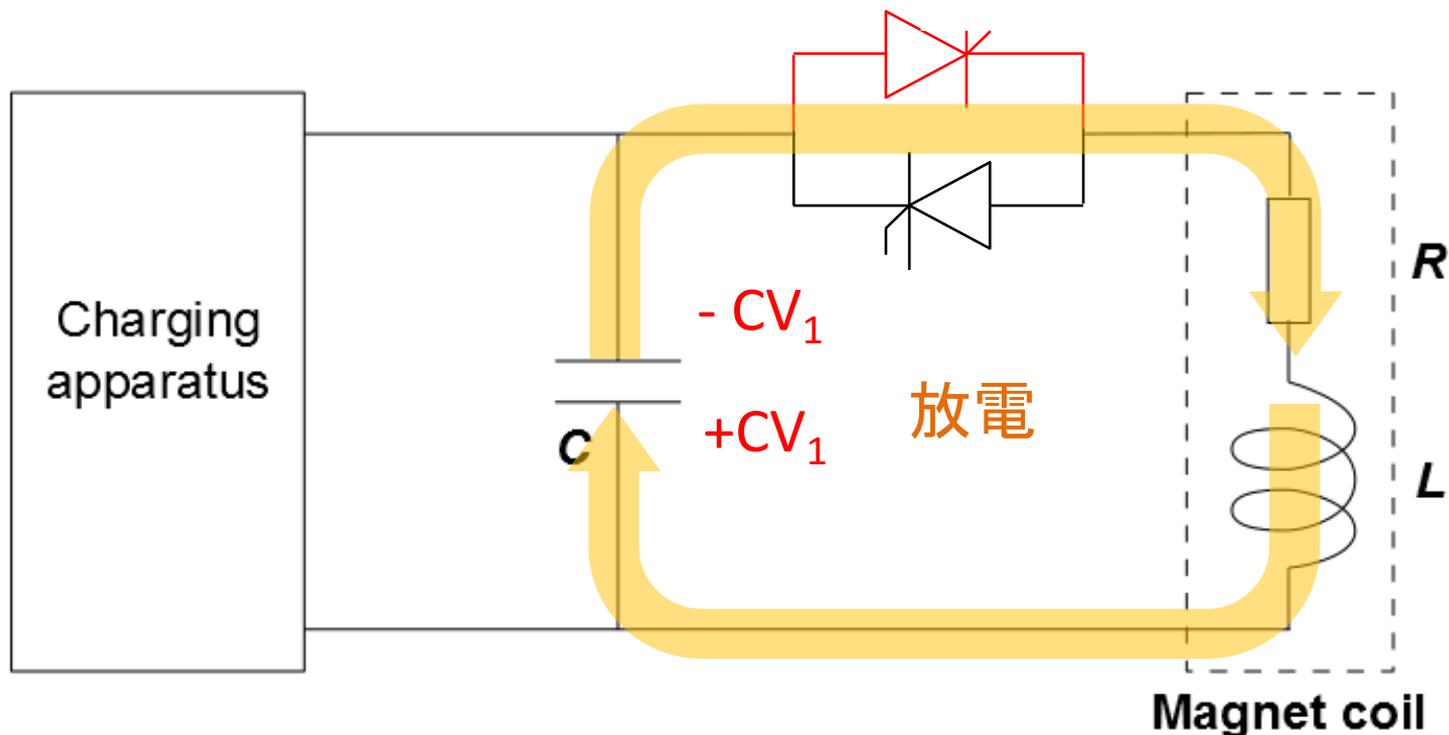


高速繰り返しコンデンサバンク

- 上側の放電スイッチのみONにすることでパルスが1発発生
- コンデンサは V_1 の電圧で逆充電される

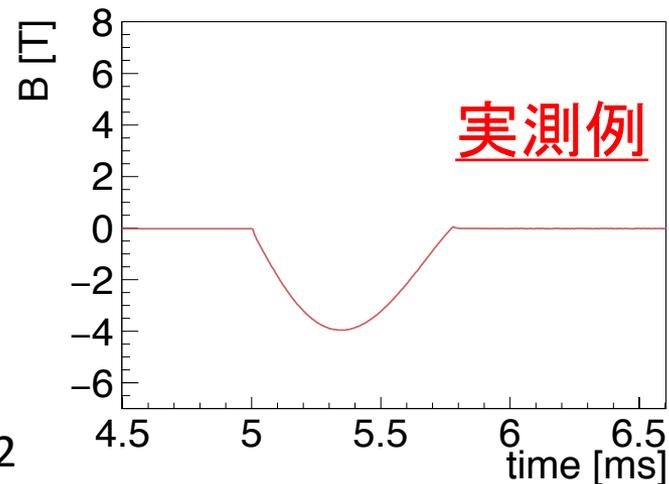


放電スイッチ×2

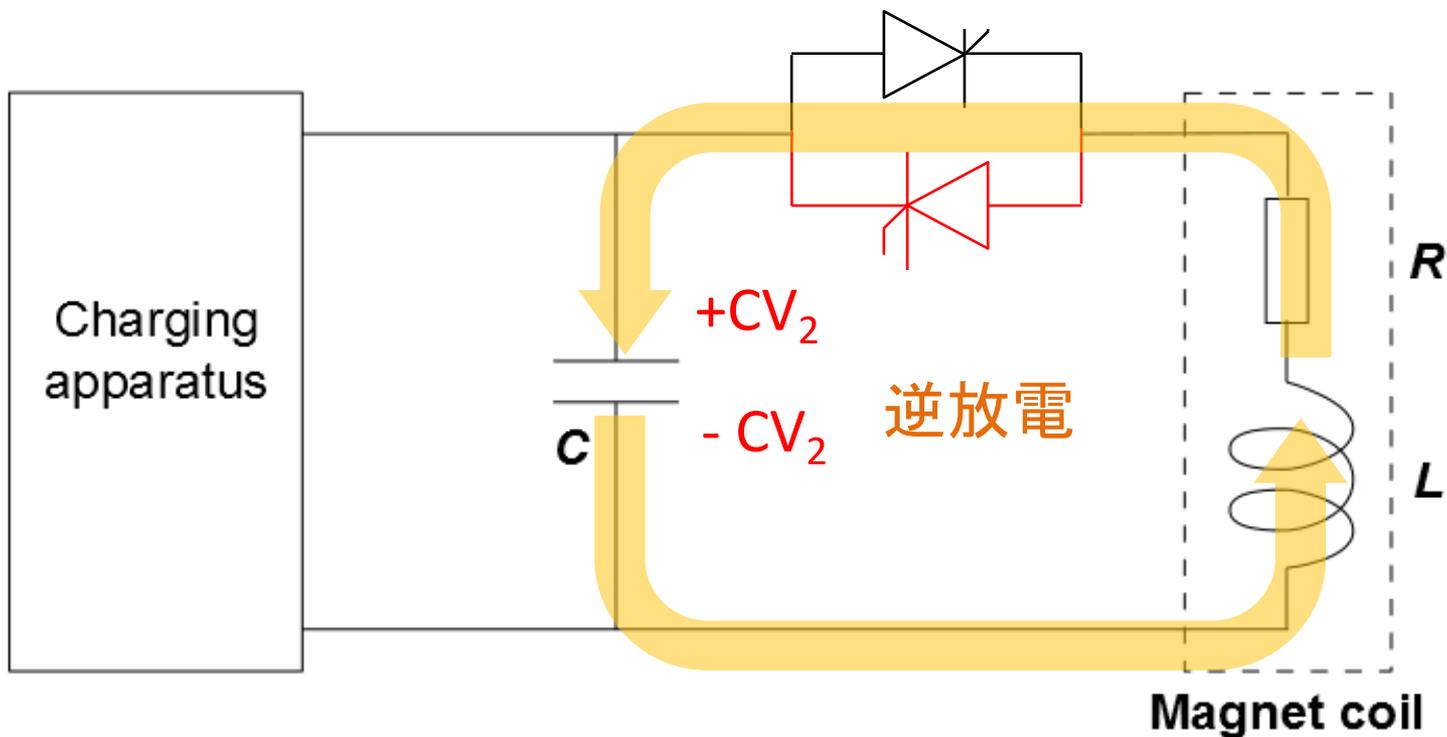


高速繰り返しコンデンサバンク

- 今度は下側の放電スイッチのみONにすることで逆向き磁場のパルスが1発発生
- コンデンサは V_2 の電圧で充電される

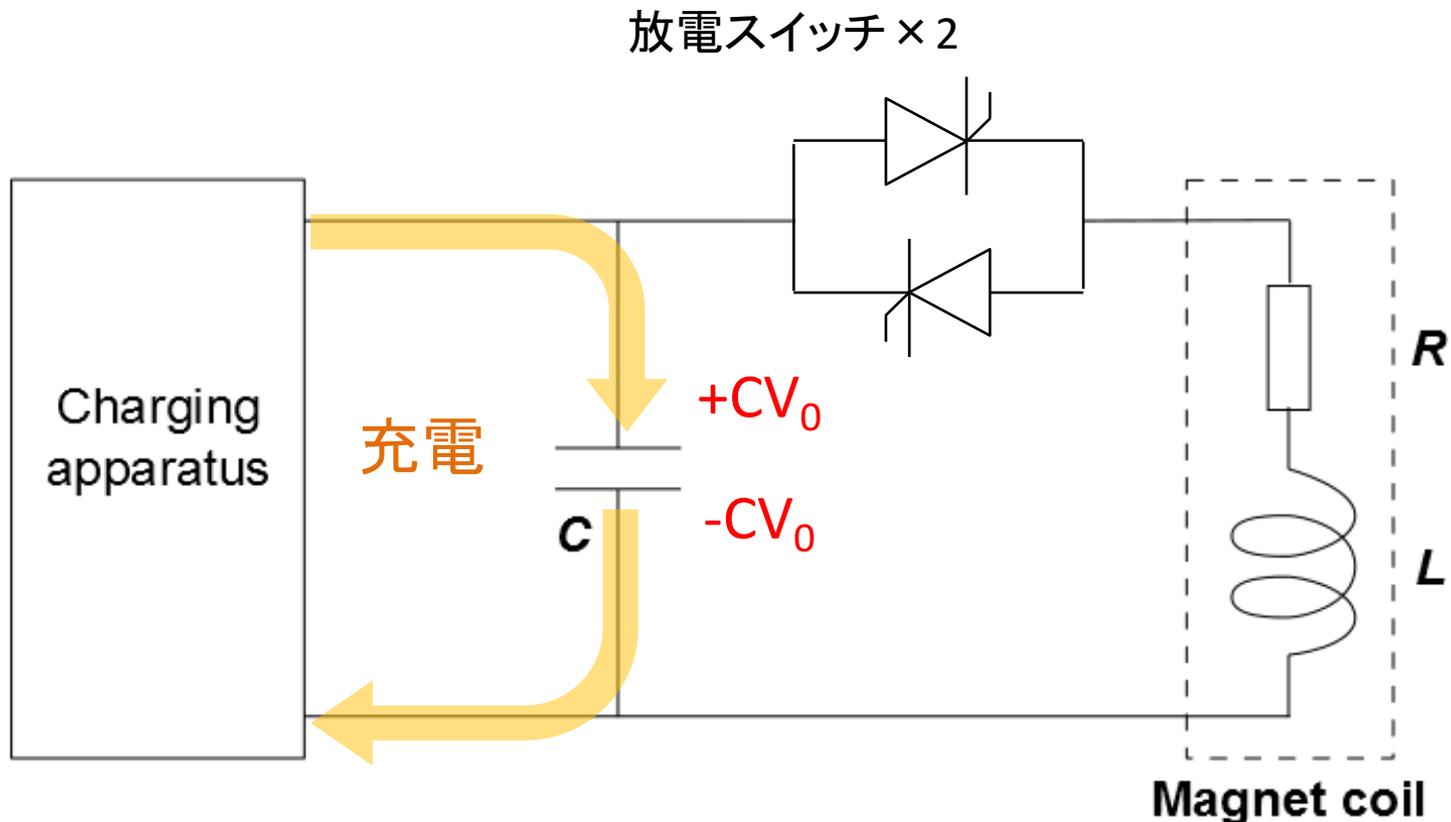


放電スイッチ×2



高速繰り返しコンデンサバンク

- その後、磁石での発熱で失われた分を再充電。これの繰り返し。
- これにより充電にかかる時間を大幅に短縮 & 順・逆磁場の両方のデータを取り系統誤差を減らす。

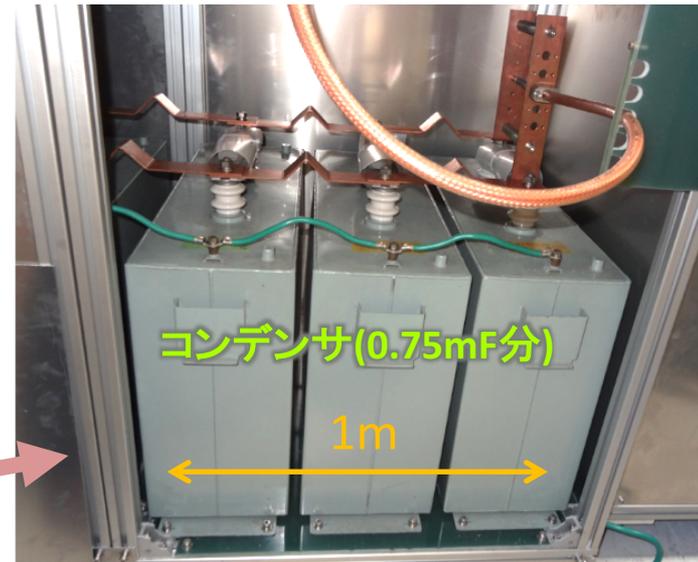
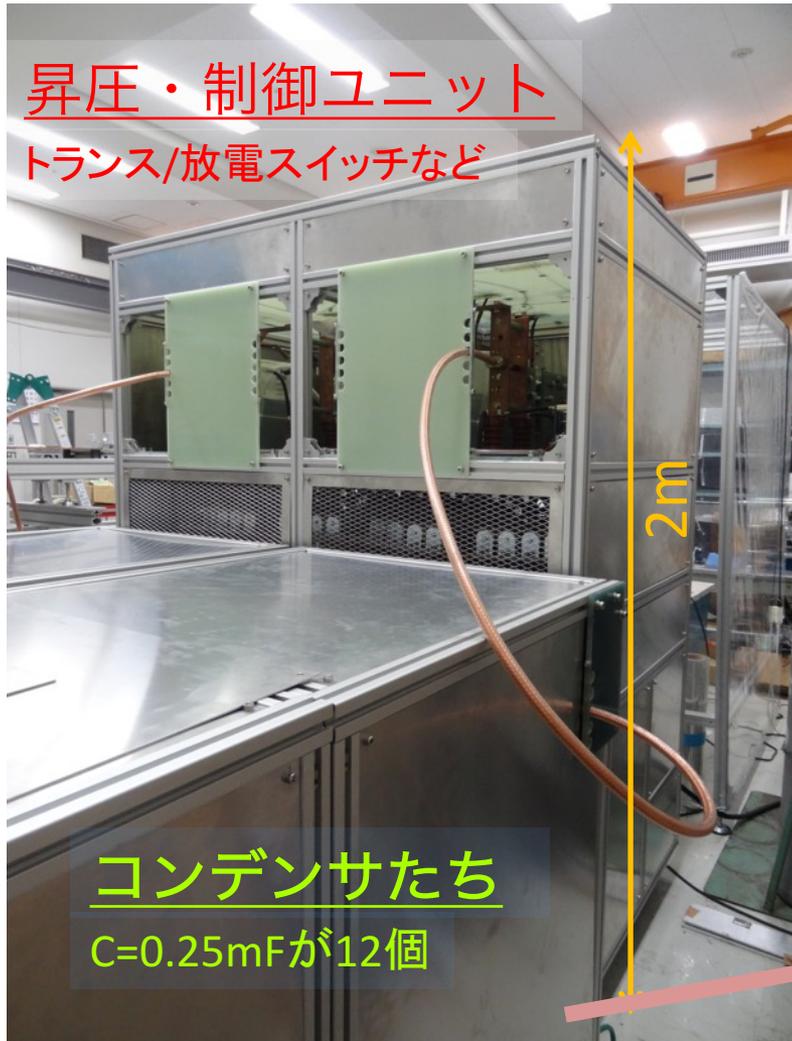


実際の写真

☆性能

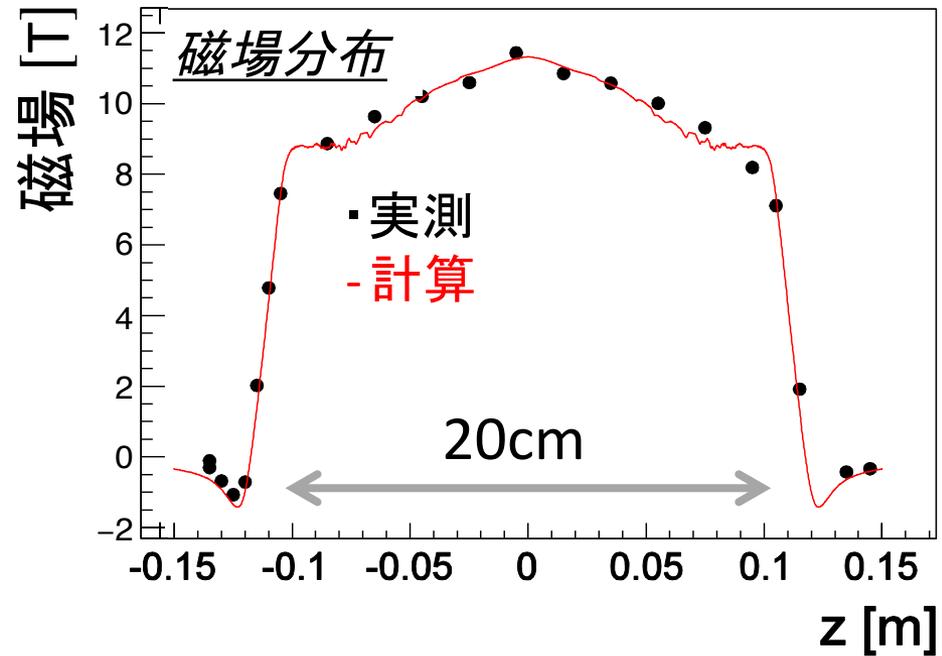
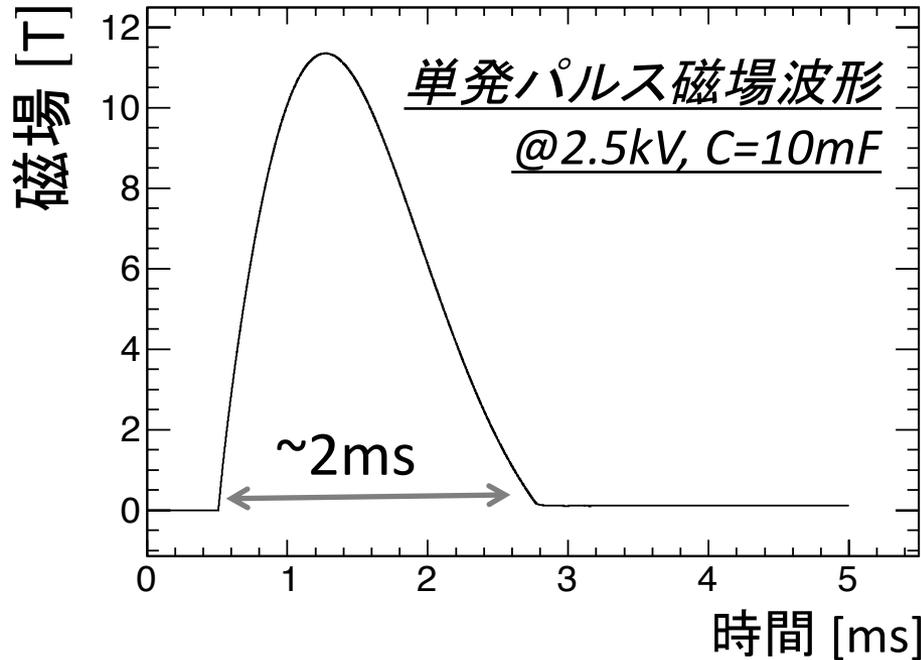
$C=3\text{mF}$, $V=4.5\text{kV}$ のコンデンサバンク

- 最大55kAの電流を制御可能
- 高速繰り返しを達成するため、充電容量は15kVA
- 可搬となっており、将来的には大型実験室に移動可能



(c.f. NIM A 833(2016)122-126)

パルス磁場の実測

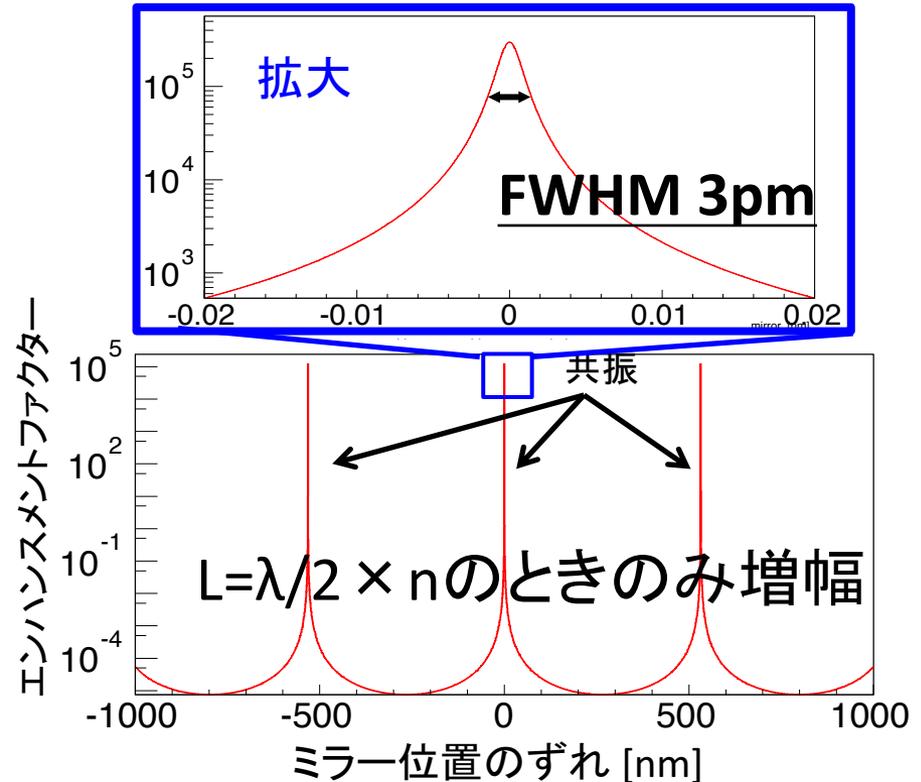
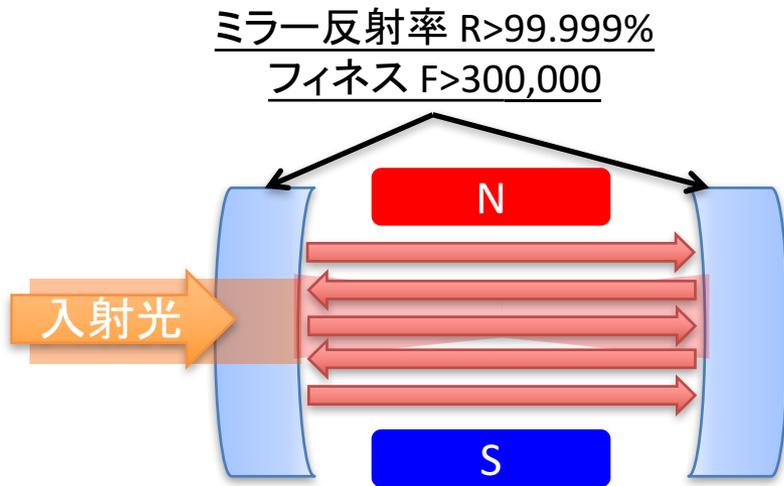


- 現状単発で11.4Tまで発生可能
- 光軸方向20cmに渡り広く磁場を発生。本実験では $\int B^2 dl$ で効く
- 繰り返し運転も行い、7T, 0.2Hz, 磁石4つで27,000発以上駆動
- 従来のパルス磁石のおよそ100倍の繰り返しレート

Fabry-Pérot共振器

- 二枚ミラーで光を反射させ、磁石の相互作用長をエンハンス
- **しかしミラー間距離が波長と共振条件を満たさないとちゃんとエンハンスされない**

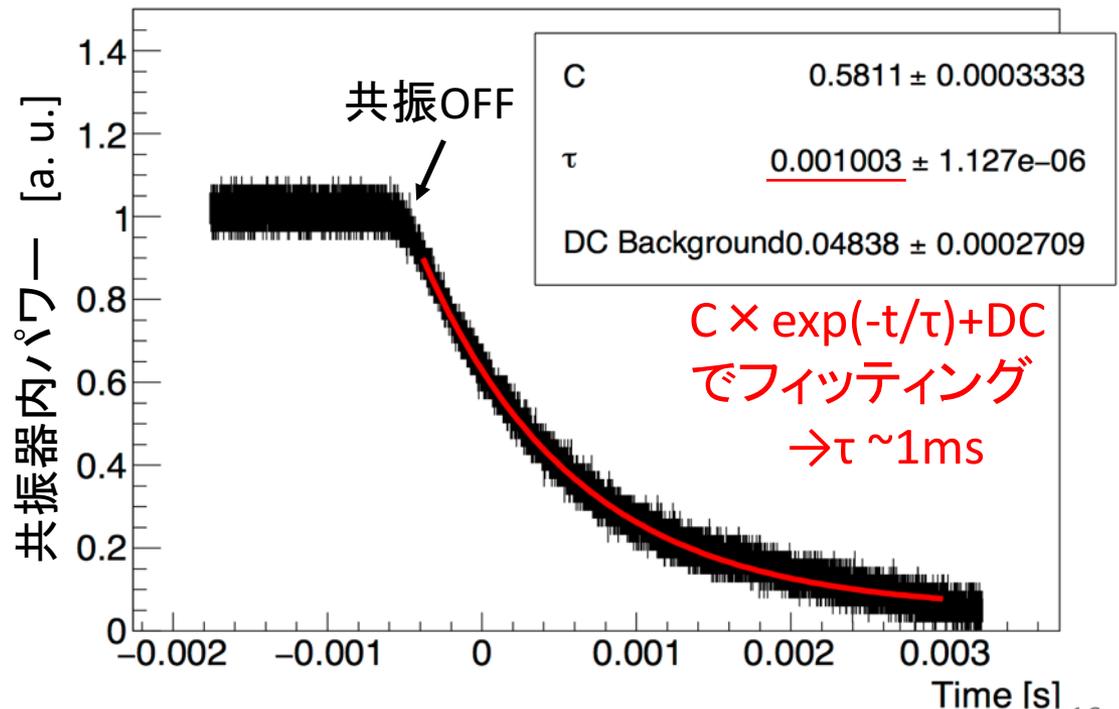
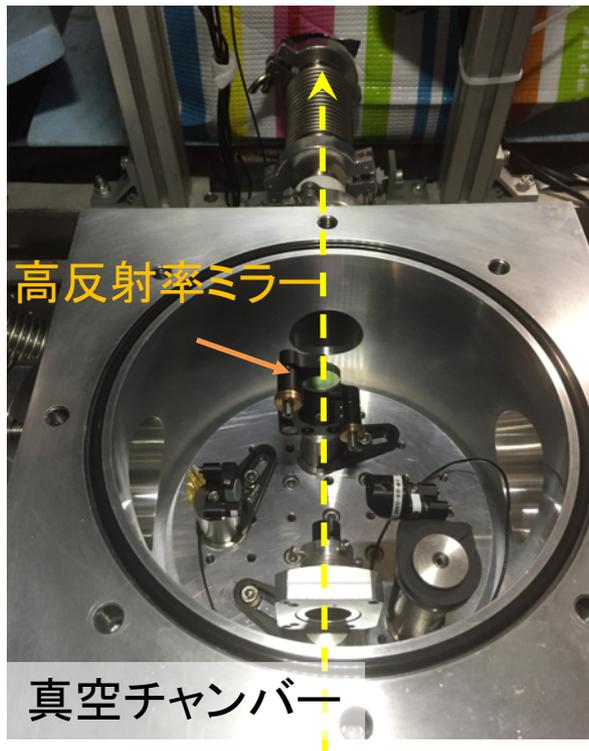
世の中にある最高性能 $R > 99.999\%$ ミラーを使用



→波長にフィードバックし、精密な共振制御をする

実際に製作

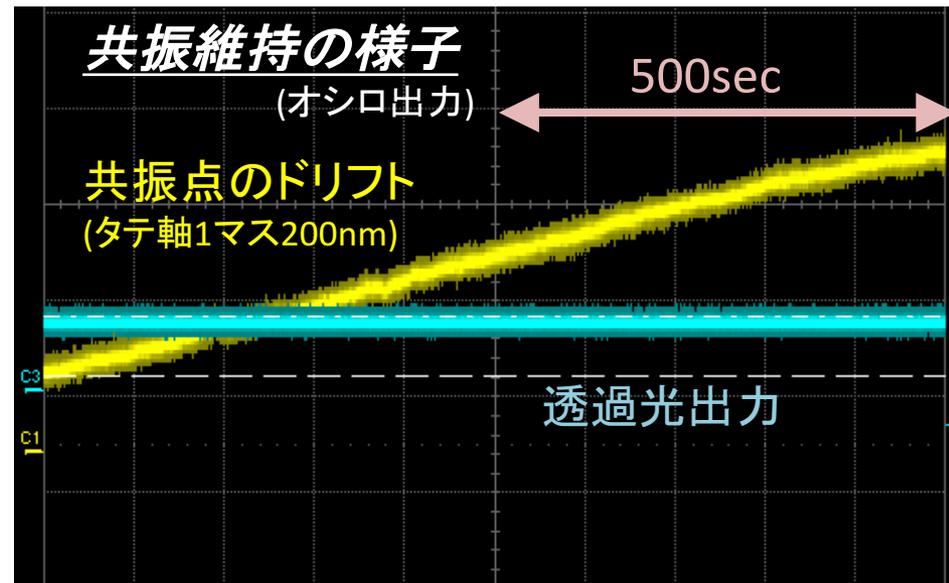
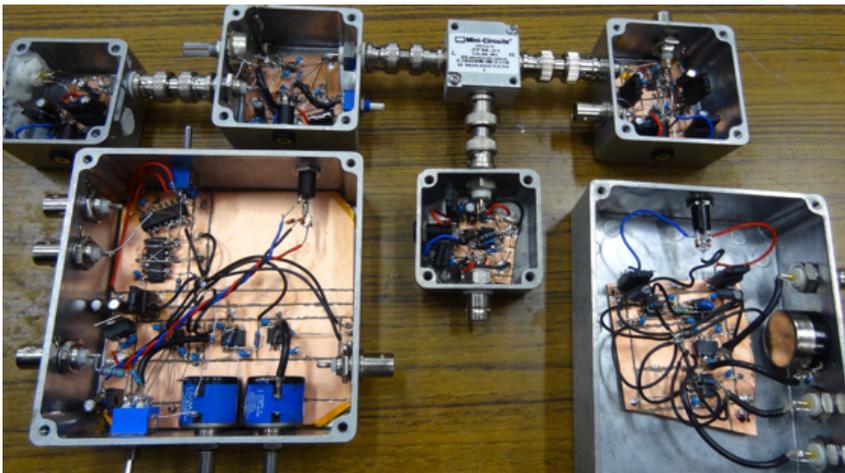
- $R > 99.999\%$ のミラーを用いて $L = 1.4\text{m}$ の共振器を組んだ。
- 空気によるロス ($\sim 0.01\%/m$)を避けるため、真空中に封入
- 共振器内パワーの減衰時定数 $\tau = FL/\pi c$ からフィネスを測定できる。共振から外れるときの信号を見て、 $F = 650,000$ と実測



フィードバック共振制御

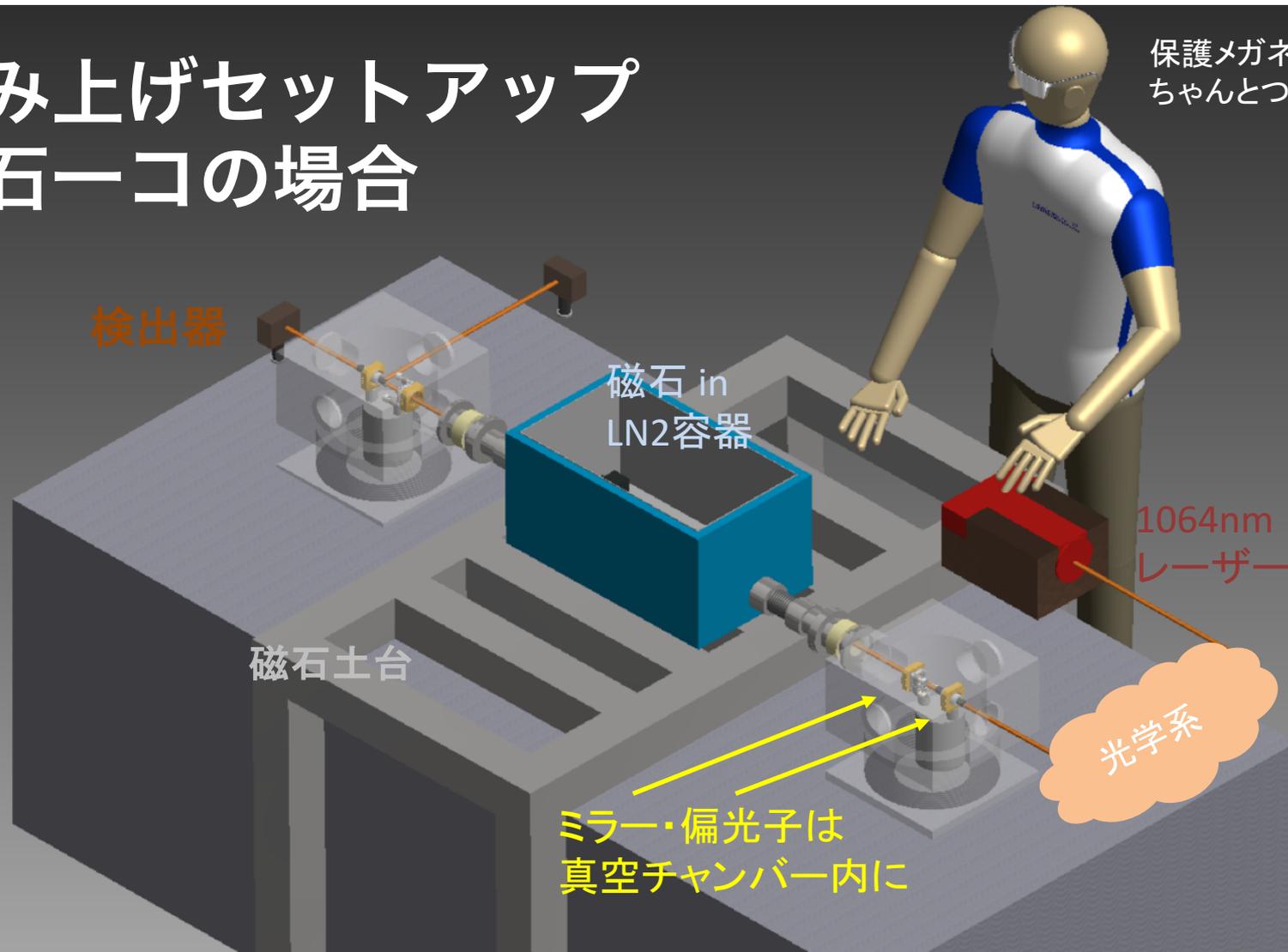
- 共振からのずれを読み出しフィードバックするシステムも構築し、 $F=650,000$ の共振器に関して10分以上の共振を達成。帯域70kHz、1kHzでの擾乱の押さえ込みは60dB以上になるように設計。
- $F=10,000$ のプロトタイプ共振器に対してもフィードバック制御を行い、磁石との同時駆動も達成した → 次の上岡のトーク

手作りフィードバック回路



組み上げセットアップ 磁石一コの場合

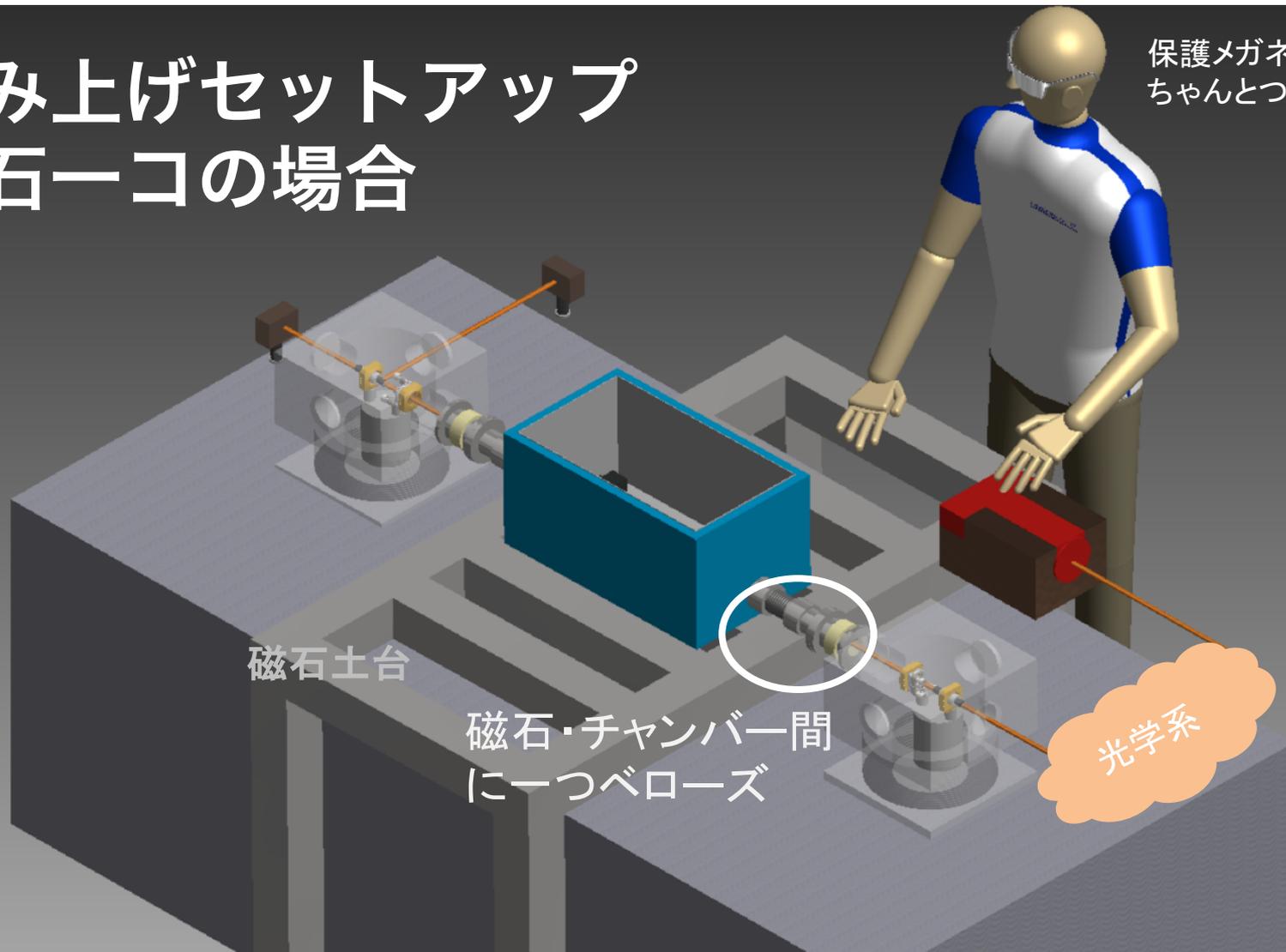
保護メガネは
ちゃんとつけよう



- 気体の複屈折を制御するため、ミラー・偏光子×2は真空チャンバー中に

組み上げセットアップ 磁石一コの場合

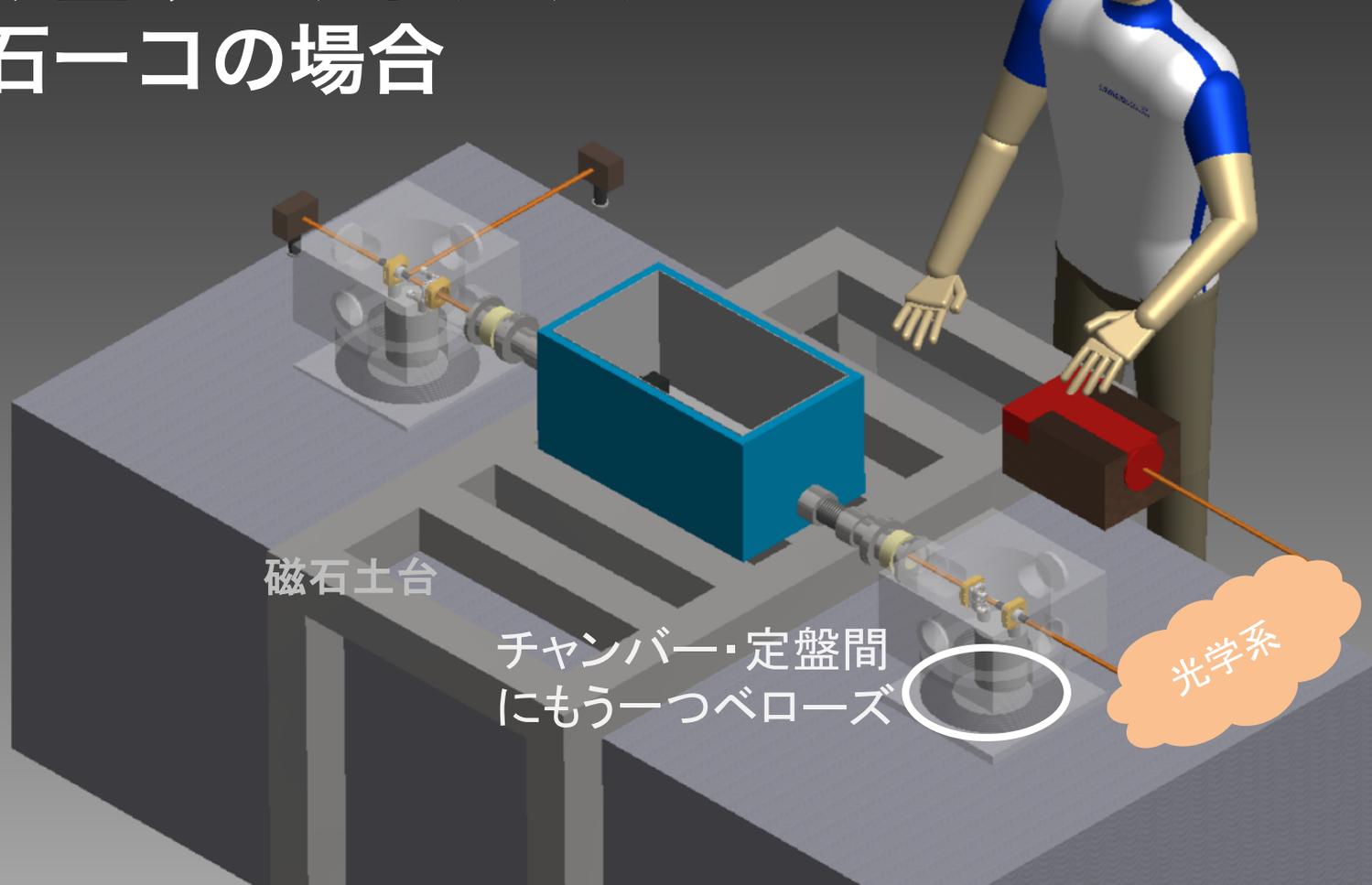
保護メガネは
ちゃんとつけよう



- 磁石の振動を切るために、土台を定盤から分離&二箇所へベローズ

組み上げセットアップ 磁石一コの場合

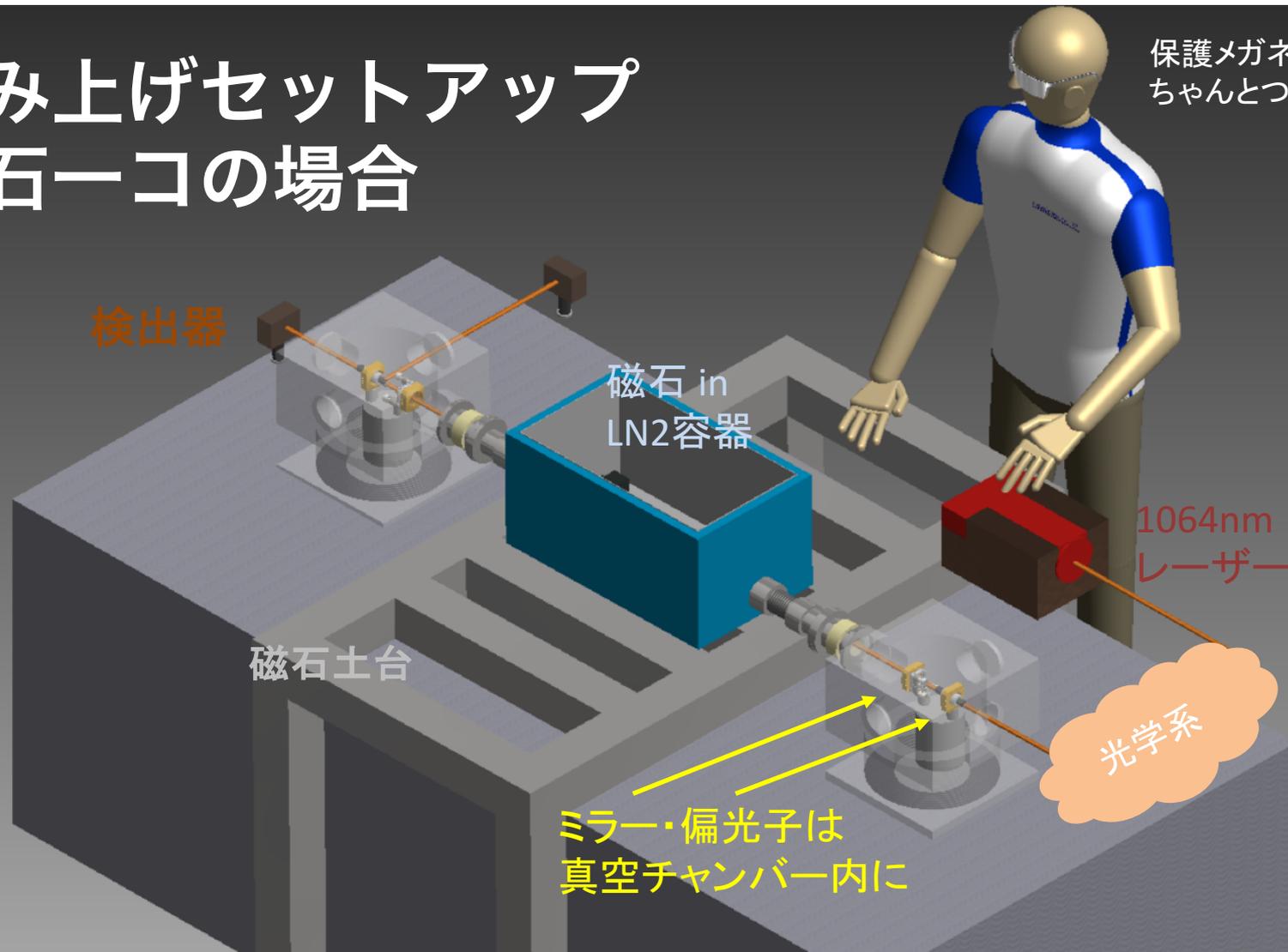
保護メガネは
ちゃんとつけよう



- 磁石の振動を切るために、土台を定盤から分離&二箇所へベローズ

組み上げセットアップ 磁石一コの場合

保護メガネは
ちゃんとつけよう



- この設計に基づいた装置組み上げ、実測については次の上岡のトークで。

まとめ

- ✓ 真空複屈折はQEDの真空非線形効果でありAxionなど未知粒子にも感度を持つがいまだ観測されていない。
- ✓ 初観測に向けて、①20T, 0.2m×4, 6Hzのパルス磁石と、②F=450,000のFabry-Pérot共振器を想定した装置開発を行っている。プロトタイプ装置はすでに完成。
- ✓ 同時に実際に組み上げた設計も完了し、複屈折探索実験に必要なパーツの開発が完了。

次の講演ではプロトタイプ装置を組み合わせて
行った測定の結果について報告する