

2024年9月13日

9:00~10:00, 10:10~11:10

3号館セミナーホール@KEK

第41回 高エネルギー加速器セミナー

OHO'24

新奇・革新的な加速技術

大電力半導体スイッチ

日本原子力研究開発機構

J-PARCセンター 加速器ディビジョン

高柳 智弘

世界初、素粒子ミュオンの冷却・加速に成功

～ミュオン加速元年、ついにミュオン加速器の実現へ～

PRESS RELEASE



報道関係各位

2024年5月17日

世界初は凄い!

これからはミュオンの
時代だな!

研究に多くの人
関わっているんだな!

他には?

どんな加速器か？



キーワード

- J-PARC
- MLF
- ミュオン実験施設
- 高周波加速空洞

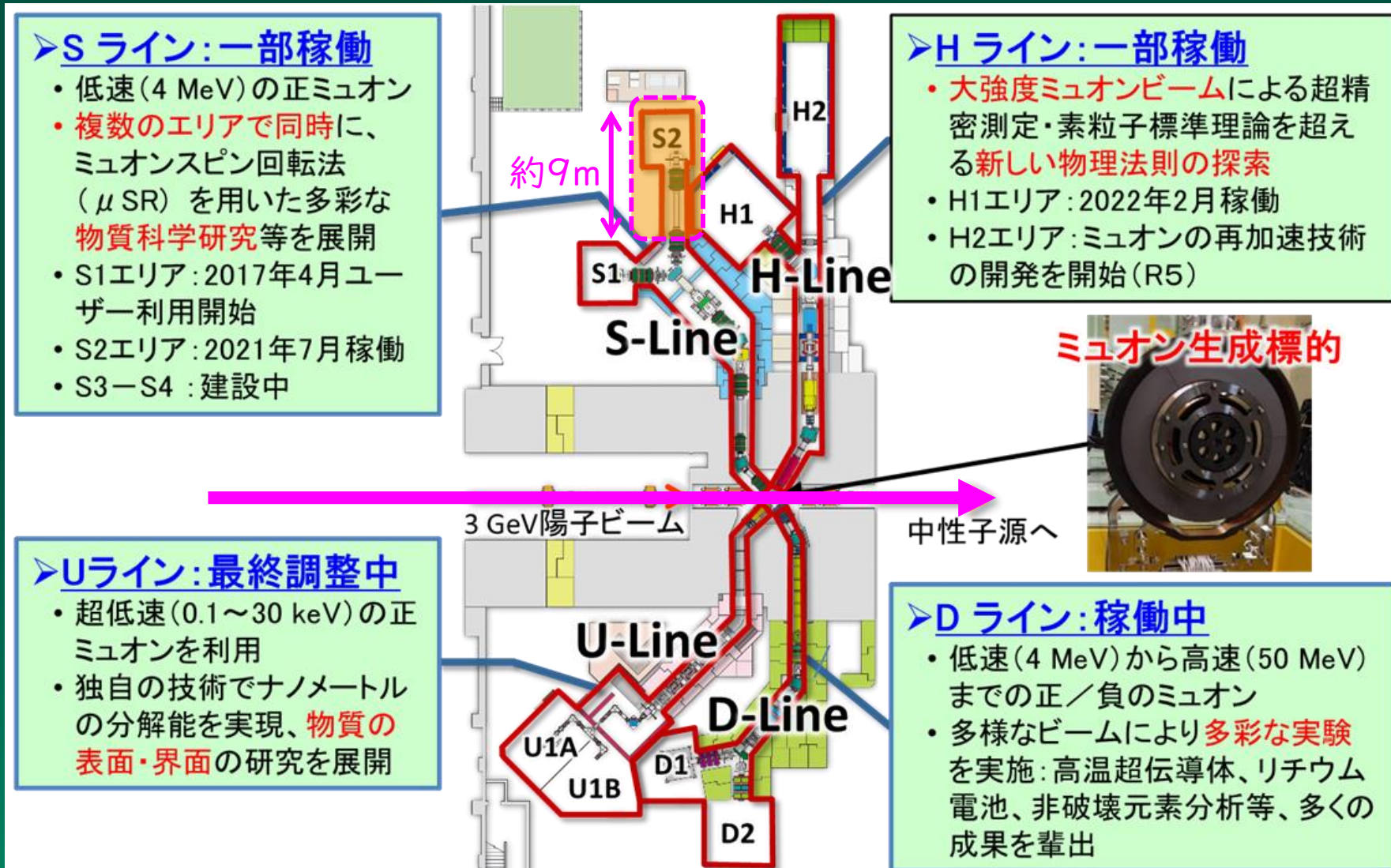
写真1 J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) ミュオン実験施設で行われたミュオン冷却・加速の実験装置。正ミュオンビームが右側から入射し、写真右手前の装置で冷却され、その左側にある高周波加速空洞で加速される。加速空洞の左奥に加速されたビームの診断装置が設置されている。

J-PARC

茨城県那珂郡東海村

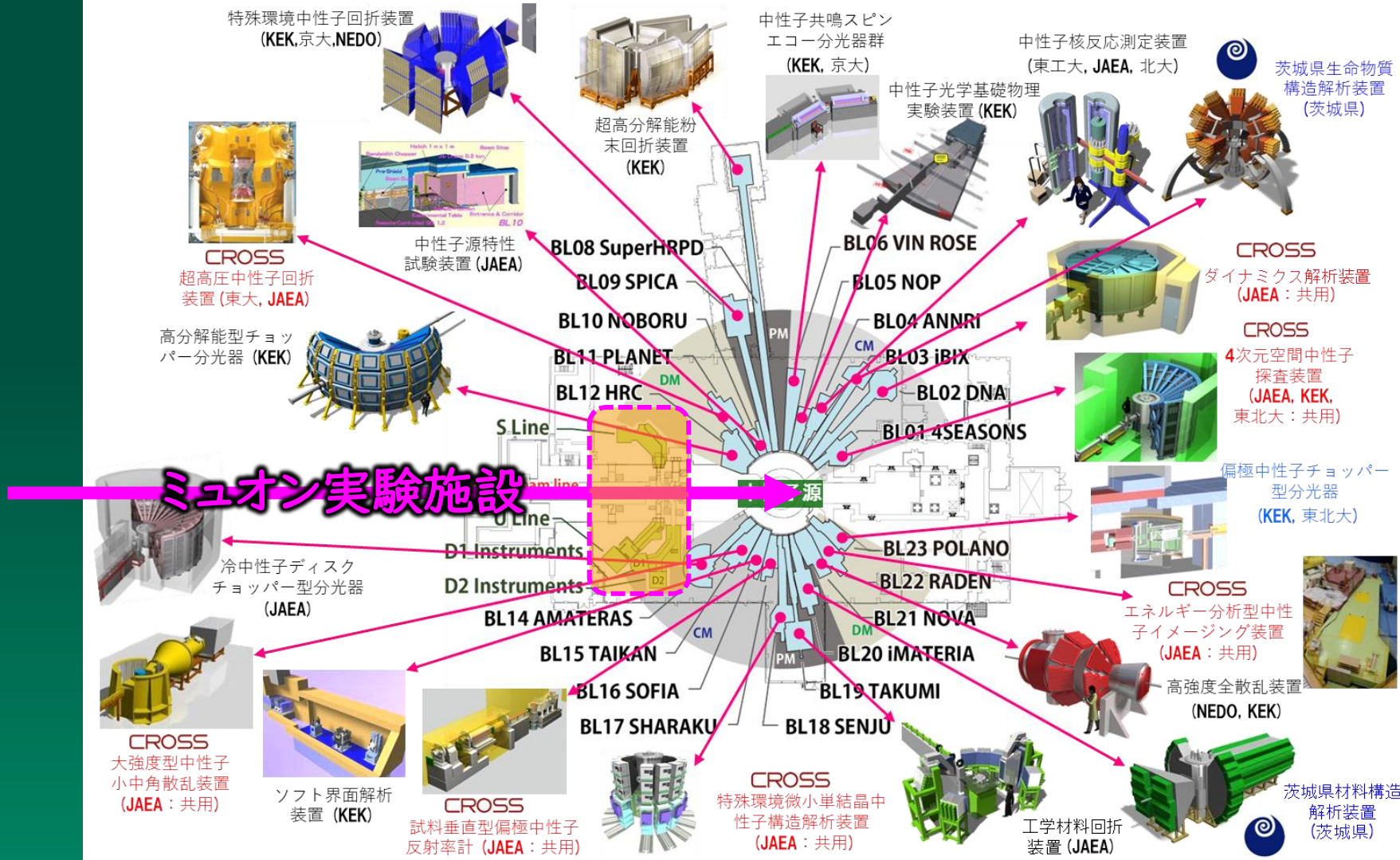


ミュオン実験施設

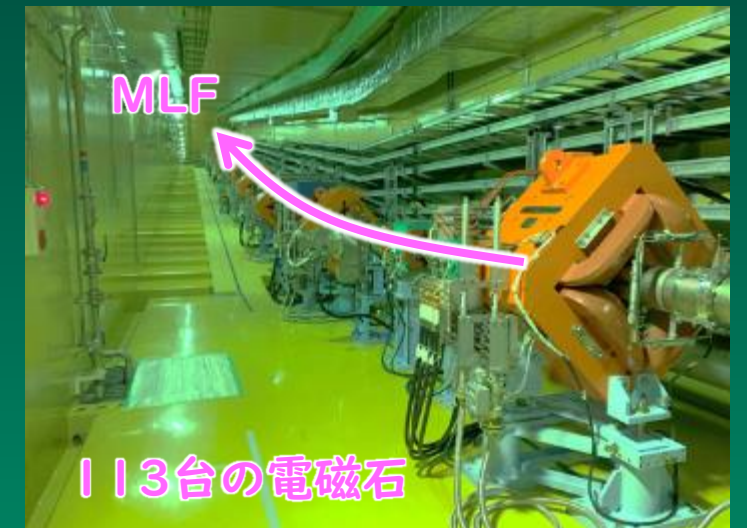
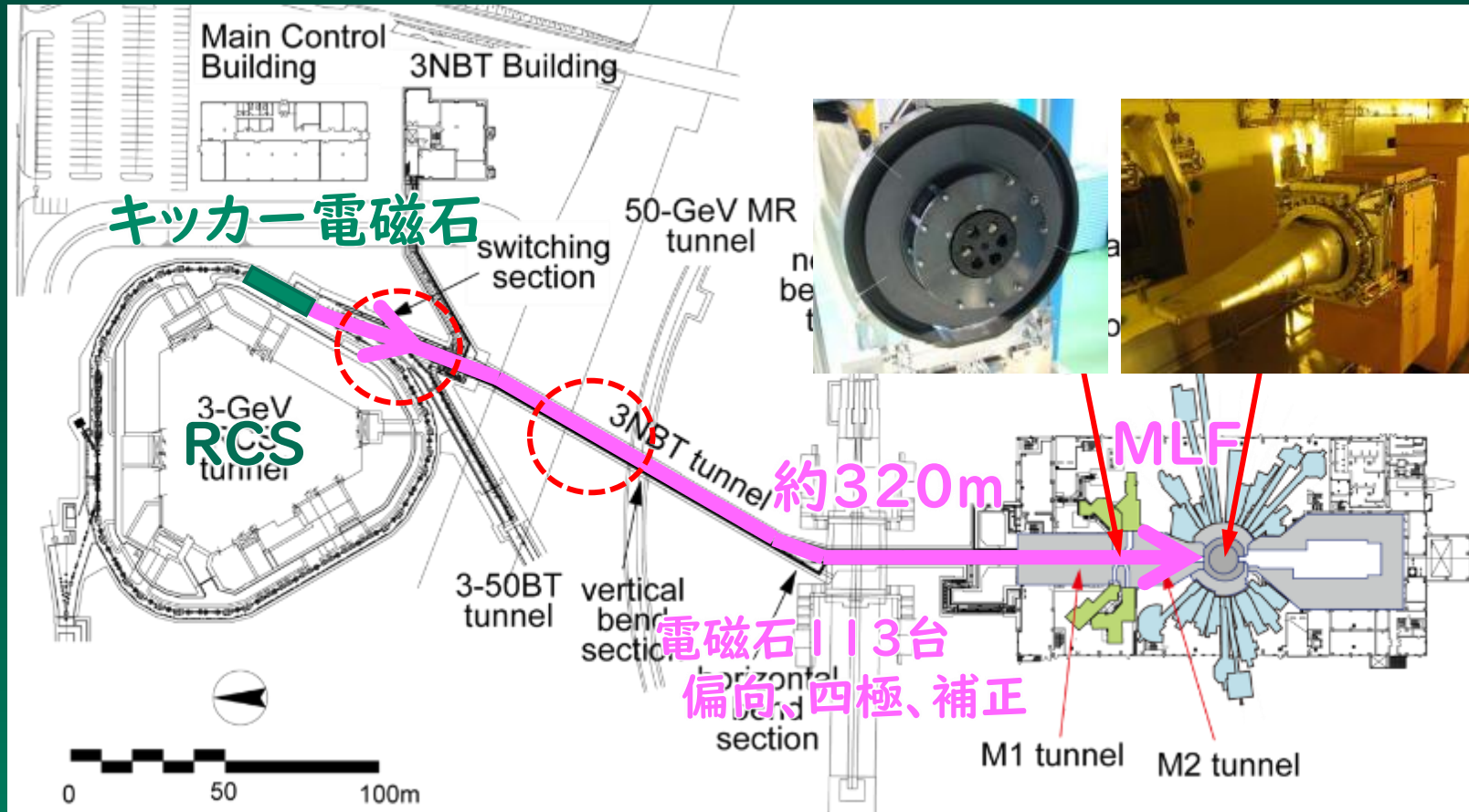


MLF

中性子実験装置: 21台が稼働中 (K: 8、J: 4、C: 7、I: 2)



MLFのビームはRCSからやってくる



RCSでつくられた大強度ビームはMLFに送られ、2次粒子の生成に使われる

RCSの電磁石

ダンプ部の電磁石

- ・ダンプセプタム 2台
- ・ダンプ四極 1台
- ・ダンプステアリング 2台

入射部の電磁石

- ・水平シフトバンプ 4台
- ・水平ペイントバンプ 4台
- ・垂直ペイント 2台
- ・可変偏向 2台
- ・入射ステアリング 4台
- ・入射セプタム 2台

2台
1台

入射部

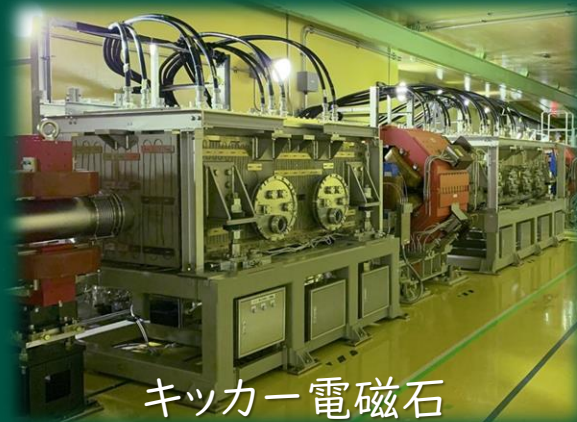
RCS

繰り返し25Hz (25回/秒)
周長 約350m
平均ビーム電流333uA
取り出しエネルギー3GeV

出射部

出射部の電磁石

- ・キッカー電磁石用 8台
- ・出射セプタム電磁石 3台
- ・低エネルギー偏向電磁石 2台



キッカー電磁石

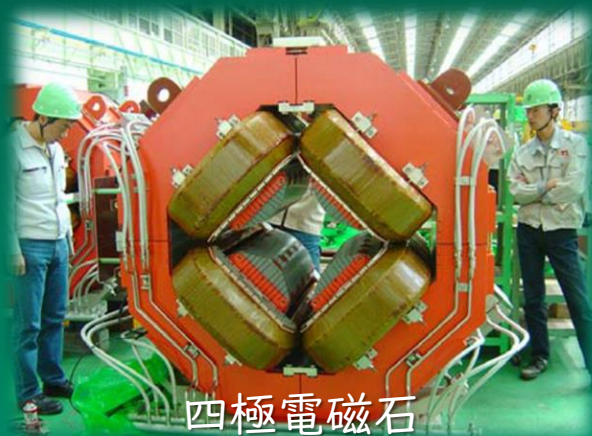
加速部

加速部

- ・高周波加速空洞 12台

周回部の電磁石

- ・偏向 24台
- ・四極 60台
- ・六極 18台
- ・ステアリング 52台



四極電磁石



高周波アンプと空洞

200台以上の機器

つまり

輝かしい実験成果の裏には**たくさんの電源**がある。



「**加速器の性能は電源で決まる**」といっても過言ではない。
電源から出力する電圧・電流を制御する機器が“**スイッチ**”

スイッチを制する者は加速器を制す

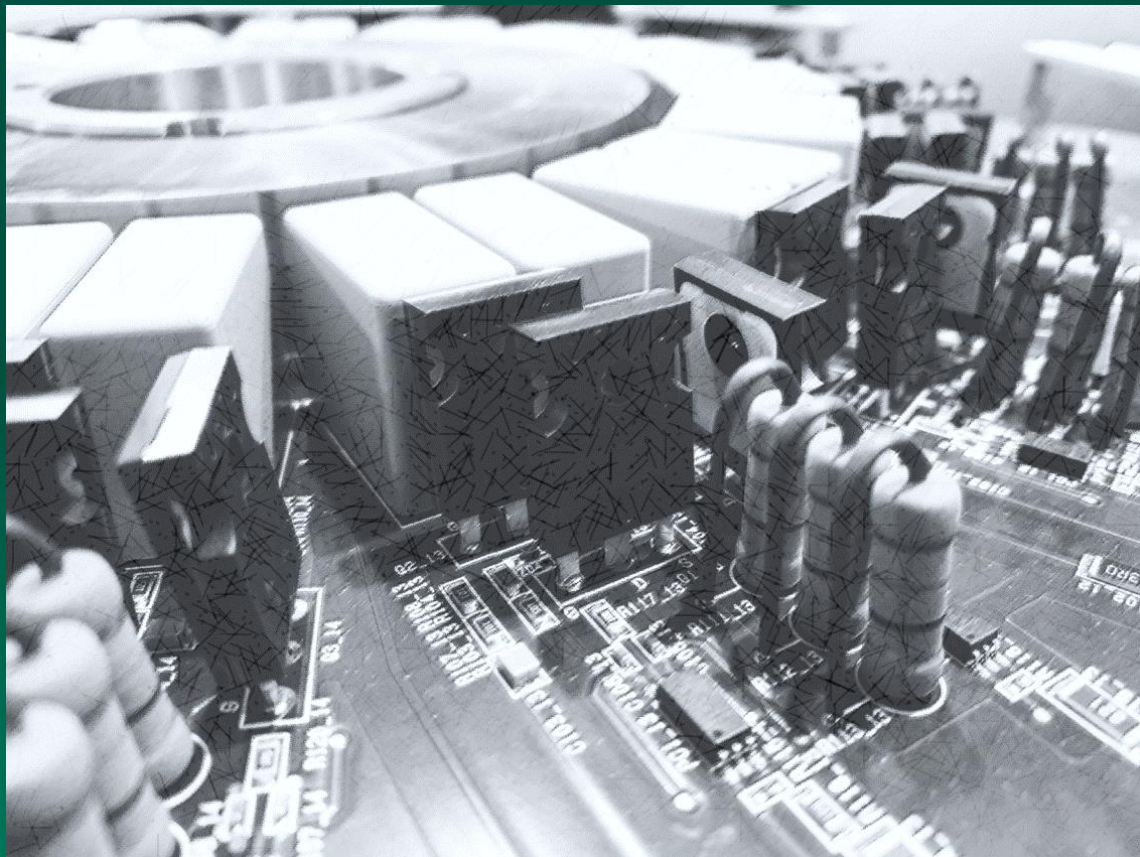
大電力半導体スイッチ

内容

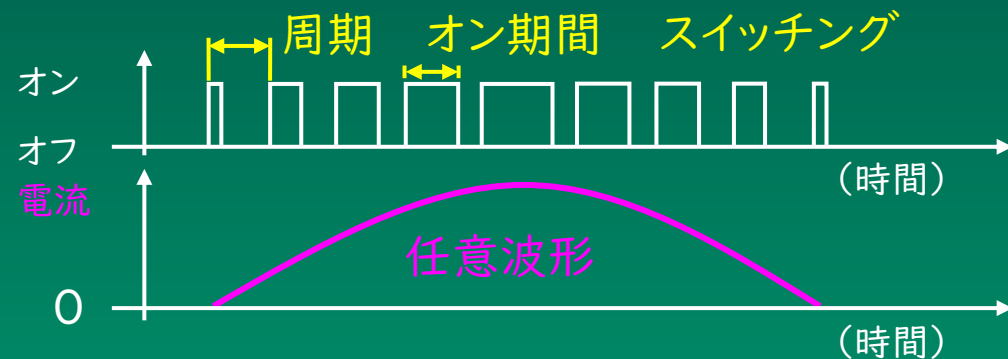
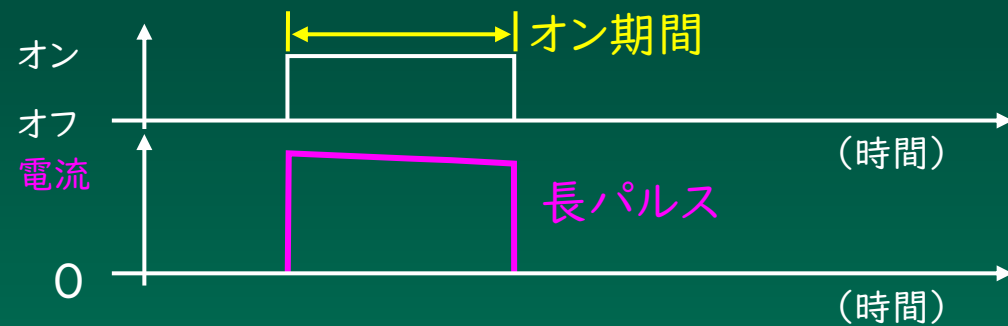
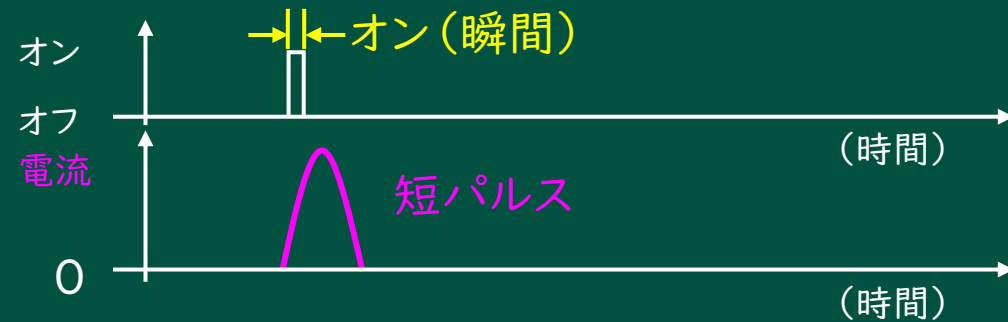
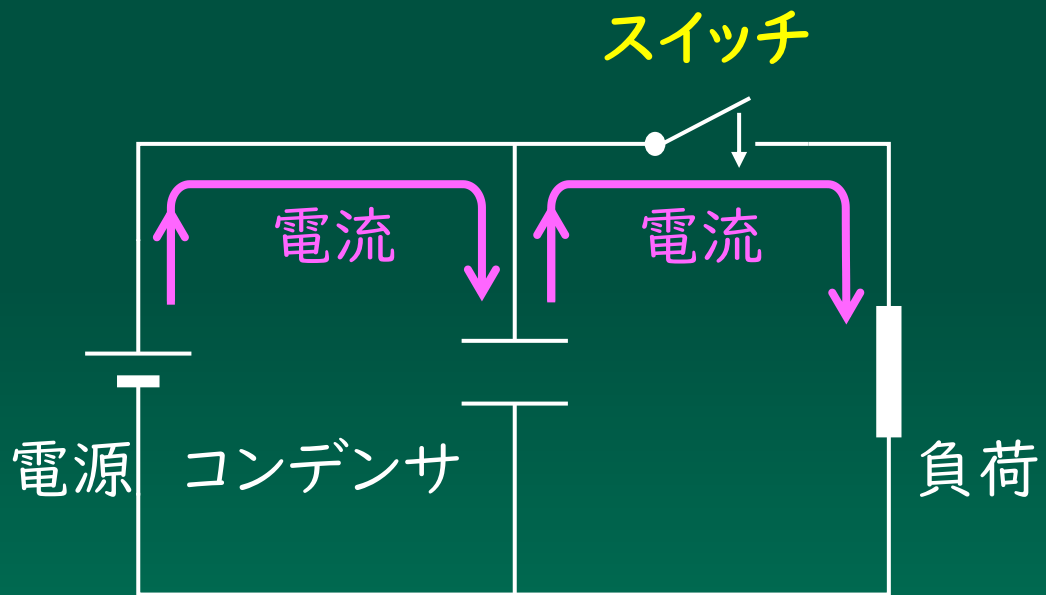
- ・スイッチについて
- ・開発のモチベーション
- ・開発中の半導体スイッチの紹介
- ・設計時に検討して欲しいこと

※RCSキッカー電磁石用の半導体パルス電源を中心に紹介
(設計の流れ)

スイッチとは？

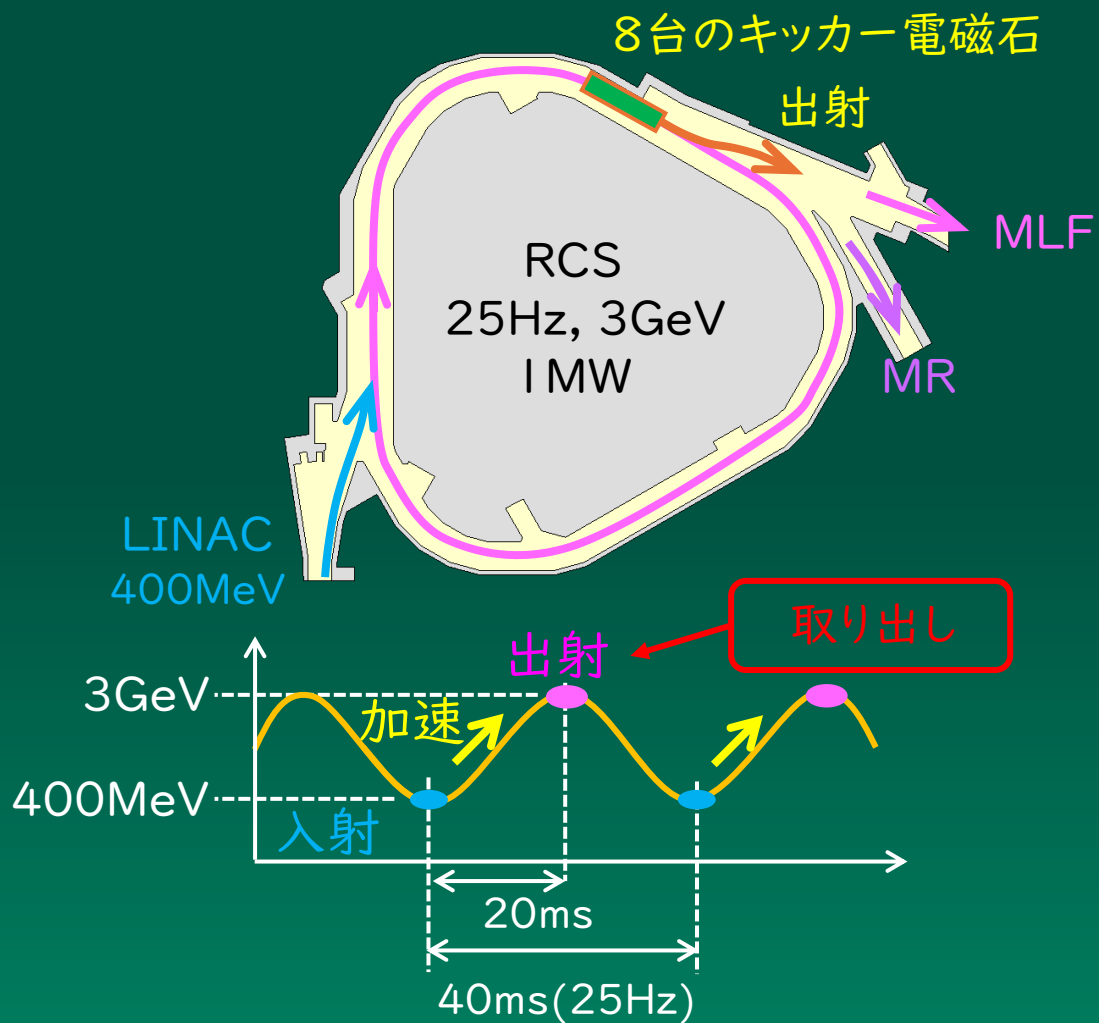


スイッチの役割

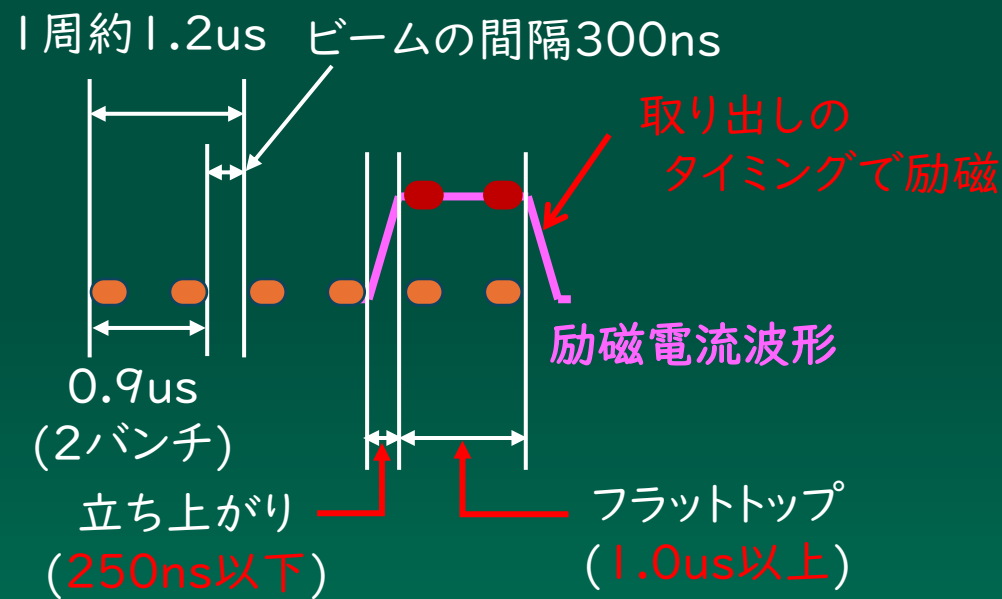


J-PARCとRCS、キッカーシステムについて

RCSとキッカー電源の励磁波形



20ms (約15,000周回)で3GeVまで加速

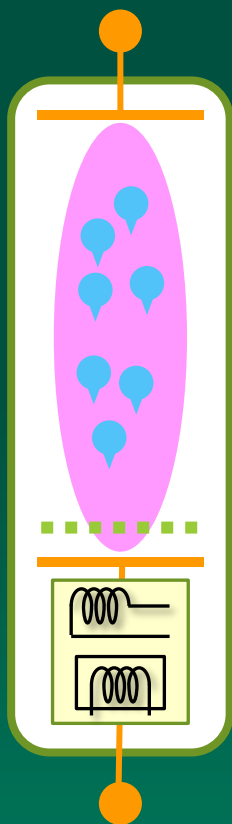


【2バンチ運転時のイメージ】

3GeVビームを短パルスで蹴り出す

キッカー電源で使用している大電力高速スイッチ
サイラトロン(放電管)

サイラトロン



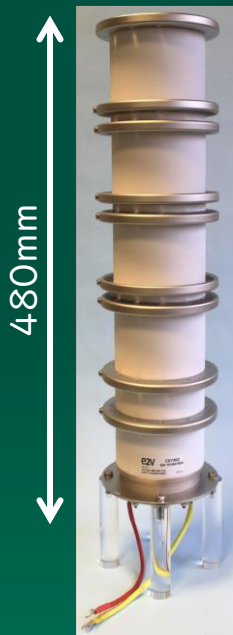
放電
⇒スイッチオン

← グリッド
(トリガ信号)

ヒーター
リザーバー

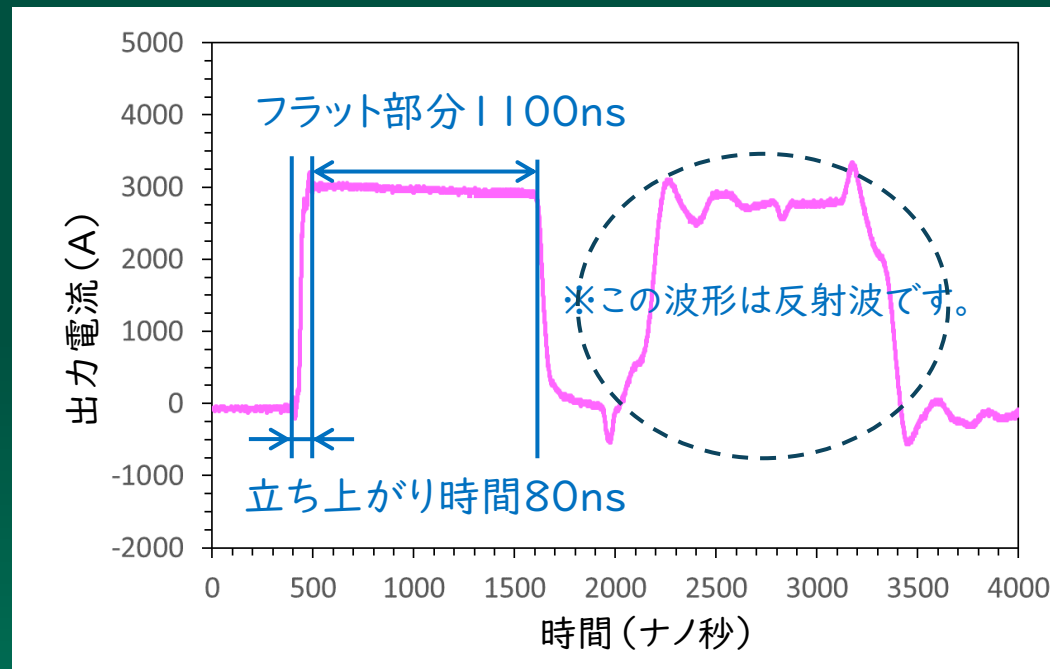
ガス圧調整
⇒立ち上がり速さ

【サイラトロン概念図】



【サイラトロン】

e2V製CX1193C@英国
Peak voltage: 130kV
Peak current: 10kA



【キッカー電源からの出力電流波形】

◆ サイラトロンだからこそ要求仕様を満足できる

RCSキッカー電源の主な構成機器



RCS棟地下1階

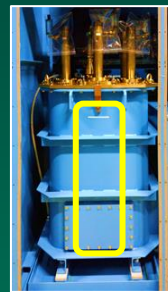
【キッカー電源1台の写真】



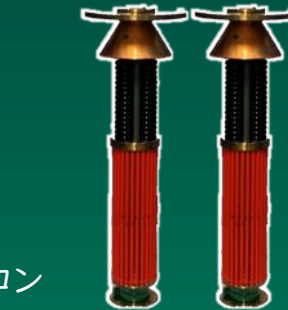
・PFNケーブルドラム:2枠
エネルギー蓄電・パルス出力用



・PFNケーブルドラム:2枠



・サイラトロン
・サイラトロンマウント
大電力スイッチ



・エンドクリップ:2台
反射波の吸収(受け止め)



・サイラトロン
・サイラトロンマウント



・エンドクリップ:2台

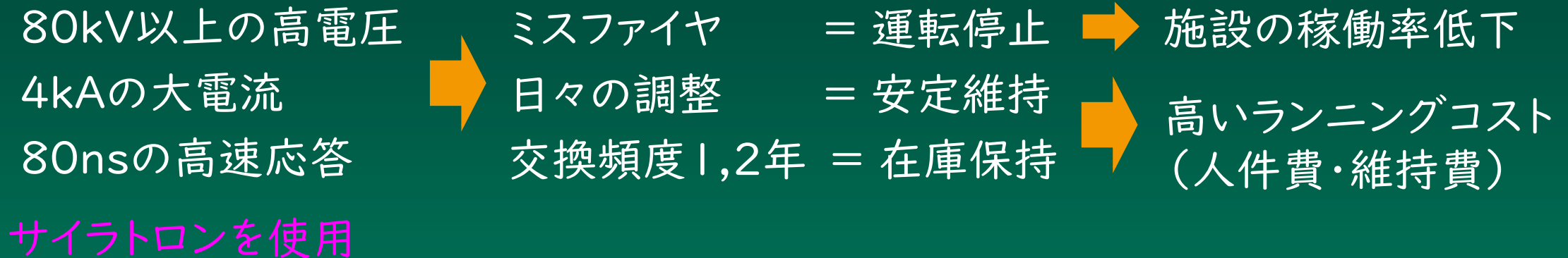
キッカー電源:二つの同じシステムで一つの電源(双子型)

- 現システムは80kV/4kAのPFN回路電源
- サイラトロンスイッチを採用

RCSでは8台のキッカー電源で運転をしている。

サイラトロンとキッカー電源の特徴と現状

- ◆大電力高速短パルス出力用スイッチ
- ◆サイラトロンだからキッカー仕様を満足できる



キッカー電源に求められること

安定した運転・運用
ランニングコスト低減



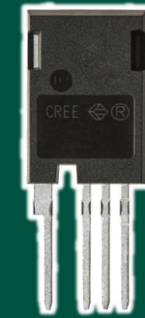
安定性
信頼性
メンテナンス性（長寿命）

「半導体スイッチ」を使用した新しいパルス電源の開発

サイラトロンからの卒業



“放電管”から”パワー半導体”へ



- ◆ パワー半導体の現在の主流はシリコン(Si)を用いたIGBTやMOSFET
使いやすさと低コストで民生用・産業用として広く使われている。

IGBT

：高耐電圧圧(～4.5kV)だが高速特性が劣る(50,000ns: 20kHz)

MOSFET

：高速特性(～10,000ns: 100kHz)に優れるが耐電圧性能が劣る(～250V)

キッカー電源に必要な性能を満足することができない。

- 高速特性(250ns以下)
- 高い耐電圧特性(80kV以上)

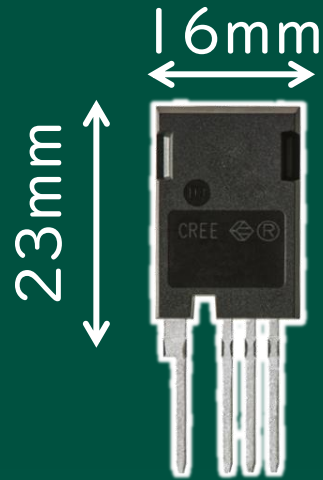
次世代パワー半導体を使う

従来品より「高耐圧」「高速」「低スイッチング損失」の特性に優れた次世代パワー半導体
 (Si-IGBTなど) (SiC-MOSFETなど)

項目	Si	SiC	特徴
バンドギャップ (eV)	1.12	3.26	高温動作
絶縁破壊電界強度 (V/cm)×10 ⁵	0.3	3.0	高耐圧 低オン抵抗
熱伝導度 (W/cmK)	1.5	4.9	高放熱特性
飽和ドリフト速度 (cm/s)×10 ⁷	1.0	2.7	高周波動作

加速器用パルス電源として有意な特徴	
高耐圧	➡ 高電圧
低オン抵抗 高放熱特性	➡ 大電流
高温動作	➡ 高繰り返し動作
高周波動作	➡ 短パルス出力

次世代パワー半導体『SiC-MOSFET』



【SiC-MOSFET】

- シリコンカーバイド(SiC)を用いたパワー半導体。
- 高速性能(数10ナノ秒)、耐電圧性能に優れる。
⇒ IGBTとMOSFETのいいところ取り?!
- 小型で電力損失が小さい。
- 従来品と比べて約70%の低損失化←実はこれが凄くイイッ!

CREE製C2M0045170P@米国

Peak voltage: 1700V

Peak current: 250A

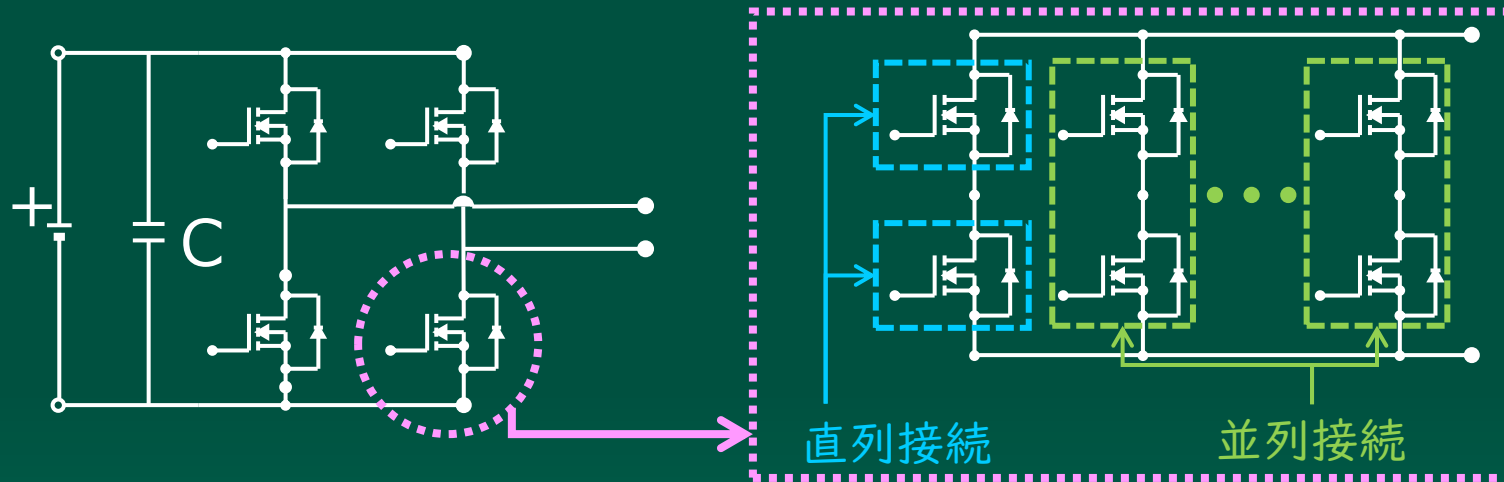
Rise time : 13ns

でも、キッカー電源には足りない・・・。

高性能パワー半導体の単一素子での「大電流化」「高電圧化」には限界がある

多重化回路の構築が必要

並列多重化回路



◎直列数増で高電圧 ◎並列数増で大電流

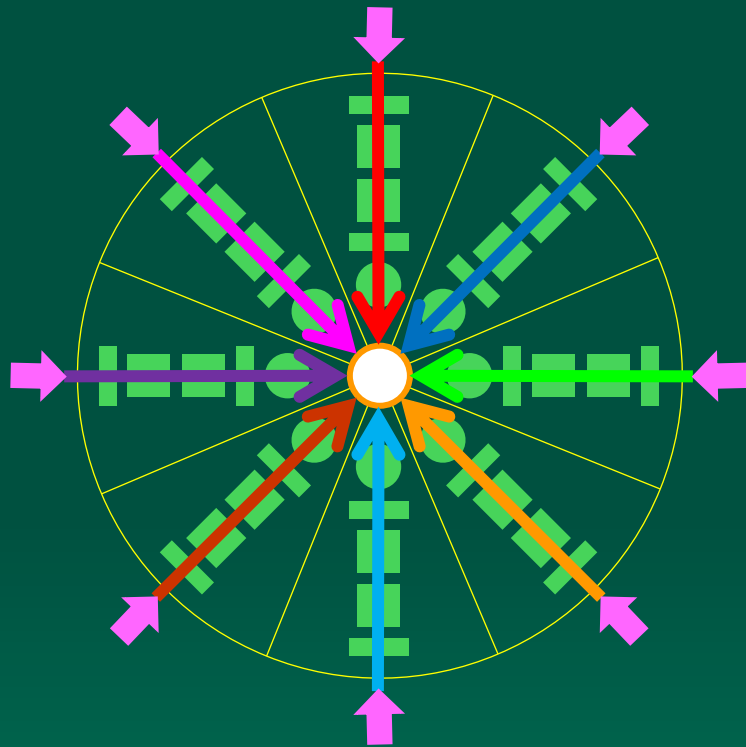
【一般的なスイッチ回路の概念図】

【パワー半導体多重化回路の概念図】

しかし

- 素子の並列・直列の多重化回路により大電流・高電圧の対応は可能
- 高精度なパルス波形の形成に求められる「低ノイズ」と「波形の低歪み」はどうだろうか？

新しい回路モジュール基板の開発



電流の流れる向き

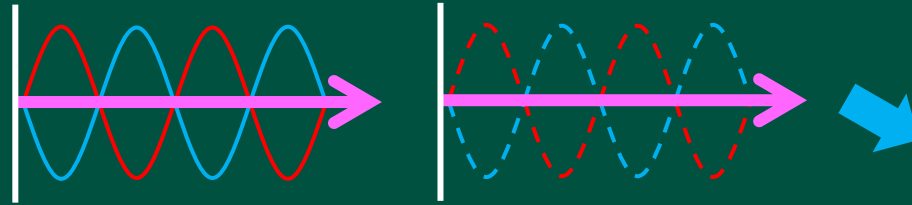
【基板イメージ図】

電流が放射状に流れる回路配置

放射対称型

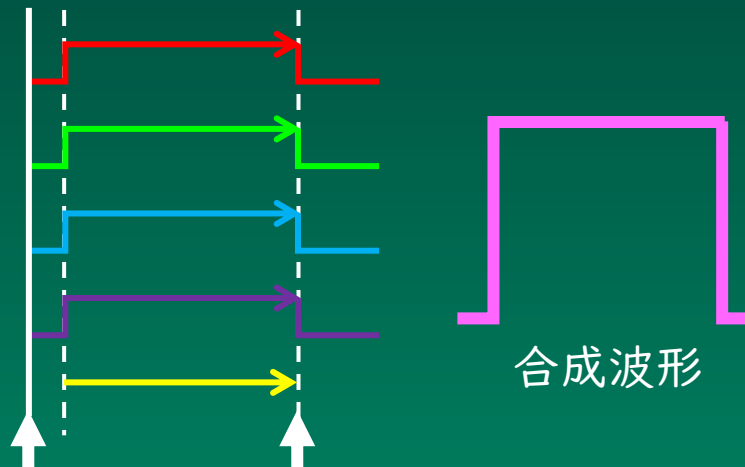
利点①

対称の回路構成がノイズを打ち消しあう。



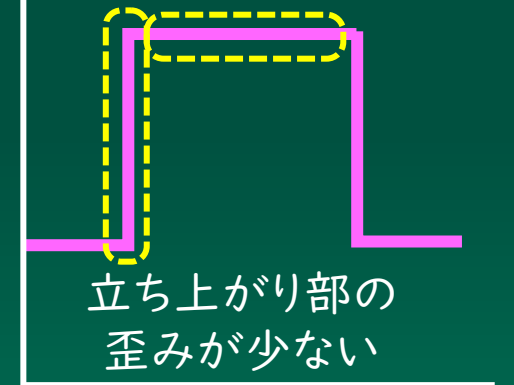
利点②

伝搬の距離と時間、浮遊容量に差が無い。



スイッチON 波形遅れが無い。

平坦部のノイズが少ない

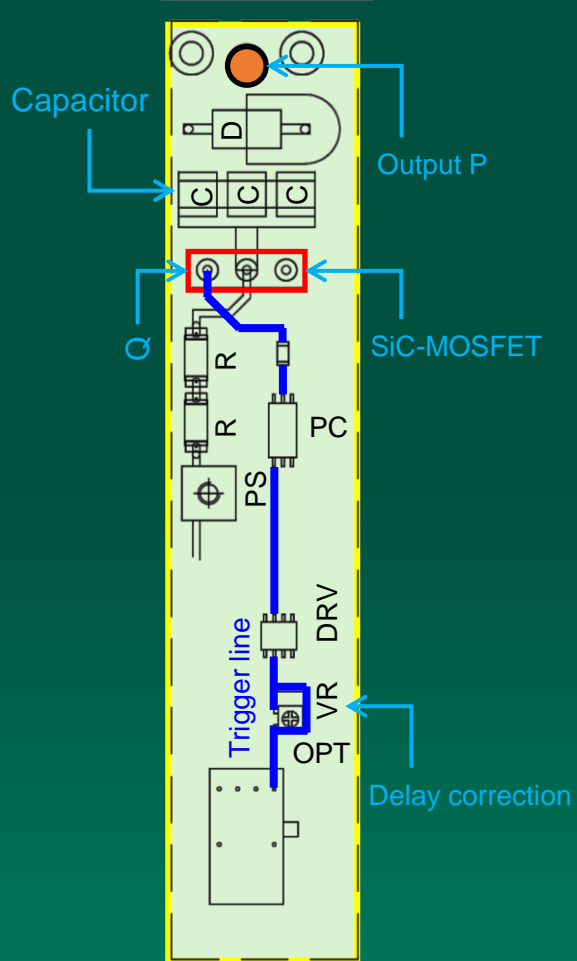


立ち上がり部の歪みが少ない

【出力電流波形イメージ図】

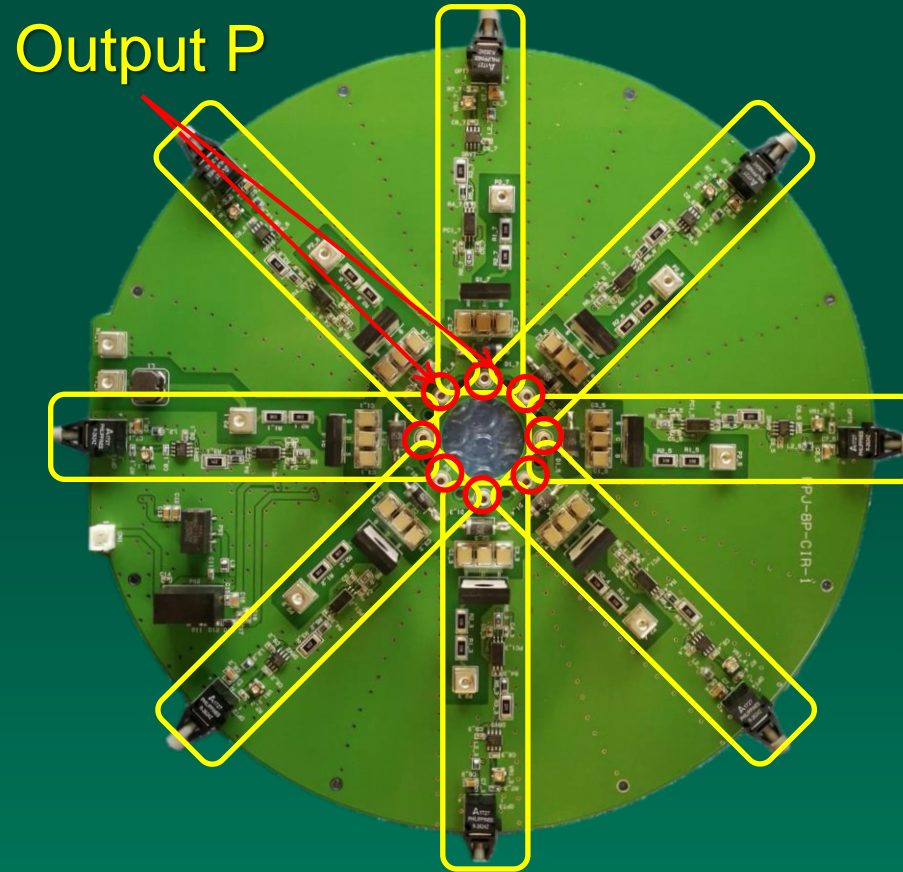
→ 開発した放射対称型回路が大電流パルスの高精度化を実現できる。

比較試験

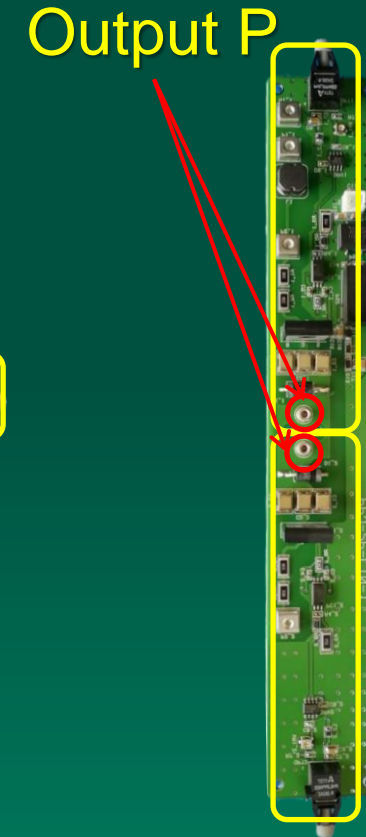


パワー半導体SiC-MOSFET(Rohm製)
SCT3030KL: 1200V/72A

【ベース回路】

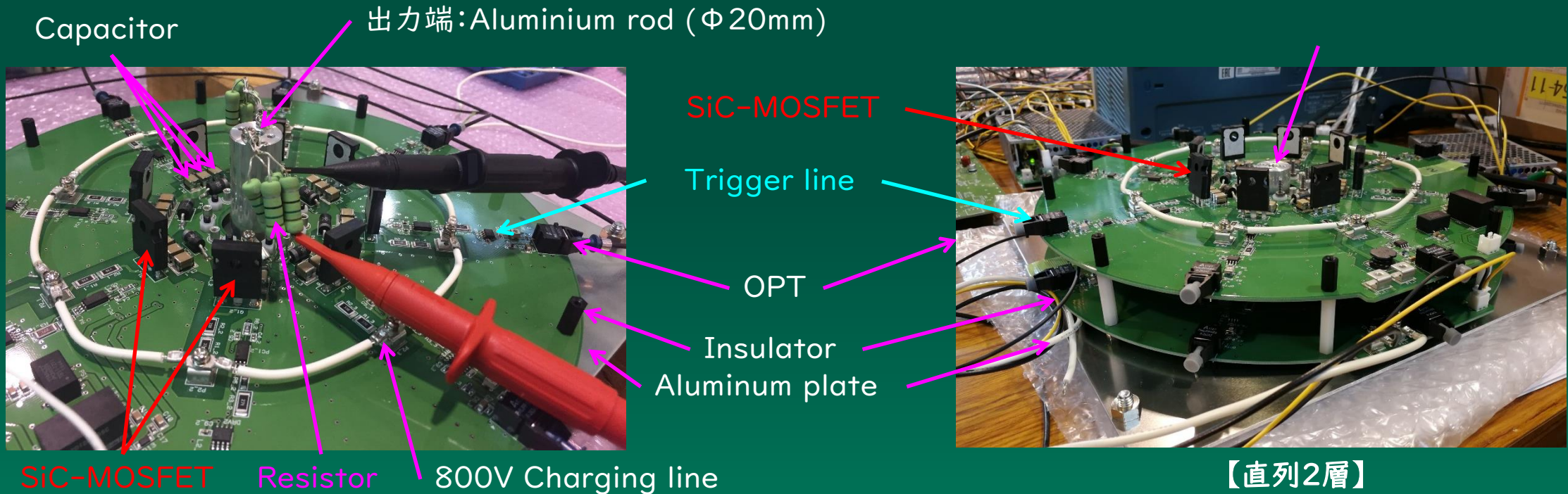


【放射対称型スイッチ基板】



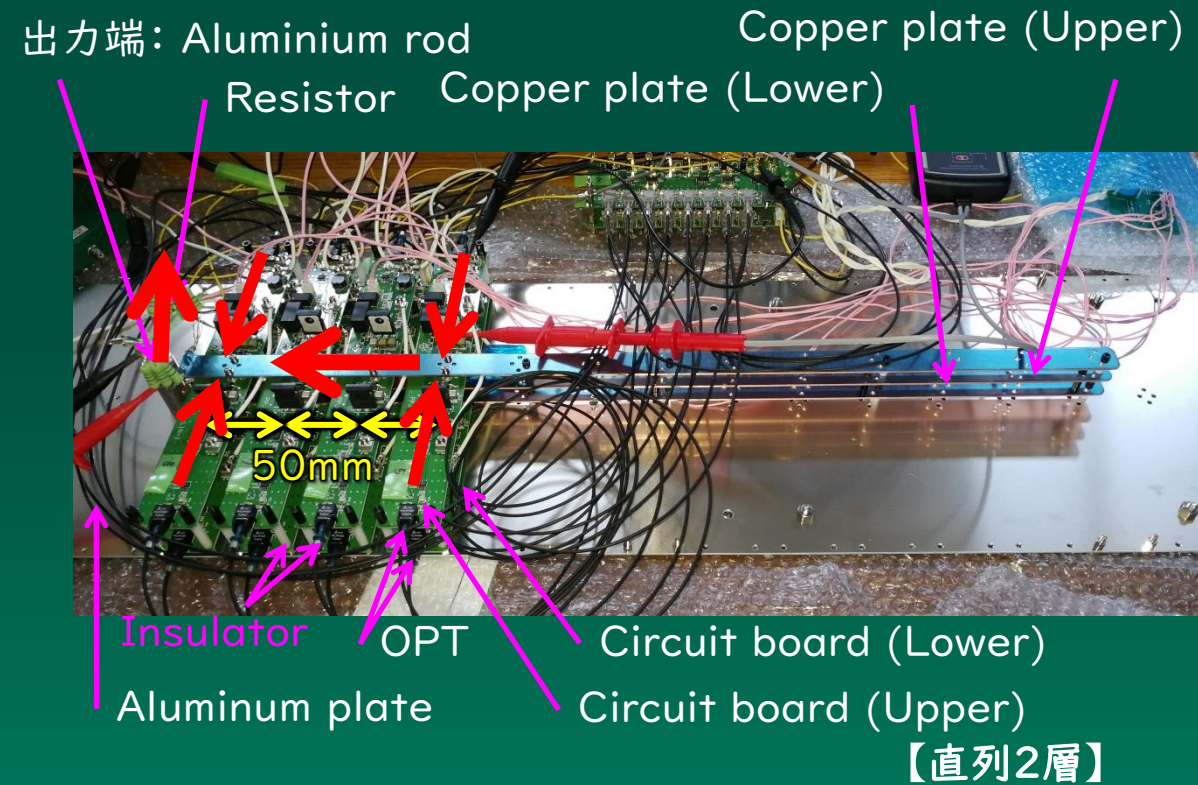
【線対称型スイッチ基板】

放射対称型スイッチ基板の試験

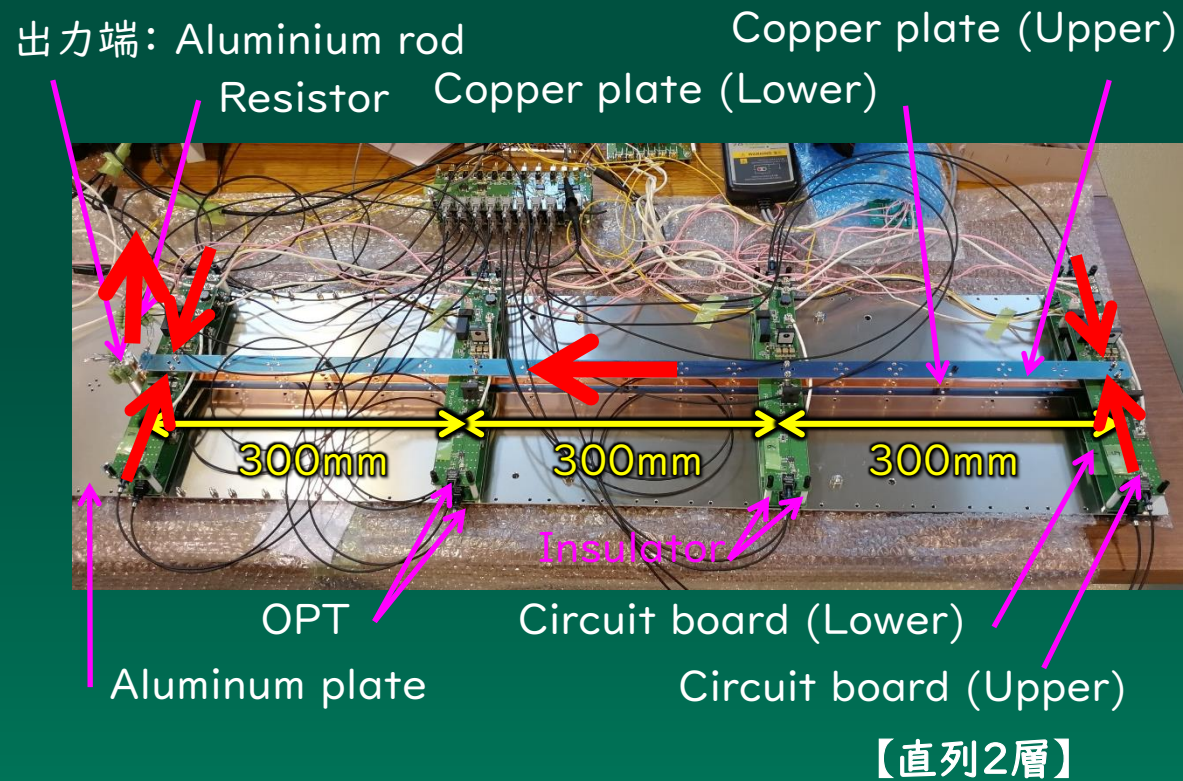


【放射対称型スイッチ基板】

線対称型スイッチ基板の試験



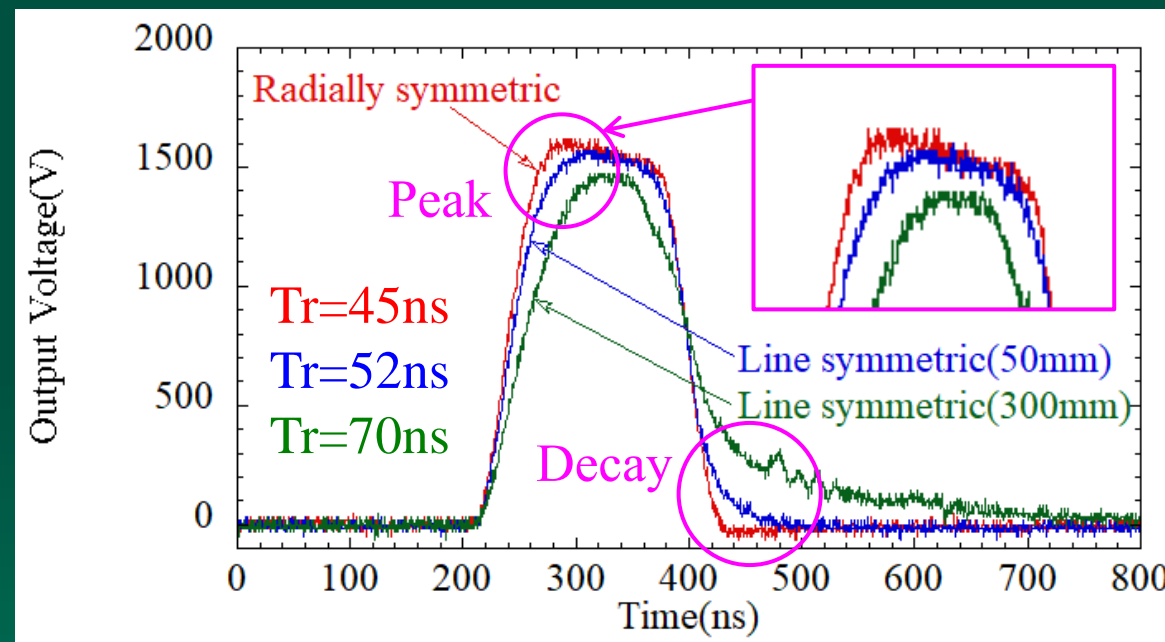
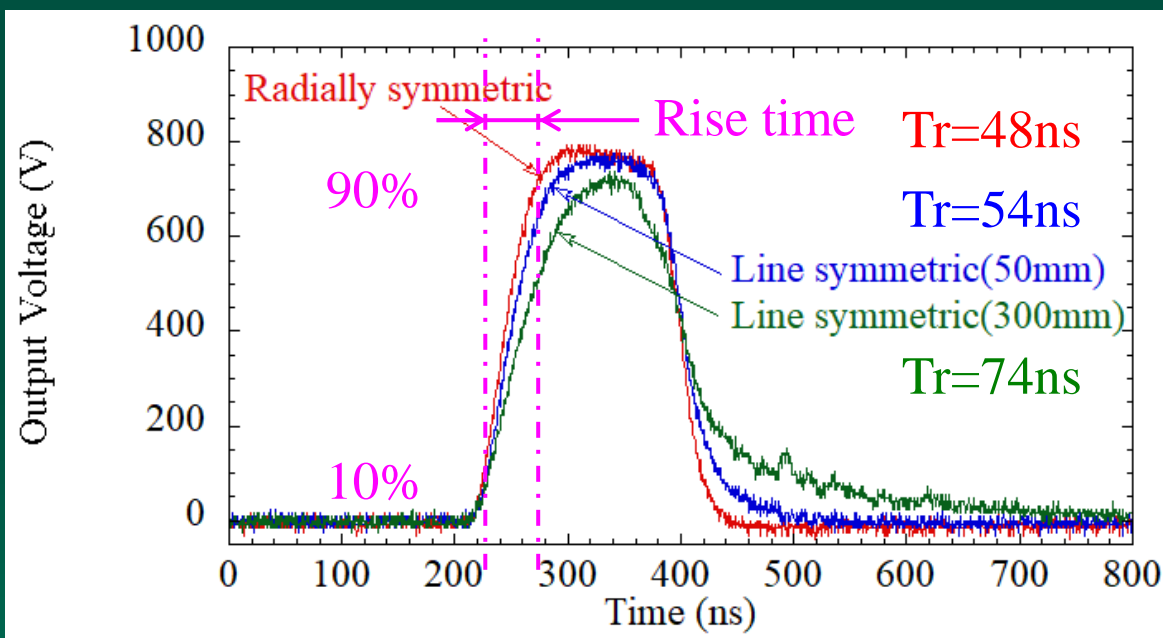
【回路間距離の差:50mm】



【回路間距離の差:300mm】

【線対称型スイッチ基板】

比較測定結果



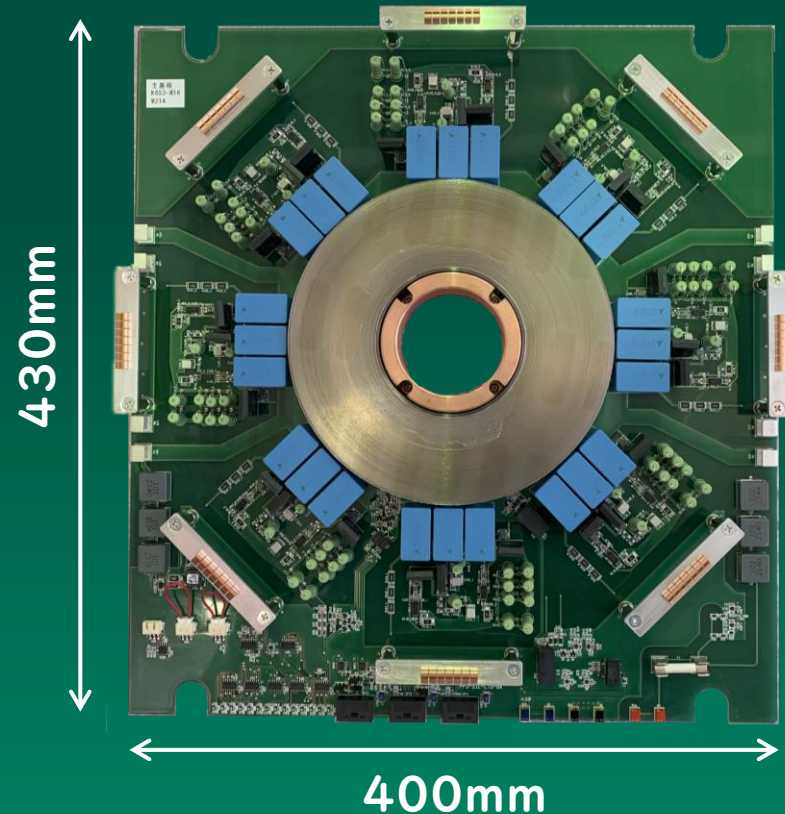
基板タイプ	1層 (出力800V)	2層 (出力1600V)
放射対称型	48ns	45ns
線対称型 (50mm)	54ns	52ns
線対称型 (300mm)	74ns	70ns

低歪み+低インダクタンス
放射対称型の実力を確認!

放射対称型回路の優位性を確認した。

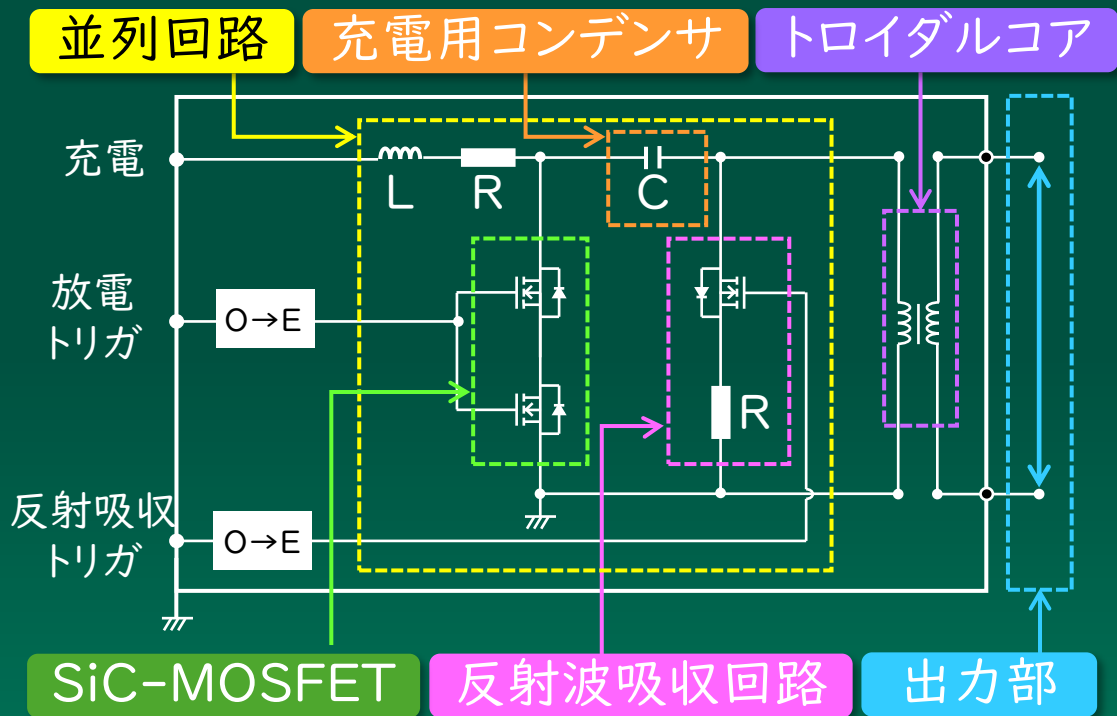
キッカー電源用半導体モジュール回路基板

- 誘導電圧重畳回路 (LTD: Linear Transformer Drivers) ※
磁性体コアを使用し、伝搬電磁波の形で電圧を足し合わせる方法
- 放射対称型半導体スイッチとLTD回路の組合せ



※ 発案・製品化
長岡技術科学大学 江先生
パルスパワー技術研究所 徳地氏

半導体モジュール基板の概要



【LTD回路ブロック図】

- 任意の電流と電圧のパルス出力が可能
- 回路の一次側と二次側がコアで分離

☆制御系の一次側回路が接地電位

※一般的な構造は高電圧になるほど絶縁設計が必要

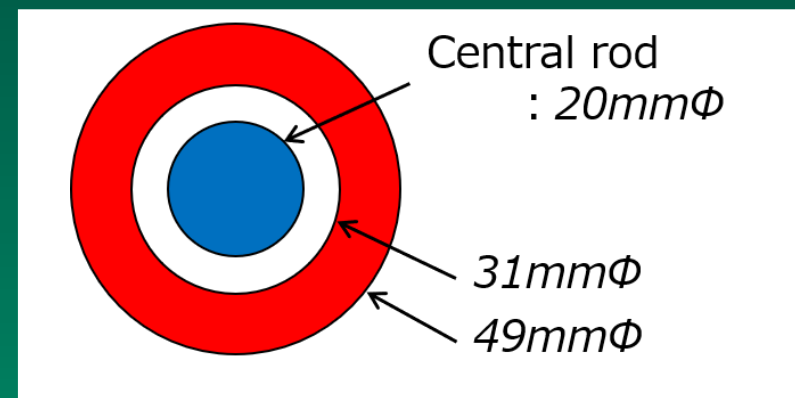
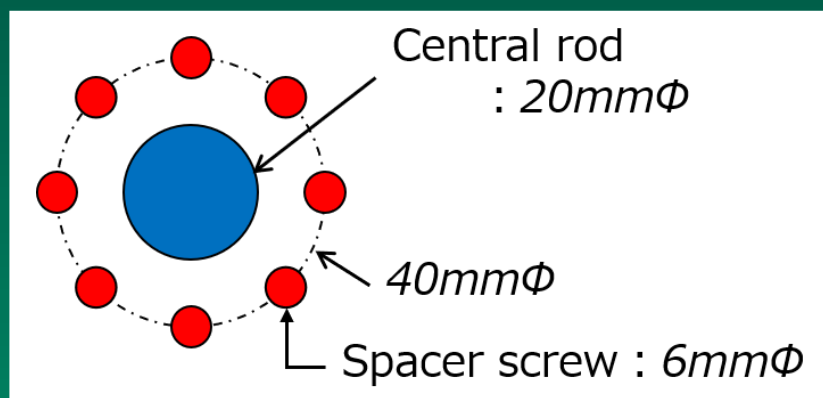
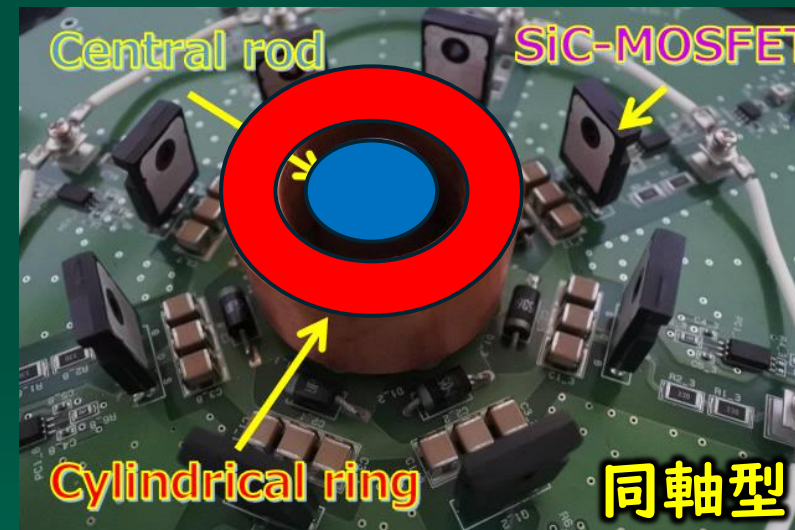
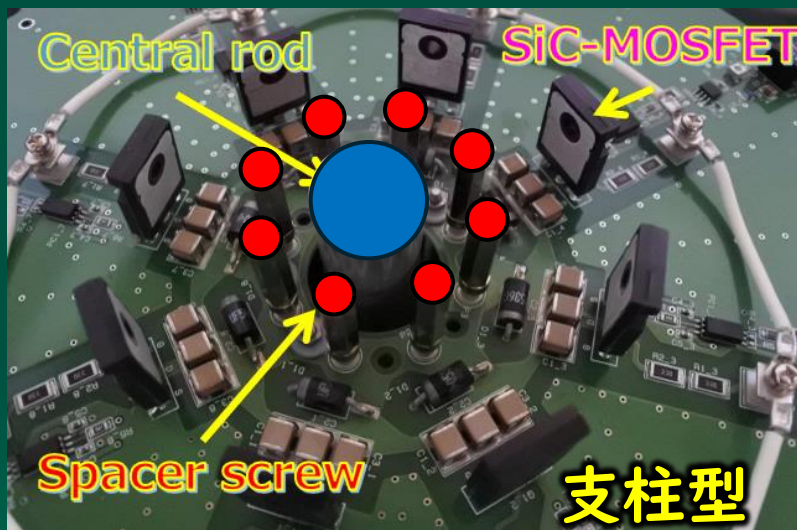


1枚当たり: 1250V/2kA/1.2 μ s/25Hz

電力伝送導体回路の最適化

低インダクタンス回路構造の検討

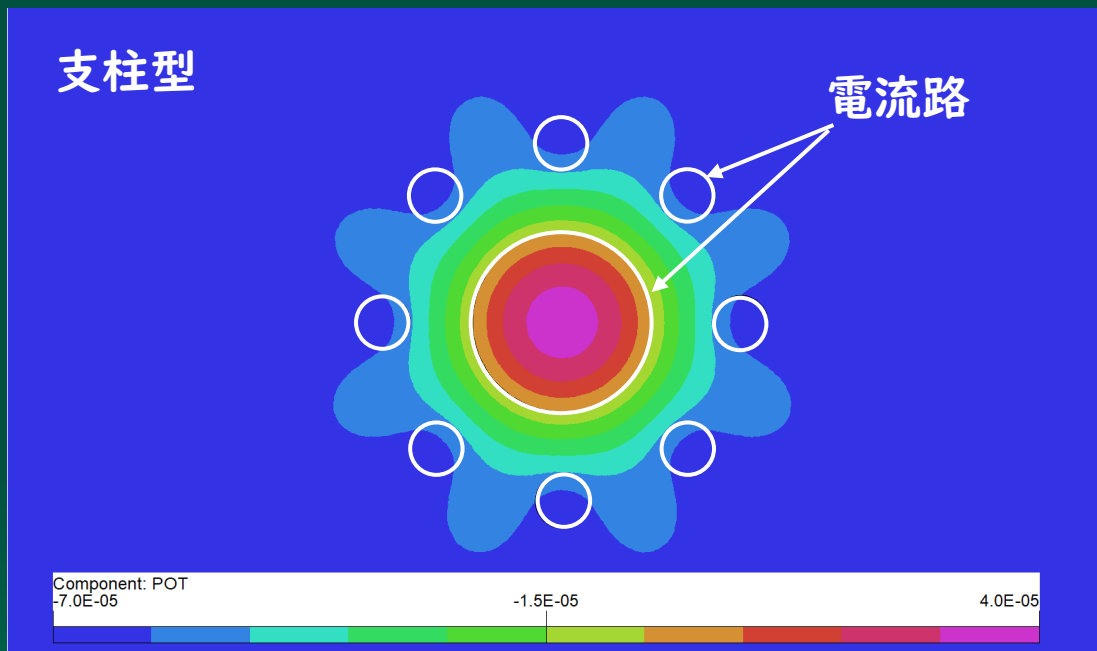
より高速な立ち上がり時間が欲しい → 電流路の構造改善で低インダクタンス化



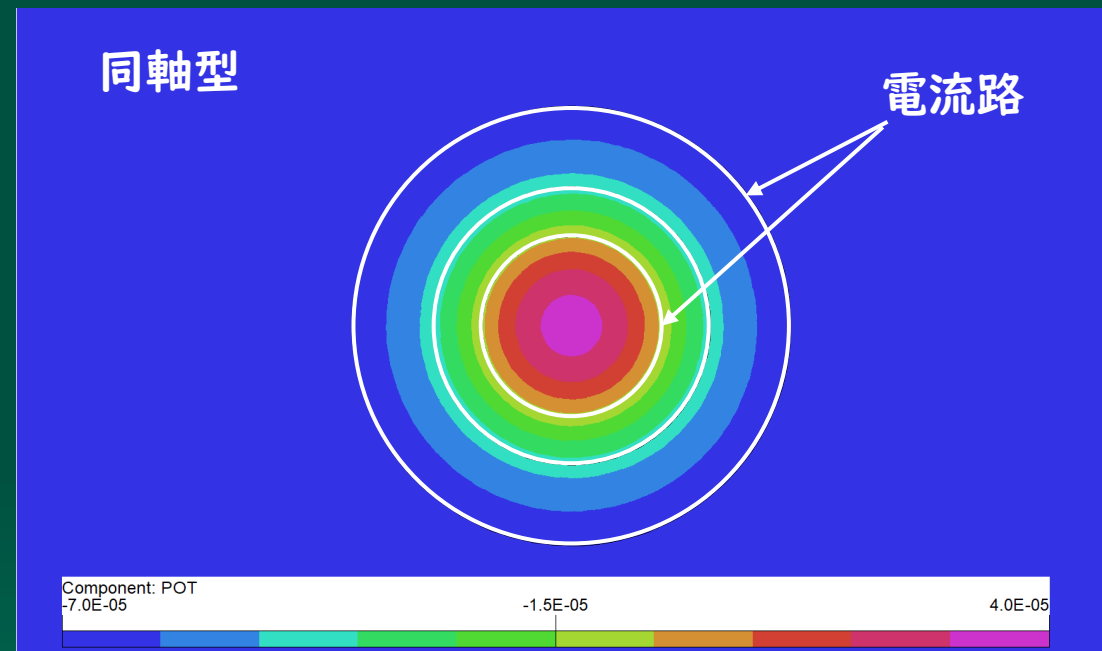
並列回路毎に電流路を取り合う

モジュール基板毎に電流路をまとめる

OPERA-2D解析 (static magnetic field)



Vector potential [Wb/m]



Vector potential [Wb/m]

OPERA-2D計算結果 (static magnetic field)

インダクタンス

$$L = \frac{2W_e}{I^2} \text{ [H/m]}$$

(I=400A)

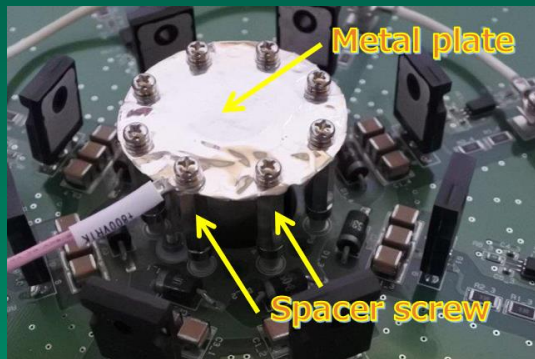
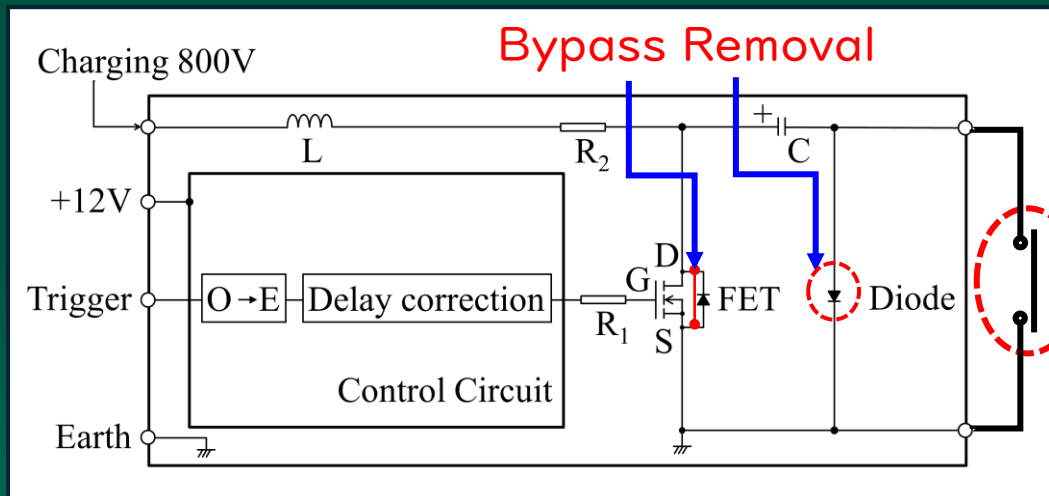
Item	支柱型	同軸型
W_e [mJ/m]	15.1	14.0
L [nH/m]	188.7	175.4

約7%減

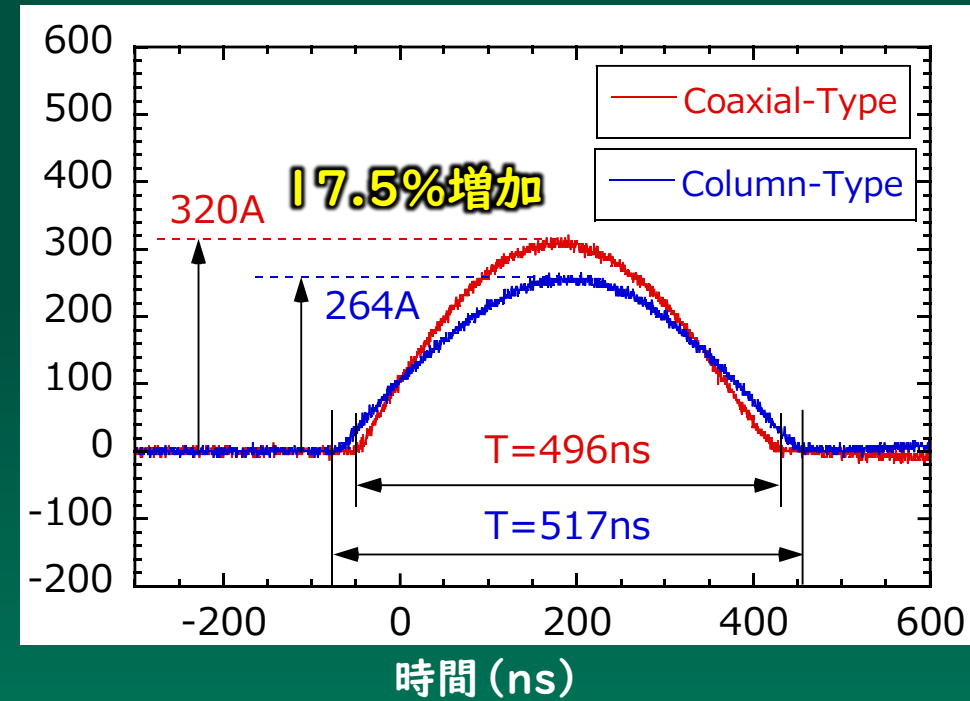
評価結果

電流経路構造のインダクタンス依存を評価

- FETスイッチをバイパス
- ダイオードを削除



ギャップスイッチ

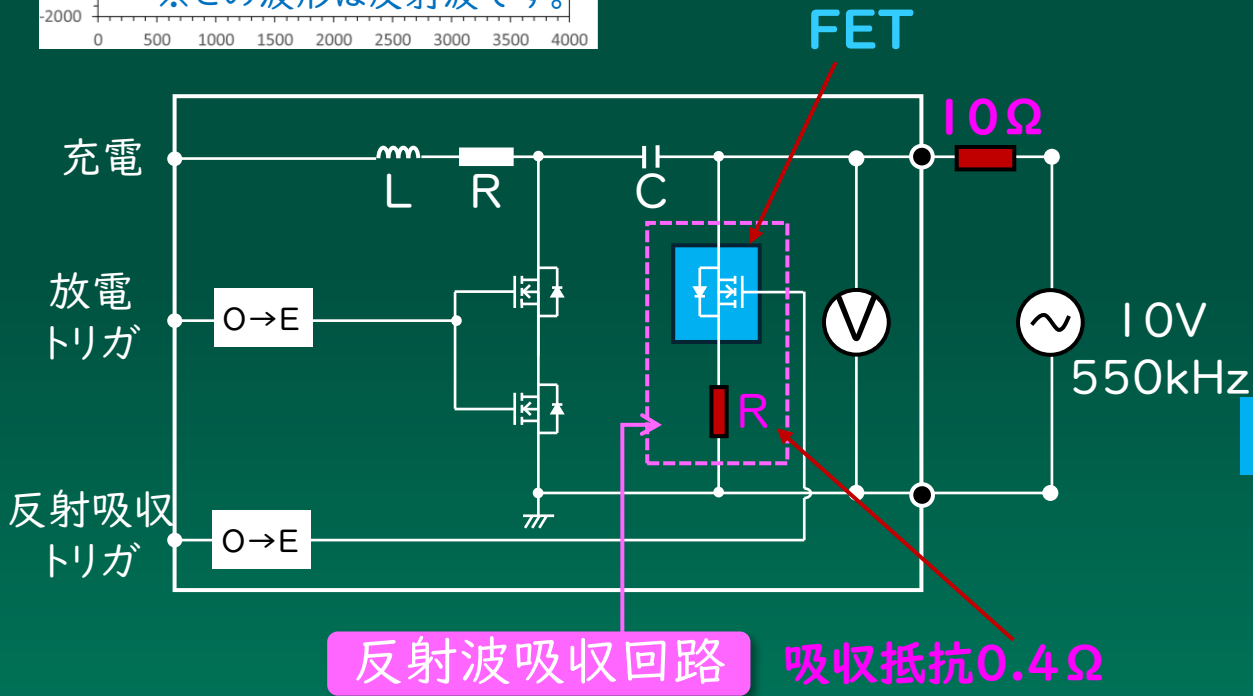
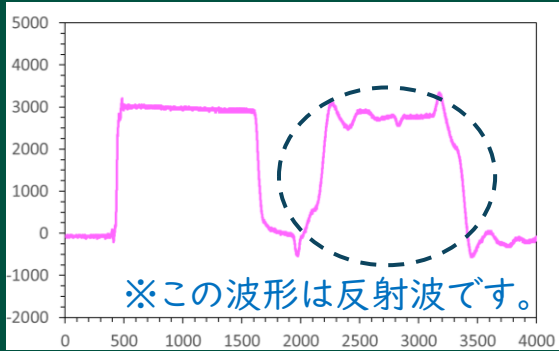


- 電流値が17.5%増加
- 解析結果 (7%)との違い
- ➡表皮効果を含めた動磁場解析の評価を検討

同軸型が有効であることを示した。

パルス反射波の処理

吸収回路と評価結果



- FET:ONにより反射波形を吸収
- SiC-MOSFETのオン抵抗は小さい

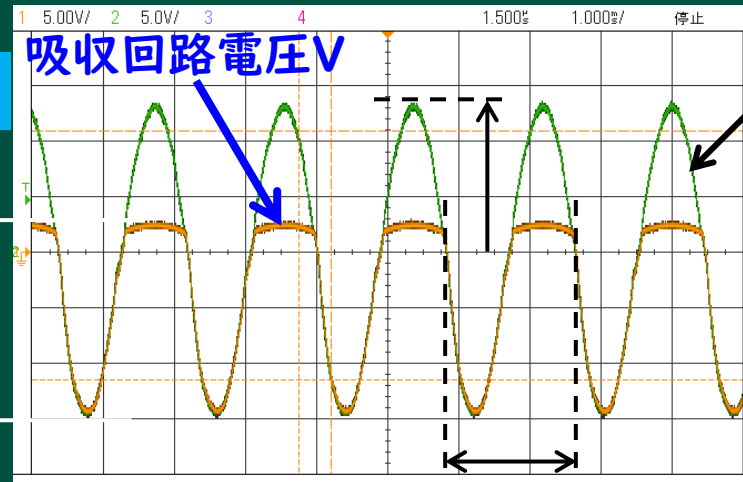
反射波を吸収できることを確認

➡ 周回ビームによる誘起電圧の吸収に使用可能
大強度ビームのインピーダンス問題を解決

FET:OFF

FET+R

約12V

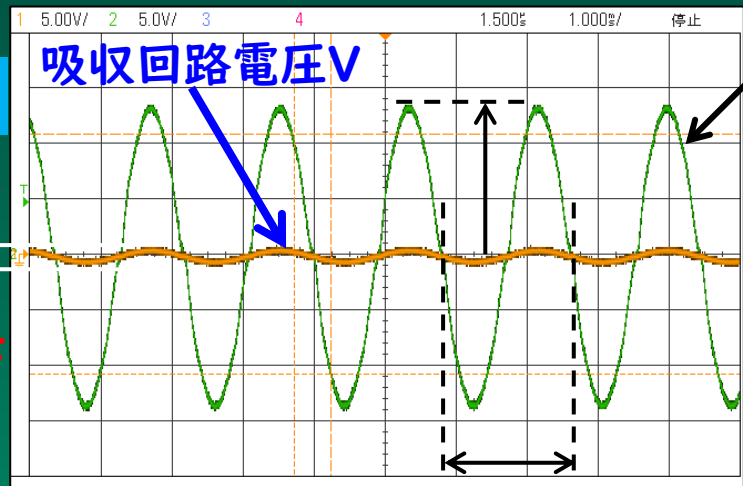


入力AC電圧
550kHz
10V

FET:ON

FET+R

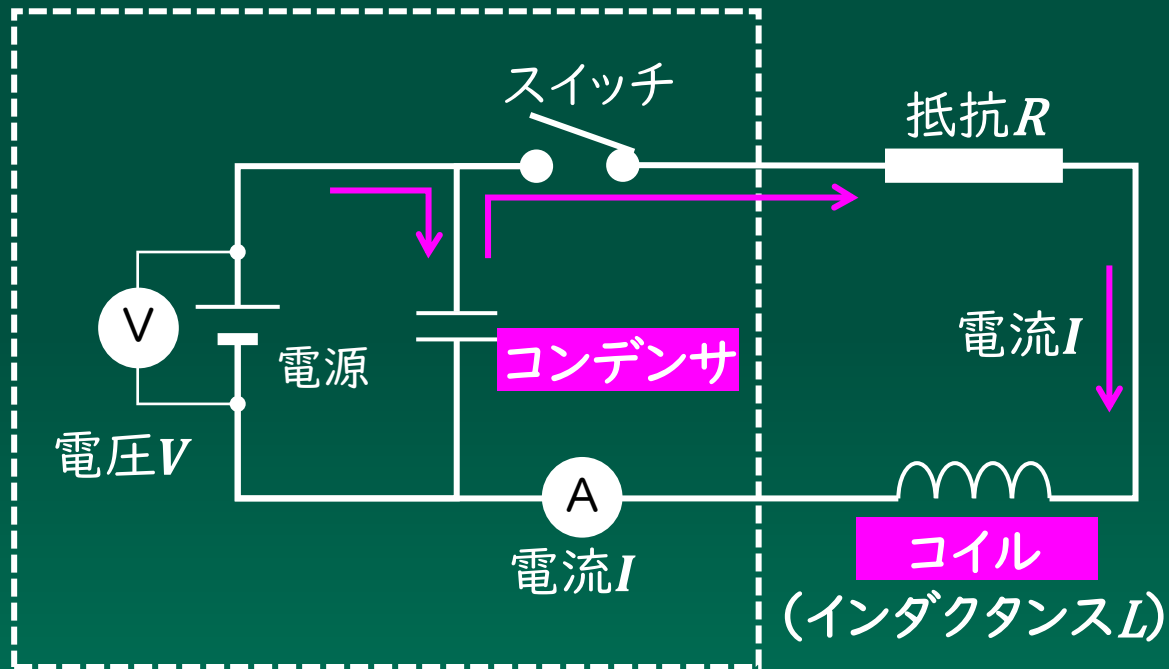
1.0V以下



入力AC電圧
550kHz
10V

波形精度

パルス回路

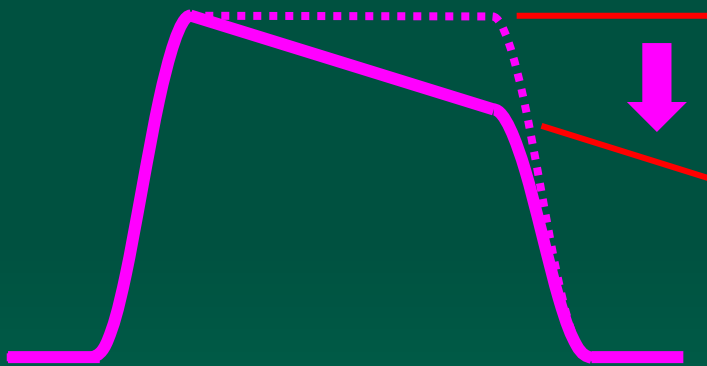


- ◆ エネルギーの蓄積
コンデンサに電荷を蓄える(充電)
- ◆ 瞬間的に大きなパワーを取り出す
スイッチを入れて電荷を放出する(放電)

$$V = L \frac{\Delta I}{\Delta t} + RI$$

理想とのズレ

平坦部 (フラットトップ部)

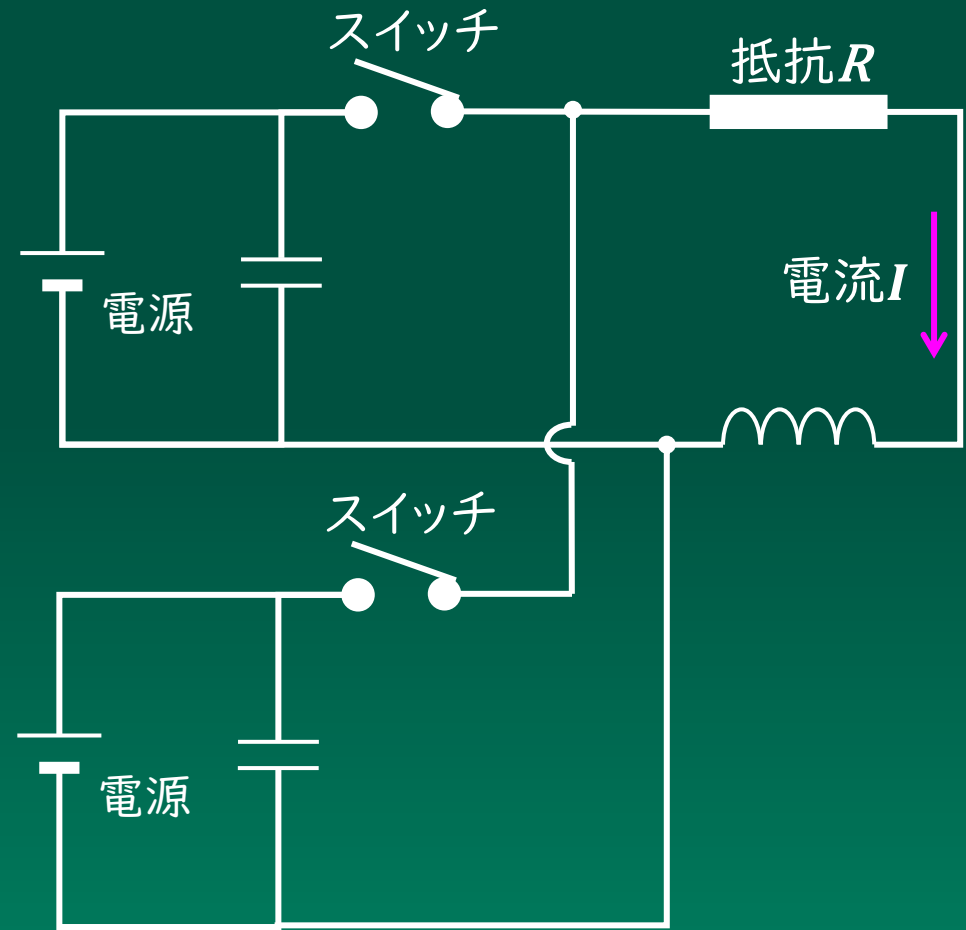


垂れ下がり
(droop、sag)

平坦部が垂れ下がる

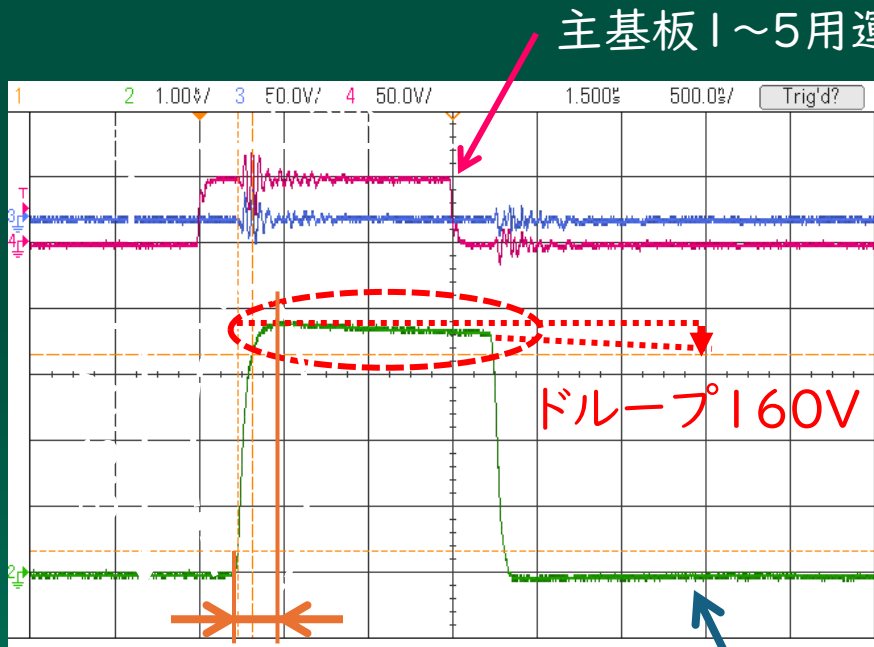


大きいコンデンサを使用すれば
垂れの程度を小さくできる。



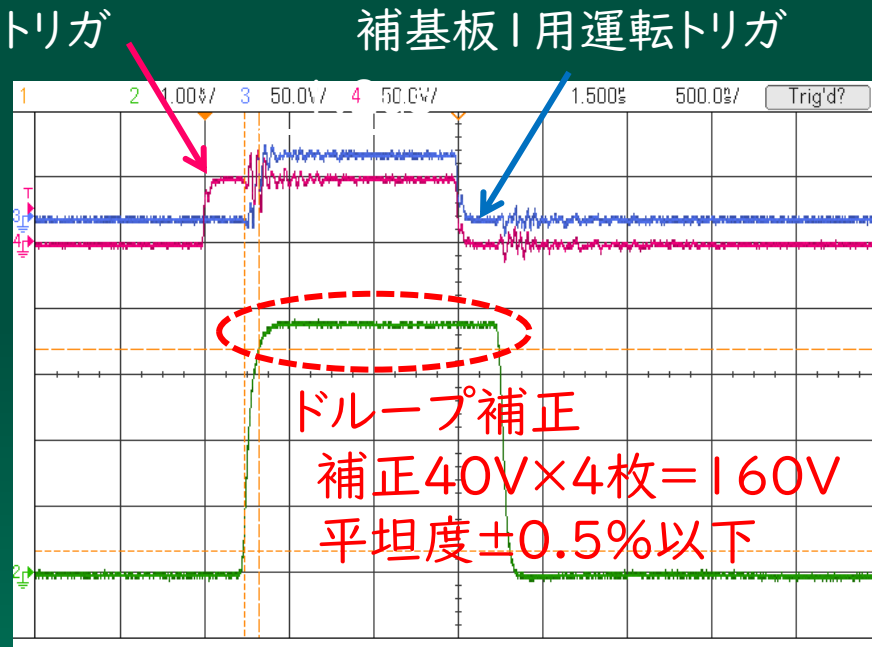
補正回路追加

ドループ補正の評価結果



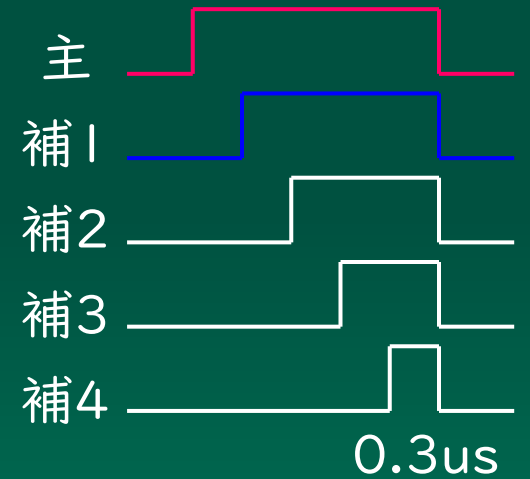
【補正前出力電圧波形】

主基板1~5



【補正後出力電圧波形】

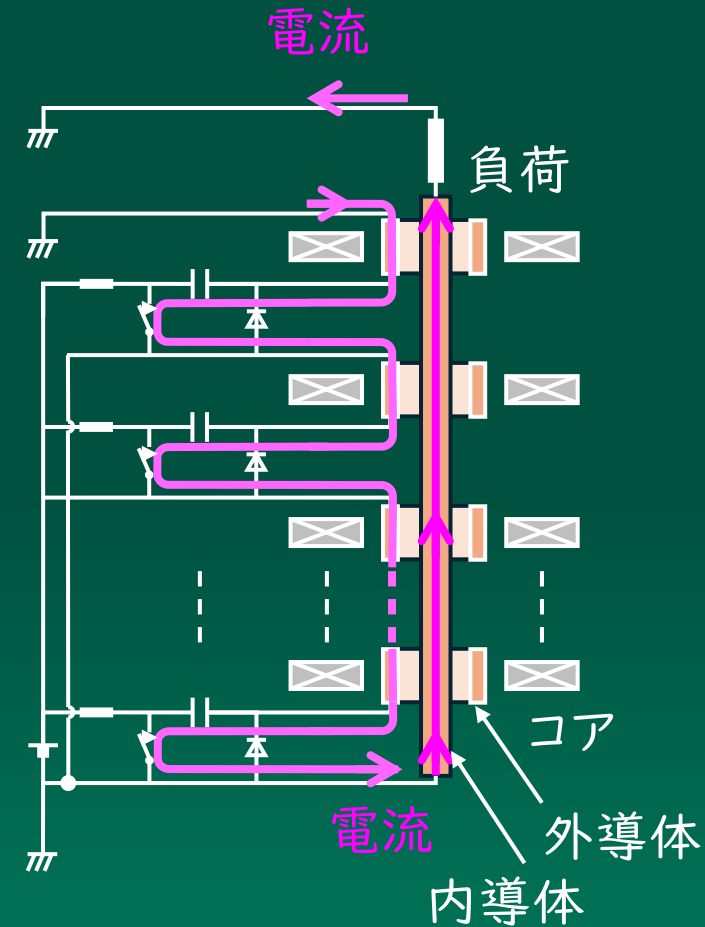
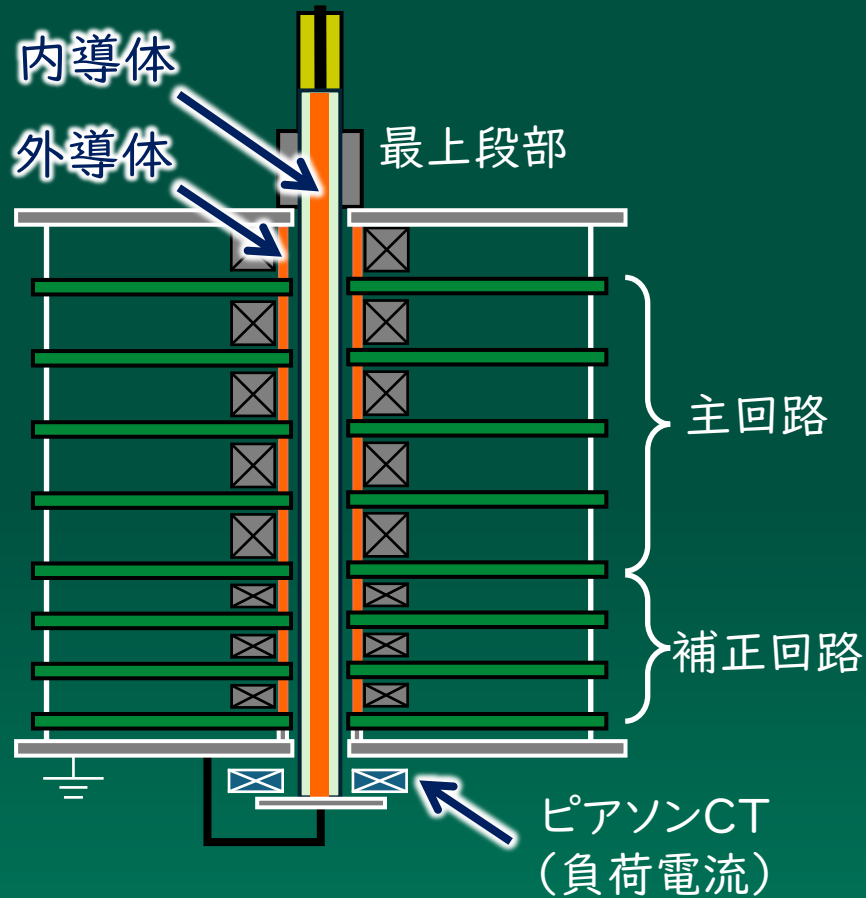
主基板1~5、補基板1~4



補正基板でドループ補正が可能

高電圧の出力回路

直列多重化回路 (LTD方式)



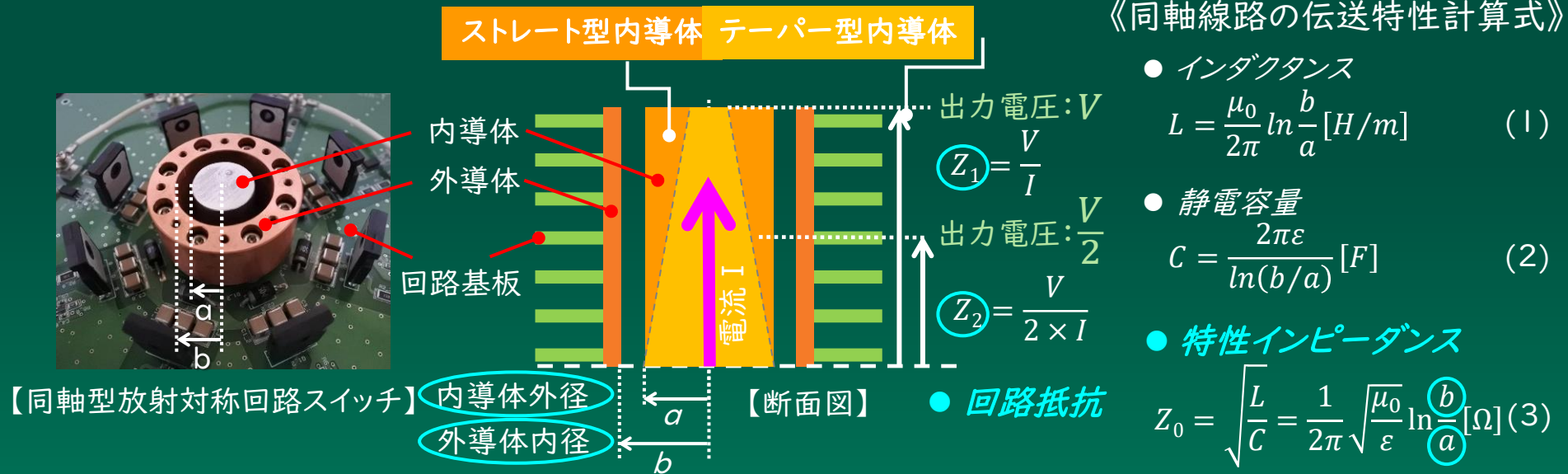
- 直列多段接続で電圧を誘導的に合成 (=モジュール基板の積層)
無限に高い電圧出力が原理的に可能
- 物理的な銅バーやケーブルで接続しないため浮遊容量の影響が小さい

直列多重化回路の問題

インピーダンスのミスマッチング

高電圧化に伴い電流伝送路が長尺化 ➡ 放射対称型回路だけでは解決できない問題が発生

- ① 電流伝送路の内導体と外導体のインピーダンスミスマッチによる波形歪み
- ② 耐電圧性（絶縁性能）と放電抑制の両立の困難化



ストレート型内導体 ⇒ インピーダンスミスマッチ

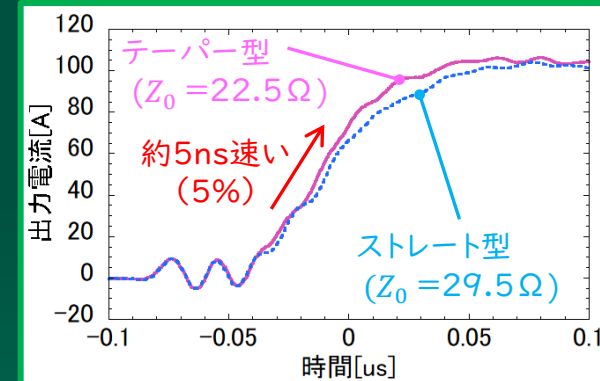
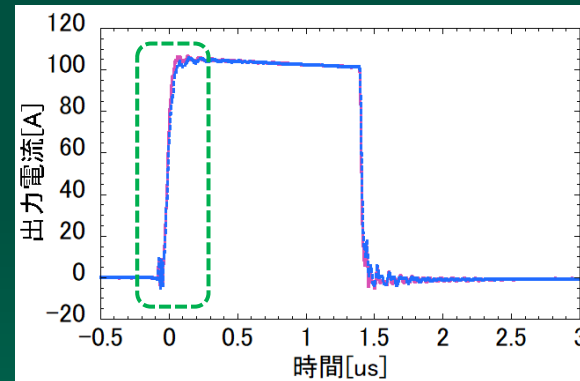
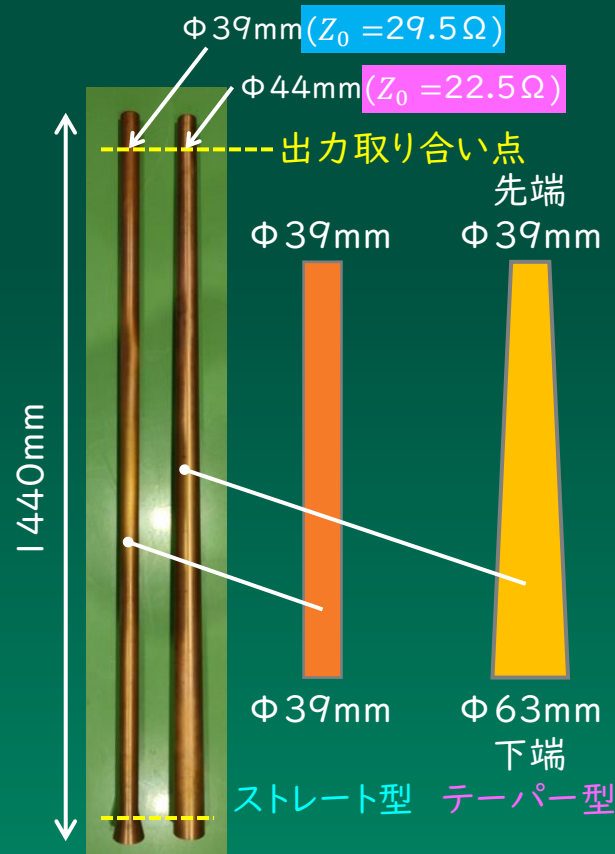
回路抵抗 Z_x (積層段数: 電圧に依存) ≠ 特性インピーダンス Z_0 (内導体と外導体の径に依存)

テーパ型内導体 ⇒ 回路基板の枚数 (出力電圧) に合わせて導体径を最適化できる

➡ 伝送路が長尺化しても全域でインピーダンスのマッチングが可能!

インピーダンスマッチングのパルス波形評価

- 導体内の電位差由来のインピーダンスミスマッチの確認
- 出力波形への影響と導体形状による解消可否について



【内導体形状違いによる出力波形立ち上がり時間比較】
条件：負荷抵抗 22.5Ω = テーパー型とマッチング

テーパー型が約5ns速くなった。

※波形歪に明確な差が見られない。抵抗値の差が小さかった可能性有。

➡ マッチングの効果を確認!

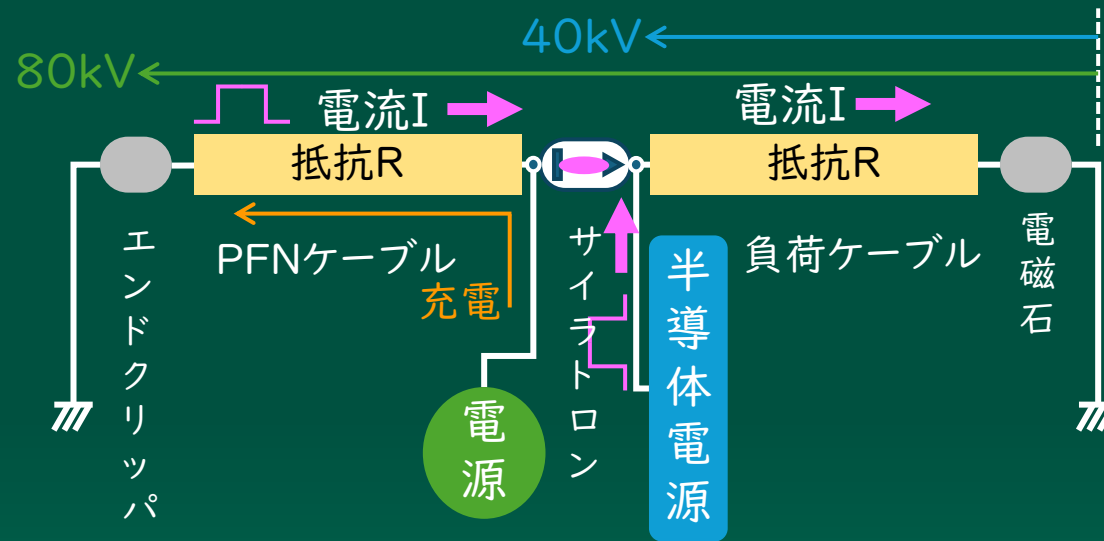
半導体化の利点

出力電圧の低減



【PFNケーブルドラム】

- 同軸ケーブル110m
- エネルギー蓄電・パルス出力用



【キッカーシステム概念図】

回路抵抗: $R + R = 2R$
(特性インピーダンス)

電源電圧: $I \times 2R = 2V$

↓
80kV

半導体電源化でPFN回路(ケーブルドラム)が無くなる。

⇒ 回路全体の抵抗 $2R$ が半減する → R

⇒ 必要な電流 I は変わらないので電圧は半分でよい。

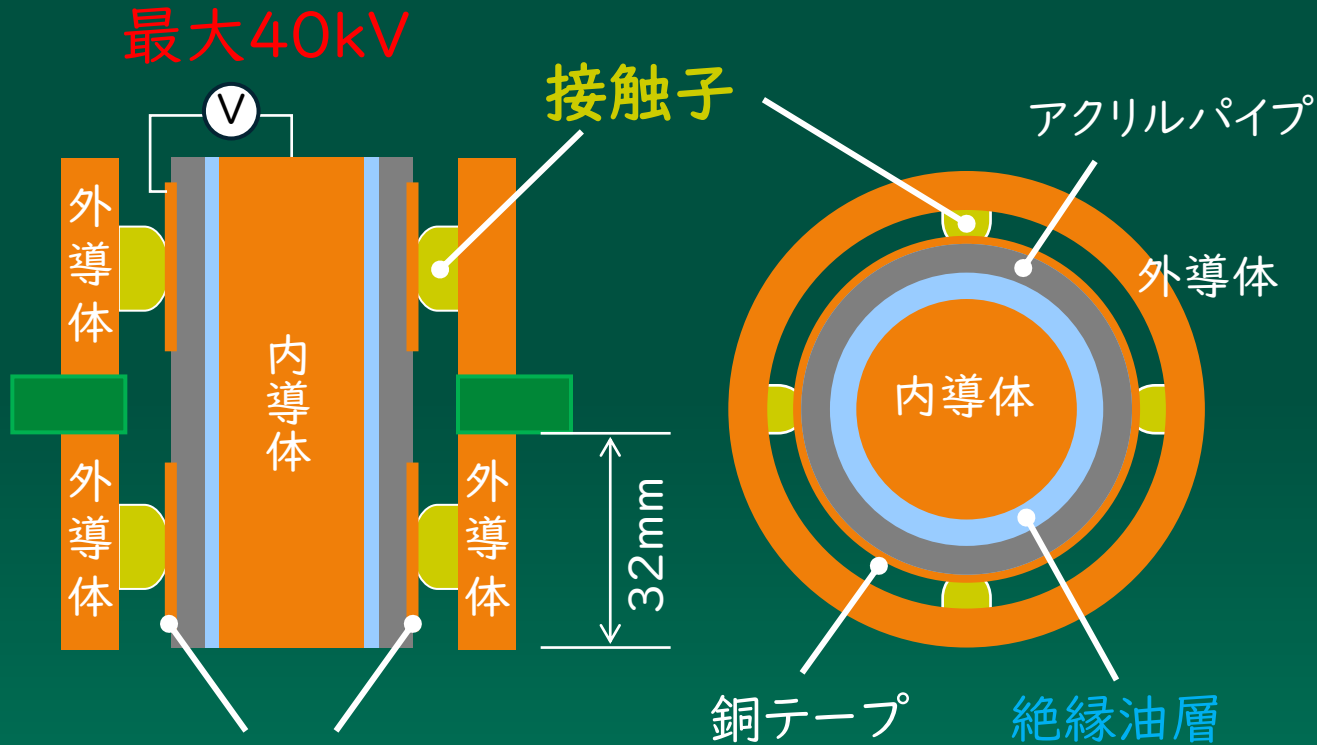
$I \times R = V \rightarrow 40kV$ 半導体電源の電圧は現在の80kVの半分でOK。

- ◆ ケーブル末端部で発生する放電事象は主に80kV部で発生。
- ◆ 出力電圧の半減により故障のリスク低減が期待できる。



直面した困難

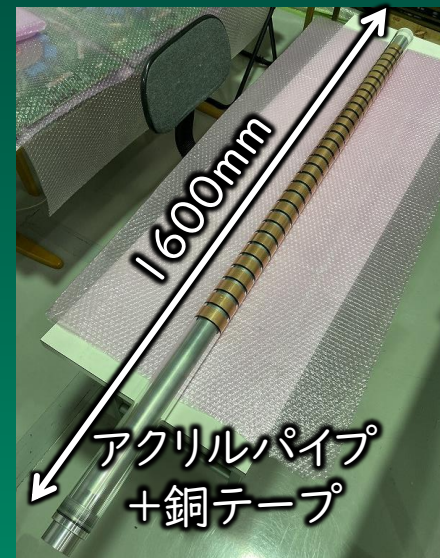
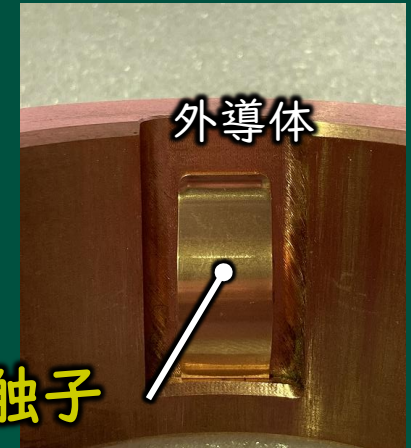
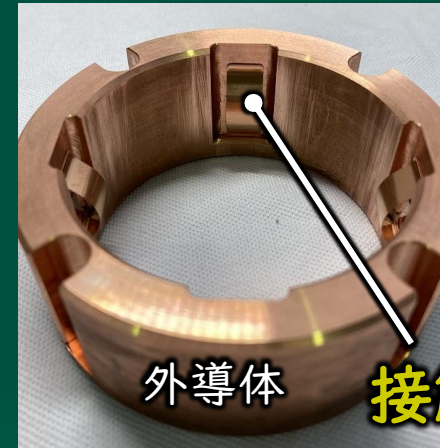
コロナ放電



パイプ表面に銅テープ
(幅25mm,厚0.07mm)

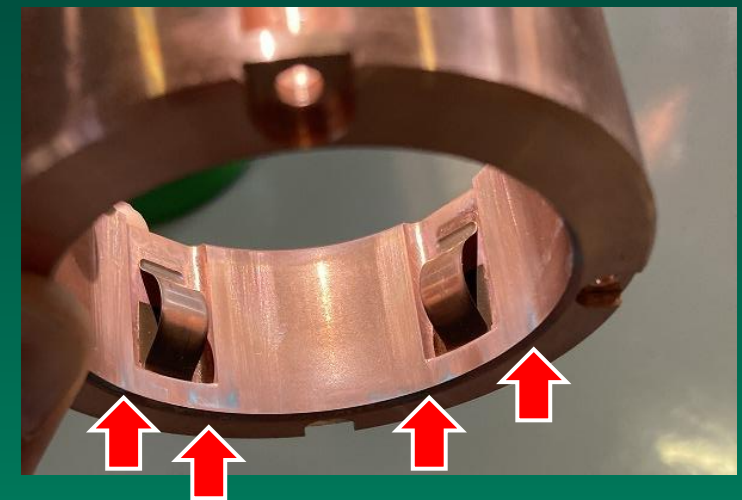
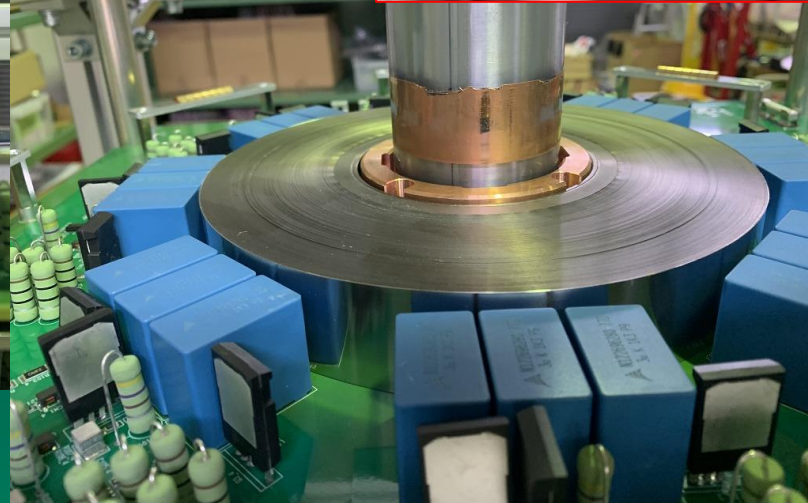
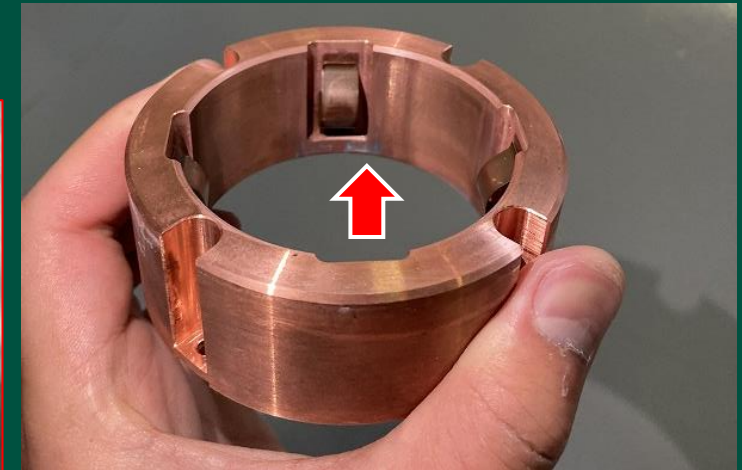
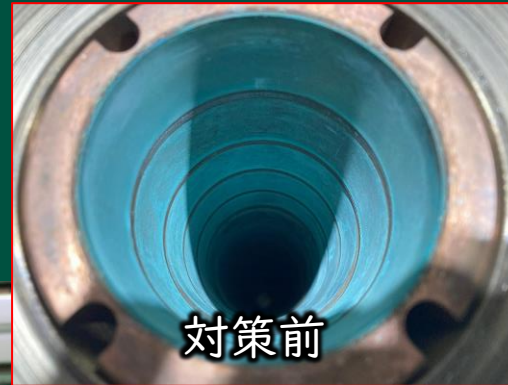
「液体+固体」絶縁

空気層を無くす
⇒ コロナ発生領域の削除



【伝送導体の縦横断面図】

連続運転後（8時間×3セット）

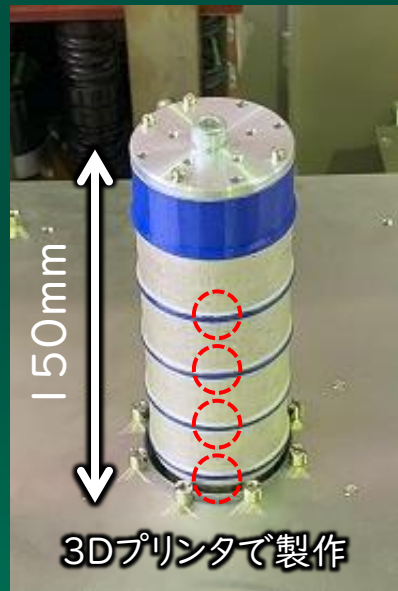
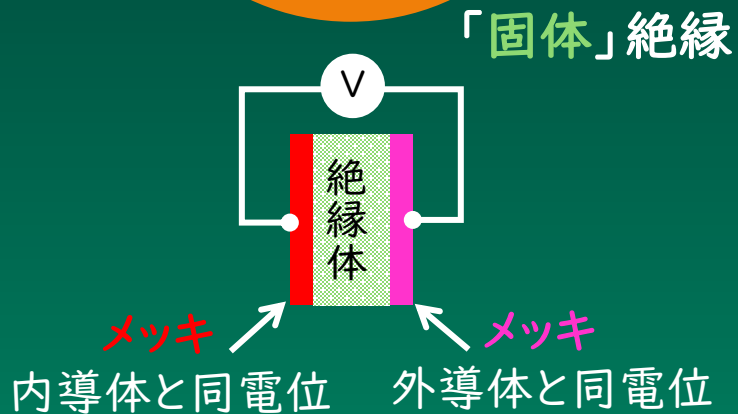
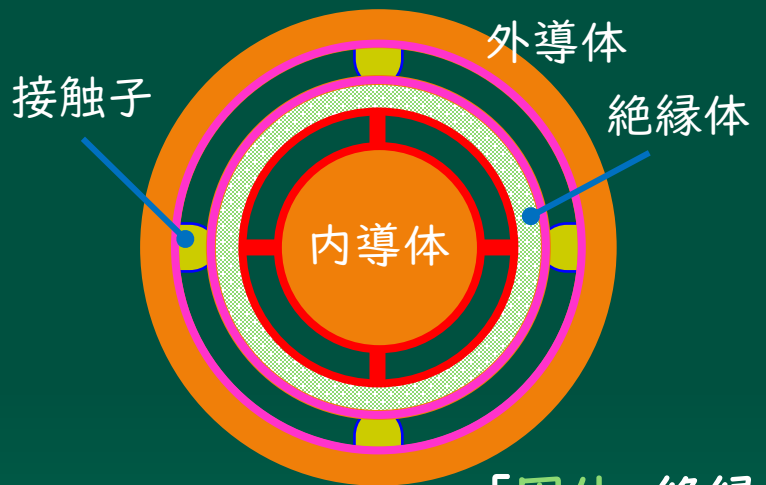


【運転後に最上段の基板を外した状態】

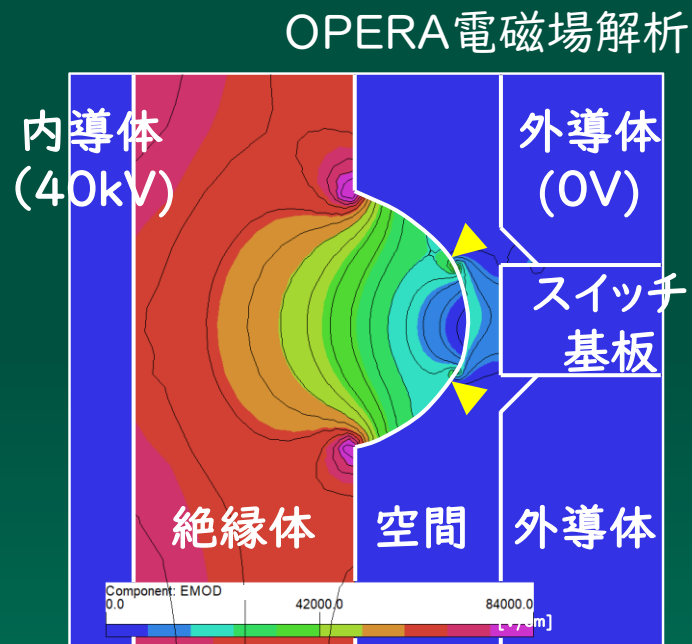
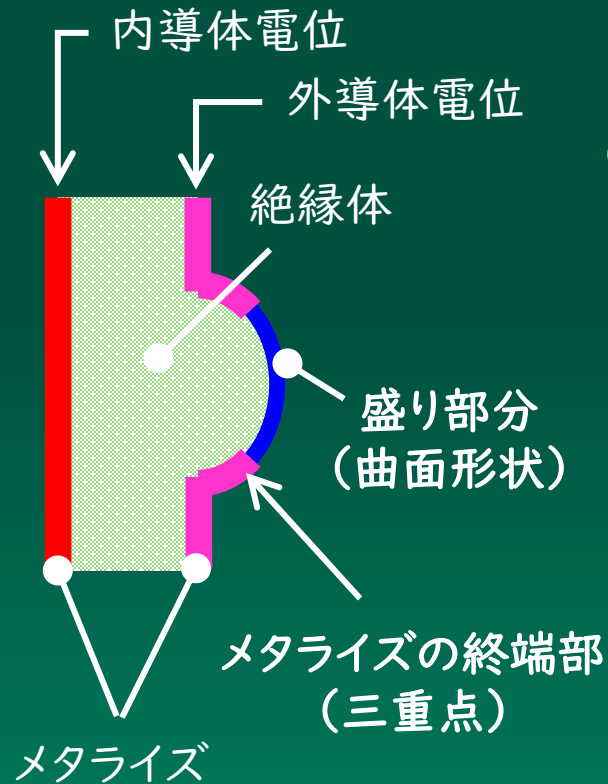
24時間通電後（8時間×3セット）
外導体（銅リング）の内面にわずかな緑青を確認
⇒コロナ放電がまだ発生している

絶縁油に頼らない絶縁（サステナブル化）

「導体-絶縁体-気体」の三重点の強電界部を、絶縁体のメタライズ加工と形状の最適化により緩和



電位固定型絶縁筒
(PPJ中田氏)

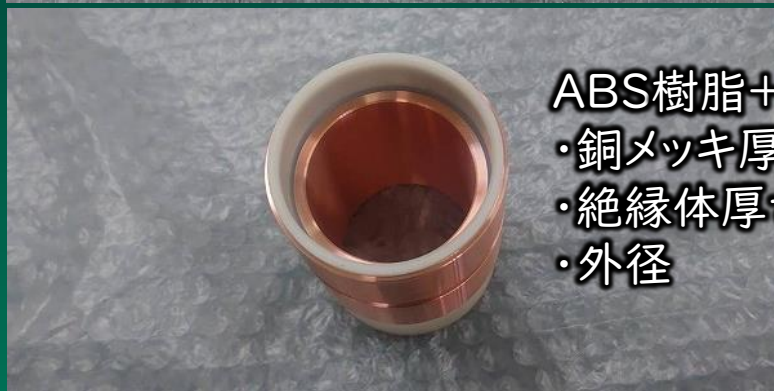


絶縁体境界付近
(▲メタライズ端)
表面 30kV/cm

- 三重点の電界強度が空気の絶縁耐力（コロナ臨界値）の30kV/cm以下を実現。
- 電位固定に必要なメッキ処理の管理が難しい（手塗り、メッキが付きにくいなど）。
- 曲面形状と銅リング接触子の構造取り合い（筒を通すため）が厳しい。

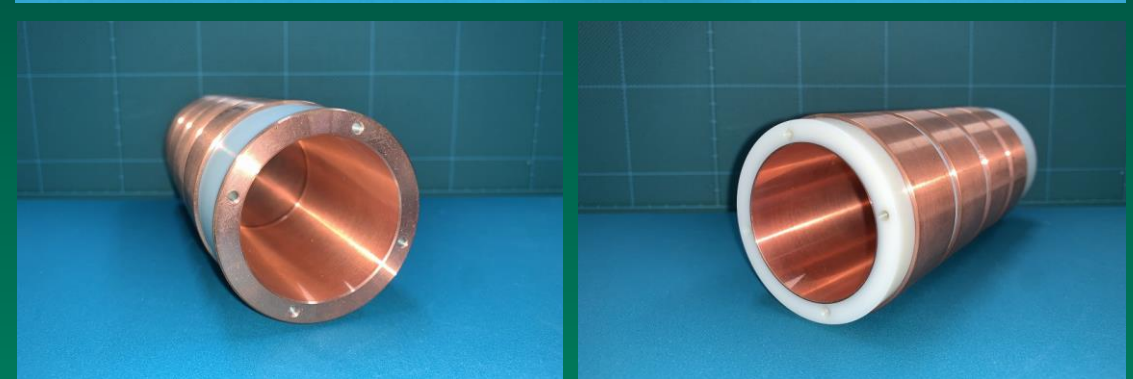
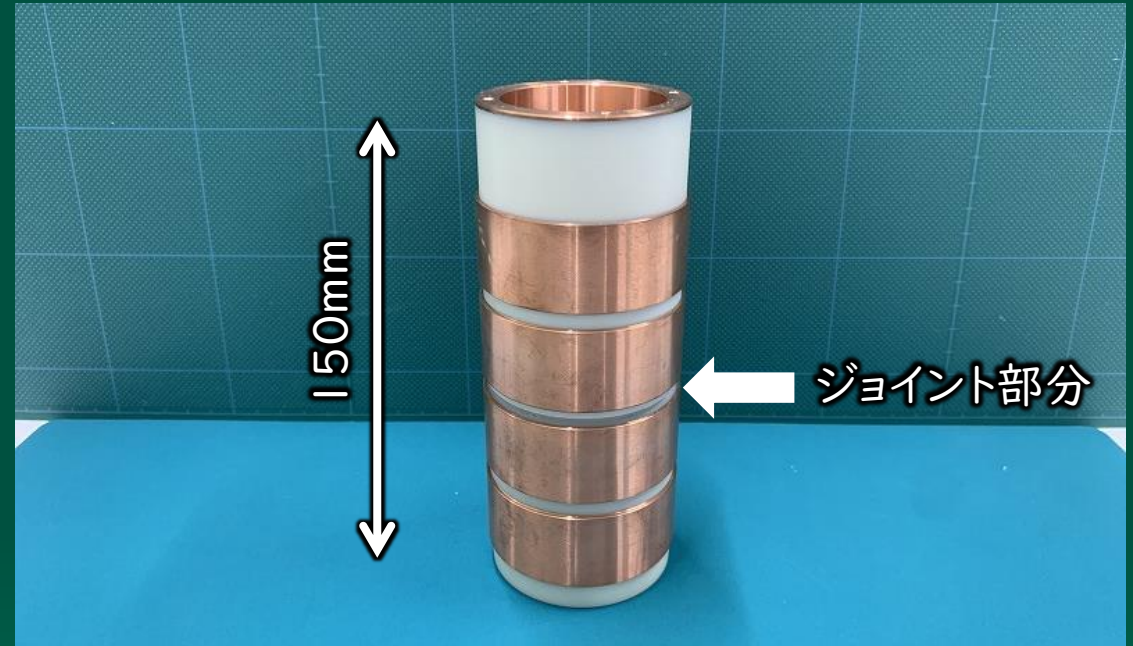
長尺型絶縁筒の製作

製作:旭金属工業株式会社



ABS樹脂+銅メッキ
・銅メッキ厚 :1.25mm
・絶縁体厚さ :7mm
・外径 :φ62mm

ジョイント方式

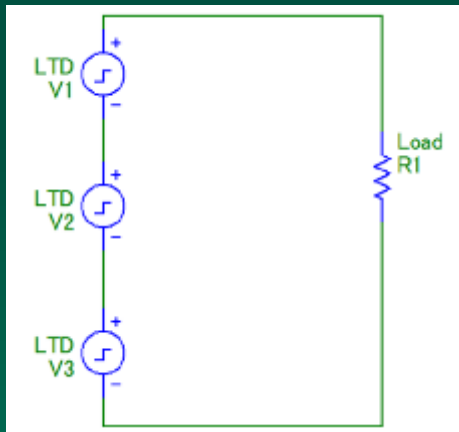


- 短尺のユニットで連結が可能であることを確認。原理的に長尺限界が無い。
- 絶縁体の曲面形状は困難であるため、絶縁筒の厚みを増して耐コロナ性を高める。
- 銅メッキ厚が1.25mmと厚く内導体として使用できる。導体筒の削減が可能。

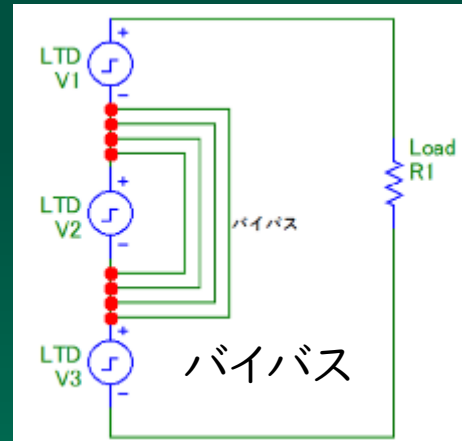
実機で生きる設計

バイパス回路の設計

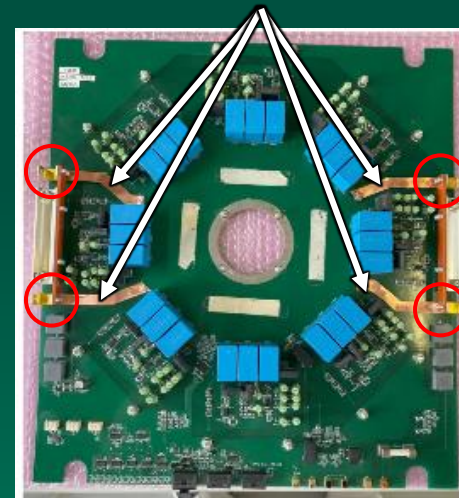
基板故障 ⇒ 交換作業に多くの時間を費やさず短時間での復旧を可能とする。



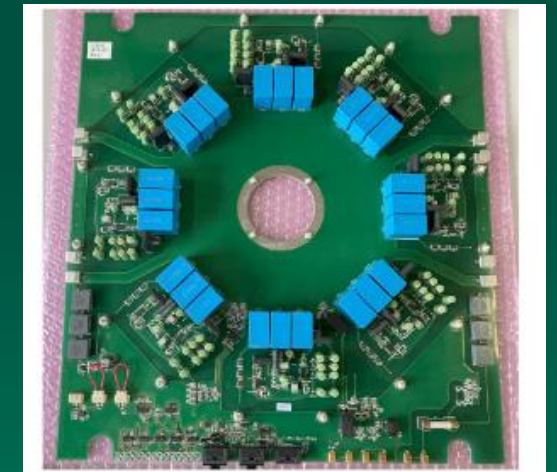
【設計回路】



追加したバイパス回路



【プロトタイプ】



【製品版】

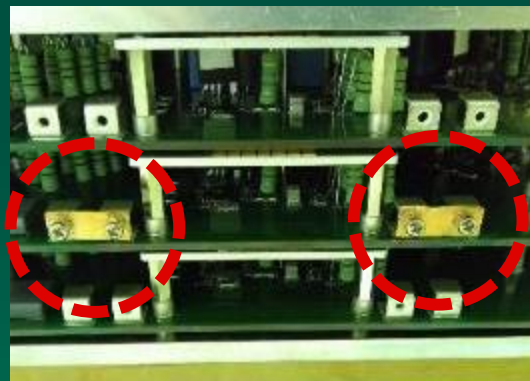
【主回路基板】

バイパス回路の影響評価



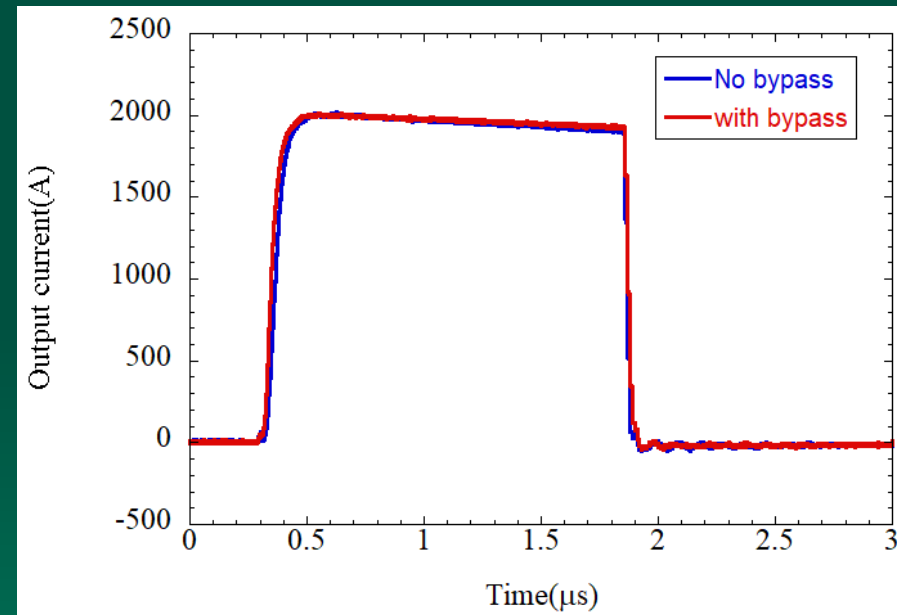
【バイパス無し】

主回路基板3枚使用
真ん中の1枚をバイパス



※銅板をねじ止め

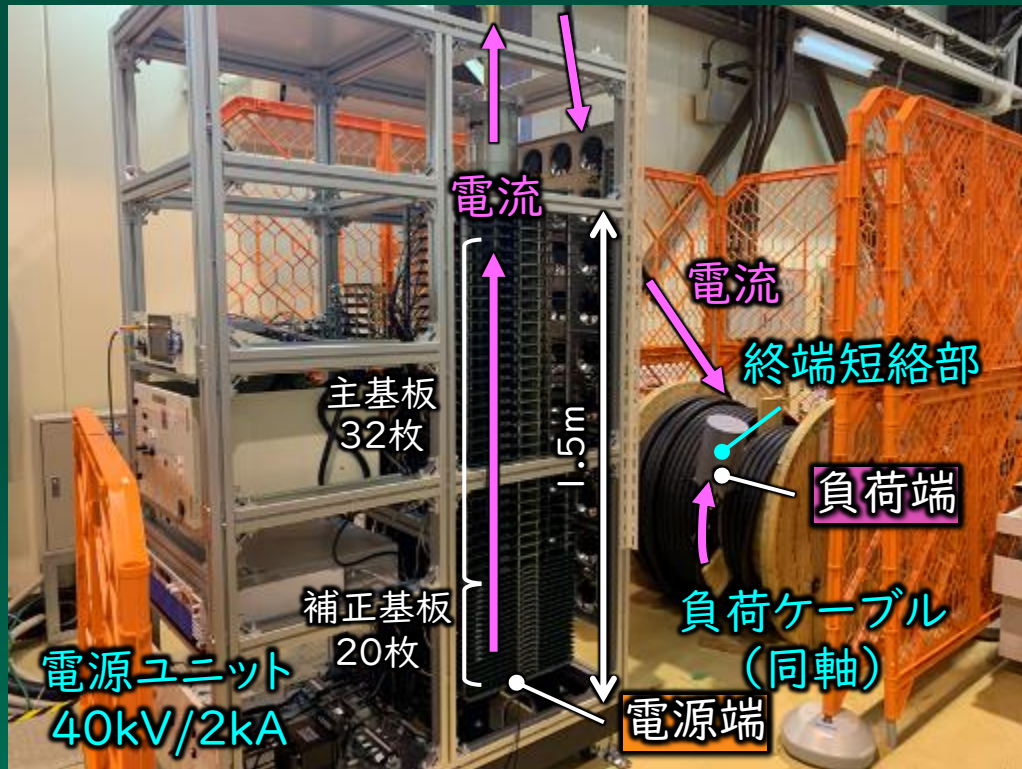
【バイパス有り】



- 出力波形にバイパス有り無しによる有意な差は見られない。
- バイパス回路(銅板)の温度上昇は $\Delta t = 6^{\circ}\text{C}$ (8時間通電後)

RCSキッカー電磁石用 半導体パルス電源ユニットの完成

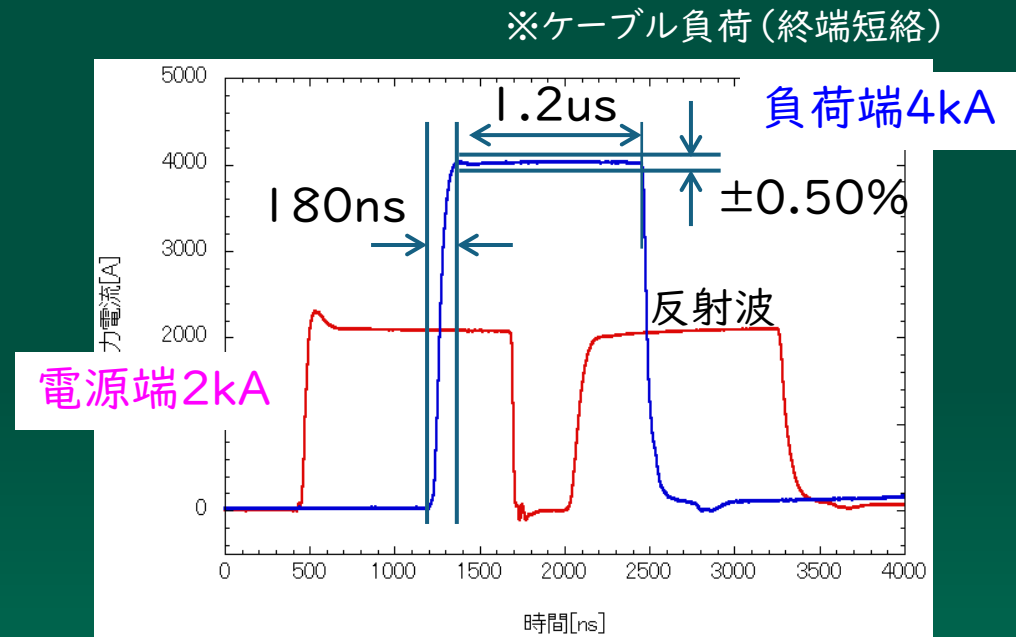
キッカー電磁石用の新しいパルス電源



【半導体パルス電源ユニット】

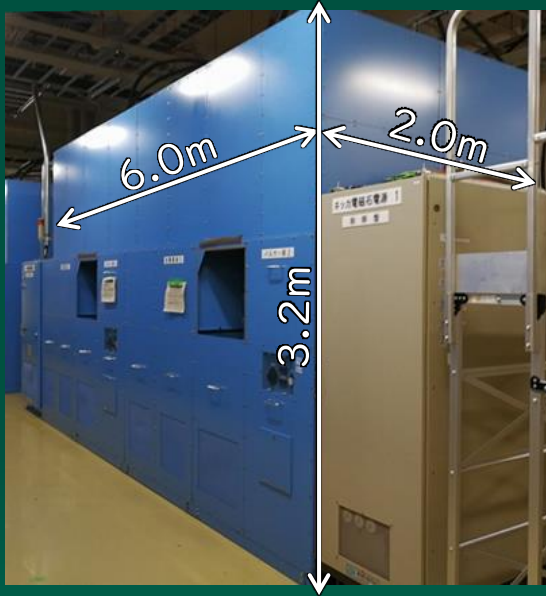
主回路:32枚、補正回路:20枚
定格出力:40kA/2kA/1.2us/25Hz

- キッカーシステムの要求仕様を満たすことを確認。
- 次世代パワー半導体を用いて、小型化・省電力化が実現できることを確認。



【出力電流測定結果】

現電源と新電源の比較



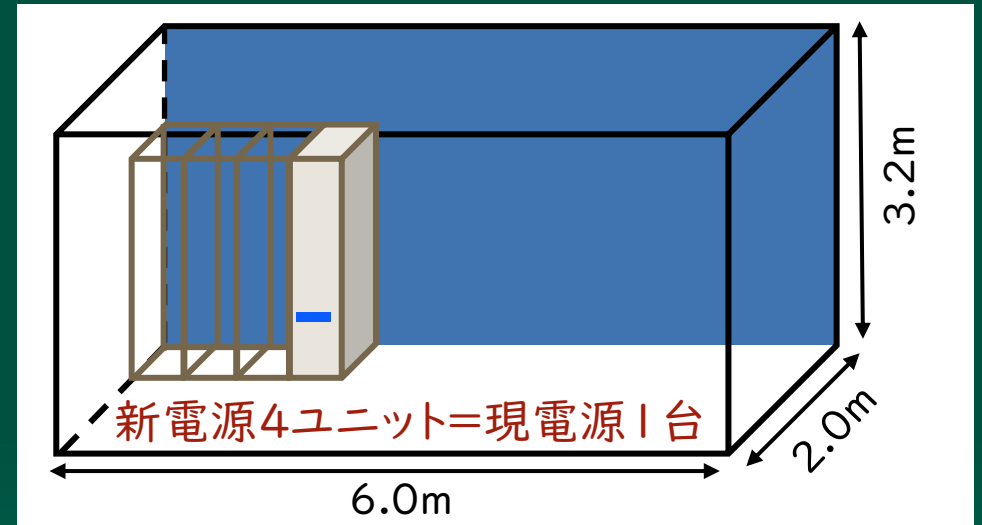
【現キッカー電源(1台:双子型)】

80kV/4kA/25Hz/1.0us



【新キッカー電源(1ユニット)】

40kV/2kA/25Hz/1.2us



項目	現電源	新電源
幅	6.0m	2.2m
奥行き	2.0m	0.75m
高さ	3.2m	2.0m

◆ 新キッカー電源の特徴

☆低損失: **使用電力25%減**

(利用運転パラメータ: 60kV/25Hz)

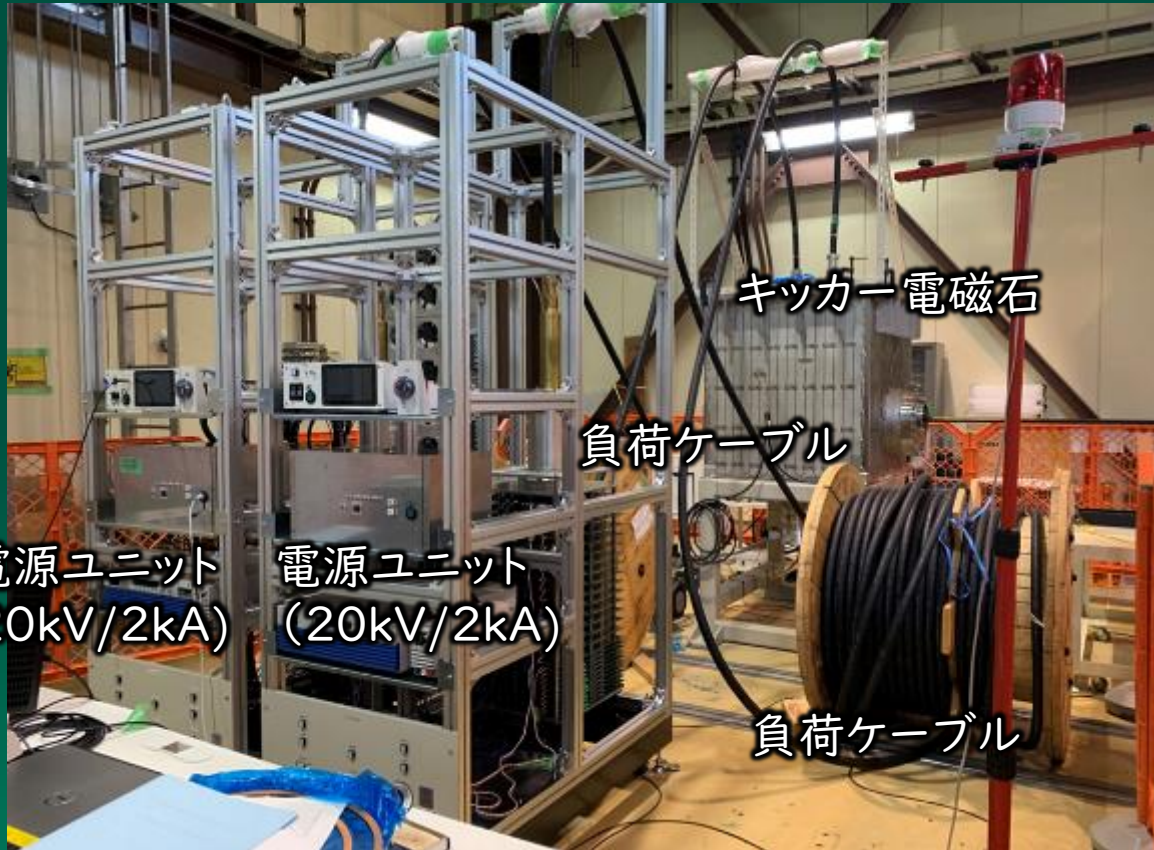
9.87kW(1台:双子型) ⇒ 7.43kW(新電源4ユニット分)

☆非常にコンパクト: **体積比91%減**

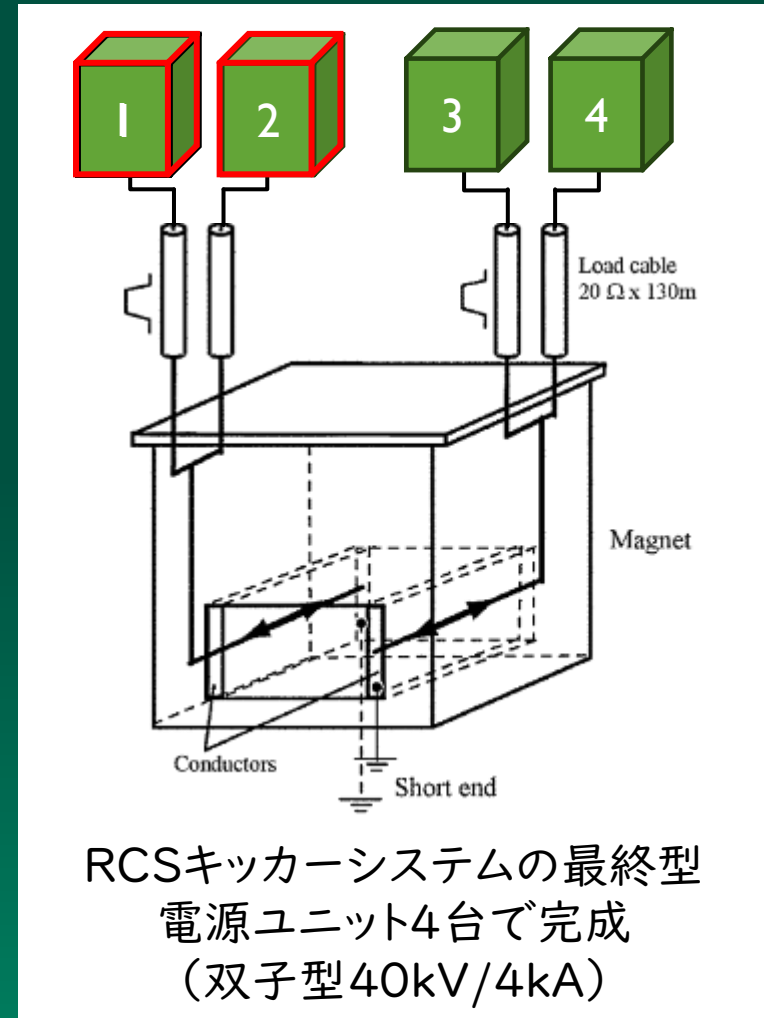
☆冷却水を使用しない

半導体化により小型化に。さらに、電力損失を低減し省電力化も実現!

現在の状況と今後の予定



【実負荷試験の様子】



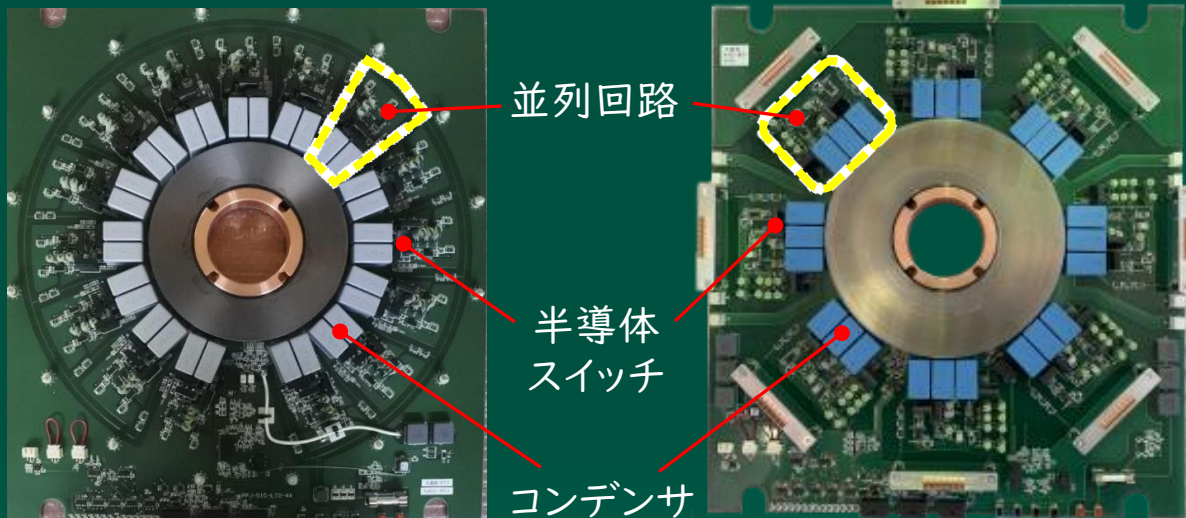
RCSキッカーシステムの最終型
電源ユニット4台で完成
(双子型40kV/4kA)

□ 電源ユニット2台で実負荷試験を実施。

□ 2年以内に4台の電源ユニットを製作し、既設電源とリプレースする予定(したい) 61

今後の展望・期待

次世代パワー半導体の性能アップ

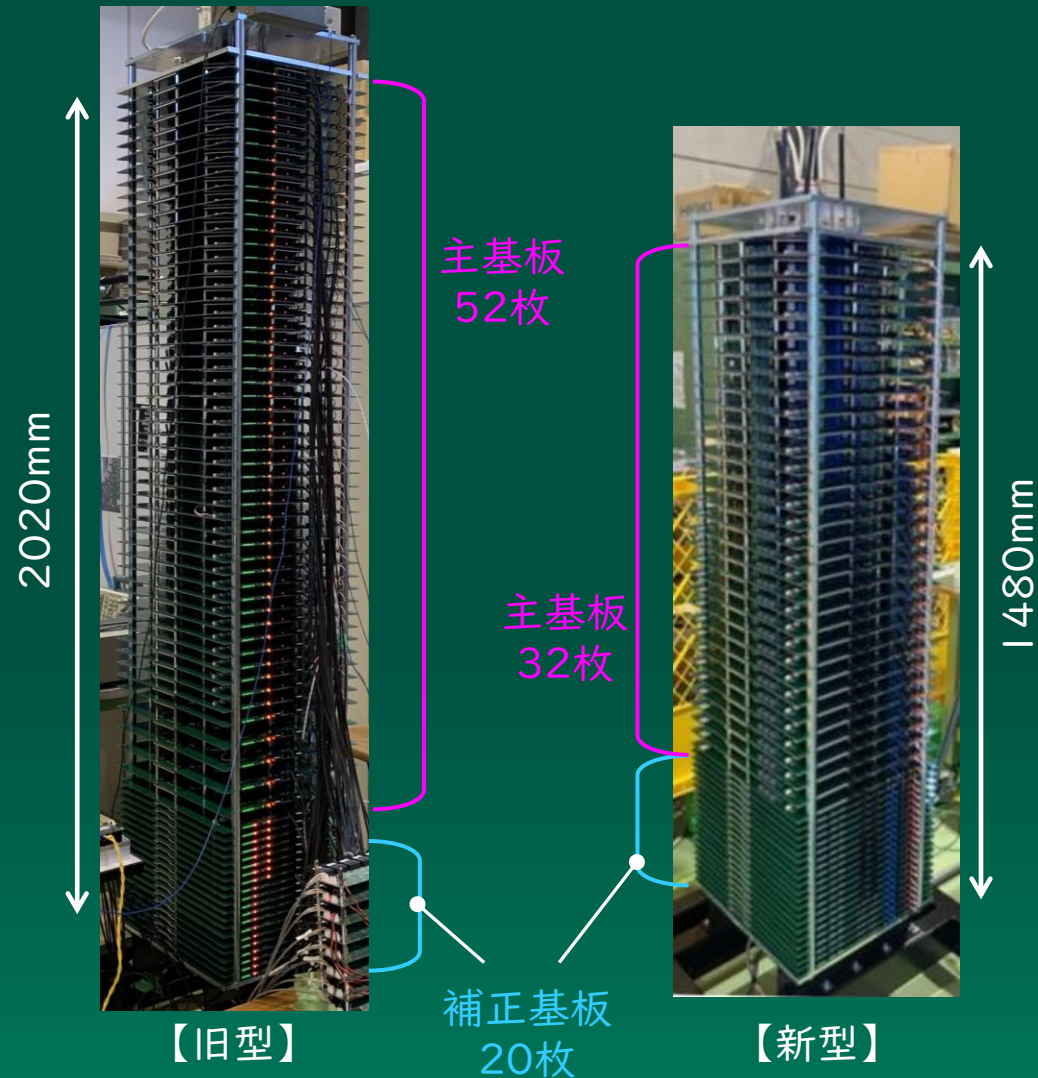


【旧型】

【新型】

【放射対称型LTD回路新旧モジュール基板】

項目	従来型	新型
製造メーカー	ROHM	CREE
V_{DS} (V)	1200	1700
素子評価耐電流 (A)	180	250
並列回路数	15	8



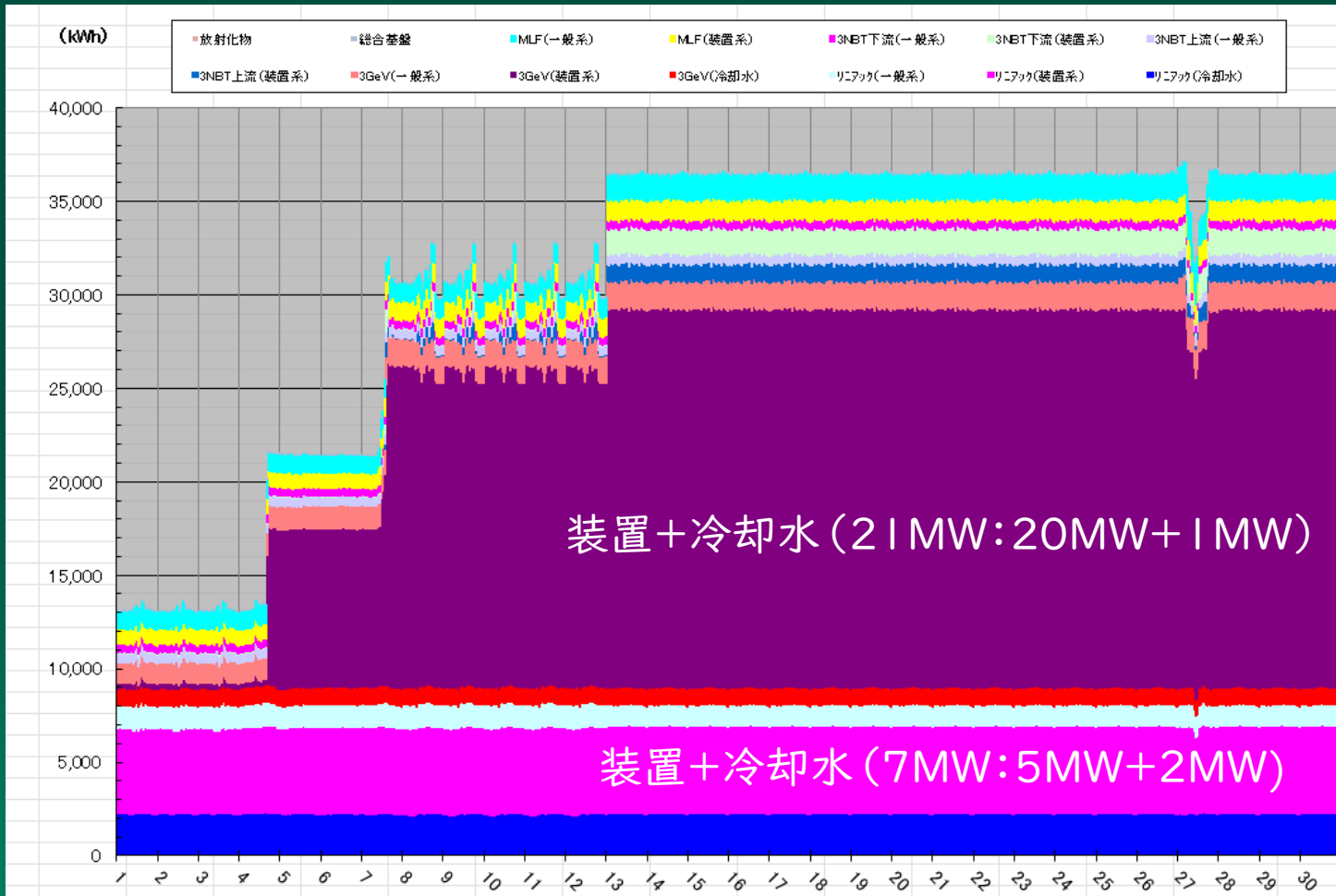
項目	出力仕様(40kV/2kA)	
半導体デバイス数(個)	2340 → 768	(-1572)
主回路基板数(枚)	52 → 32	(-20)
ユニット電源高さ(mm)	2020 → 1480	(-540)

電源回路のさらなる小型化・省エネ化が期待できる。

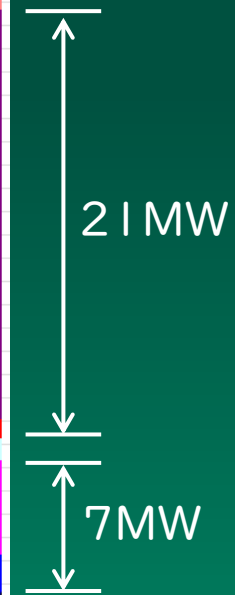
電気代が高騰しています。

使用電力量

J-PARC (リニアック、RCS、3NBT) 電力予測 (11月分)



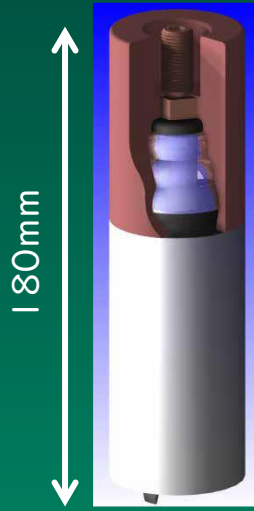
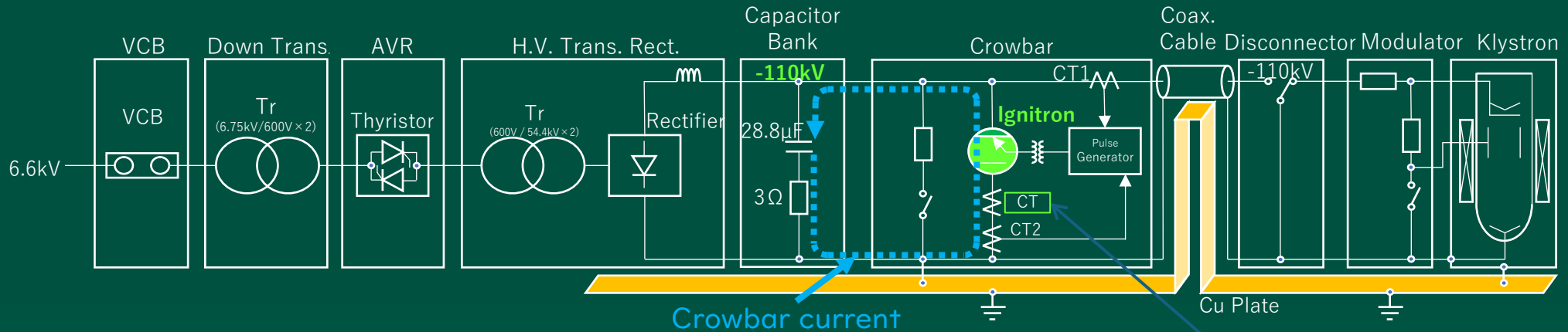
36.5MW
約1800万円/日



リニアックとRCS
1350万円/日

加速器で使用する全部の電源を
次世代パワー半導体の電源に変えたら？

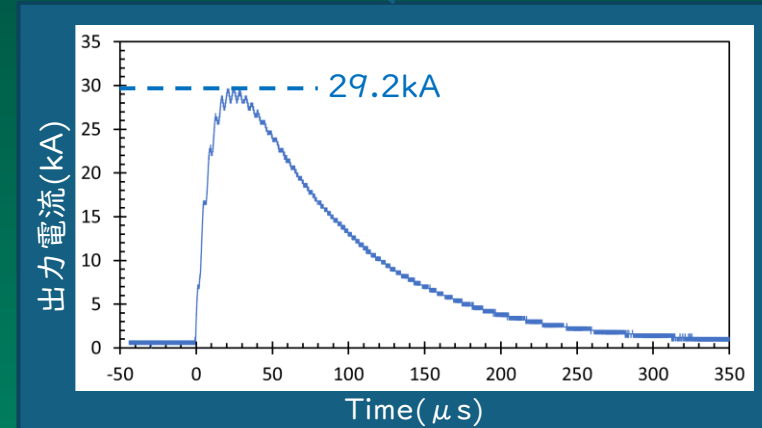
クローバー装置用 イグナイトロン代替スイッチの開発



NL7703EHV
(NATIONAL ELECTRONICS)

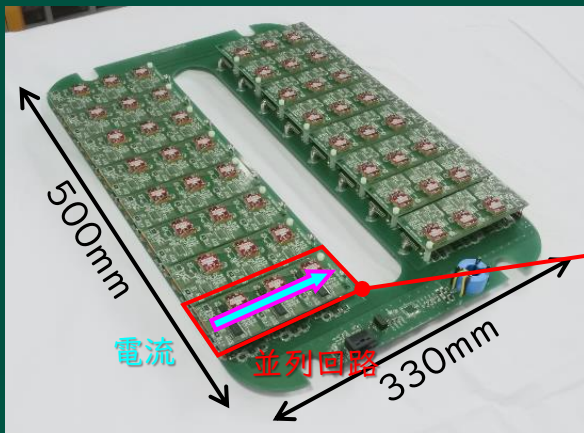
《イグナイトロン》

- 仕様: 50kV/100kA ※5直列で使用
- 使用装置
 - ・クライストロン電源
 - ・短絡保護クローバ装置用スイッチ
- 特徴
 - ・高速立ち上がり (μ sオーダー)
 - ・大電流高電圧への耐量
- 課題
 - ・水銀使用による製造中止 (見込み)

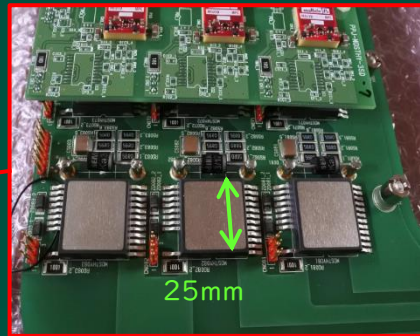


Crowbar current waveform at -110kV charge.

イグナイトロン代替半導体スイッチの概要



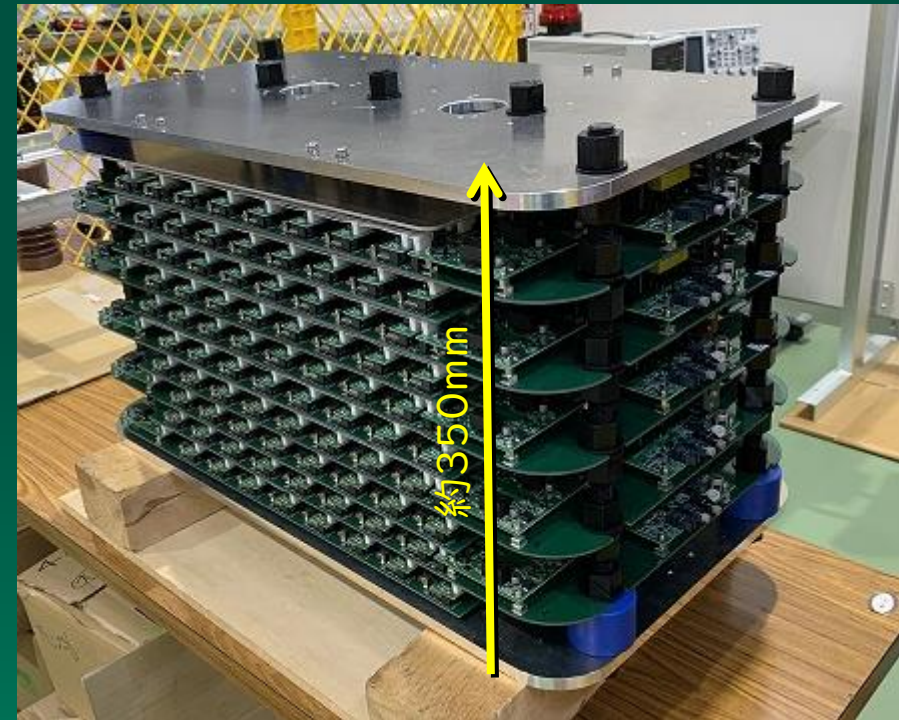
【オーバル型基板モジュール】
(1枚当たり3kV)



MOSゲートサイリスタ

- ・IXYS MMIX1H60N150V
- ・1.5kV/11.8kA(10 μ s), 5.3kA(50 μ s)
- ・単回路: 3直列3KV耐電圧

- ◆ 1枚当たり16並列回路で40kAの耐電流性能を確保
- ◆ 最終仕様: 40枚直列接続にて120kV/40kA/50 μ s出力



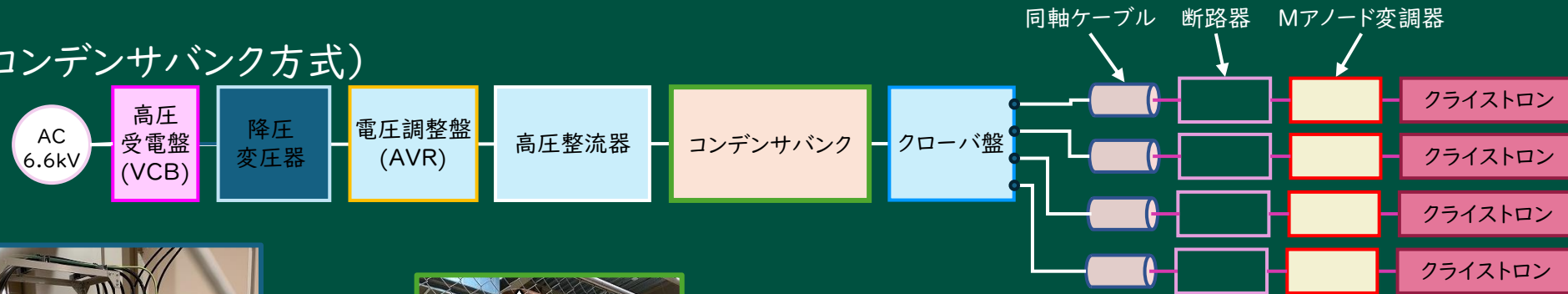
【10層積み(30kV/40kA)】

成果と予定

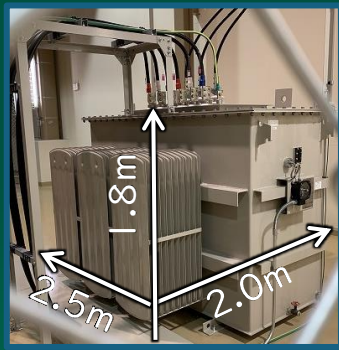
- 直列4層積みで120kV/40kAの10分の1スケール(12kV/40kA)における性能を確認済み。
- 現在120kV耐圧試験の準備中。2025年度中の完成を目指している。

J-PARC リニアック クライストロンシステム

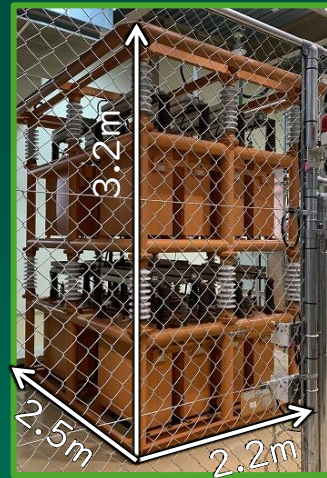
既存技術 (コンデンサバンク方式)



高圧受電盤 (VCB)



降圧変圧器



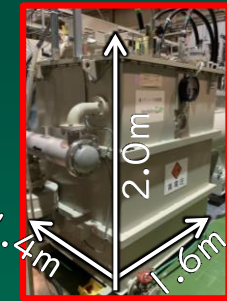
コンデンサバンク



クローバ盤



断路器



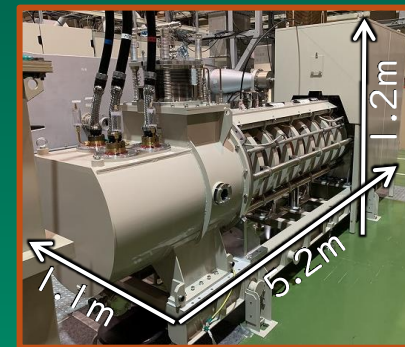
Mアノード変調器



電圧調整盤 (AVR)

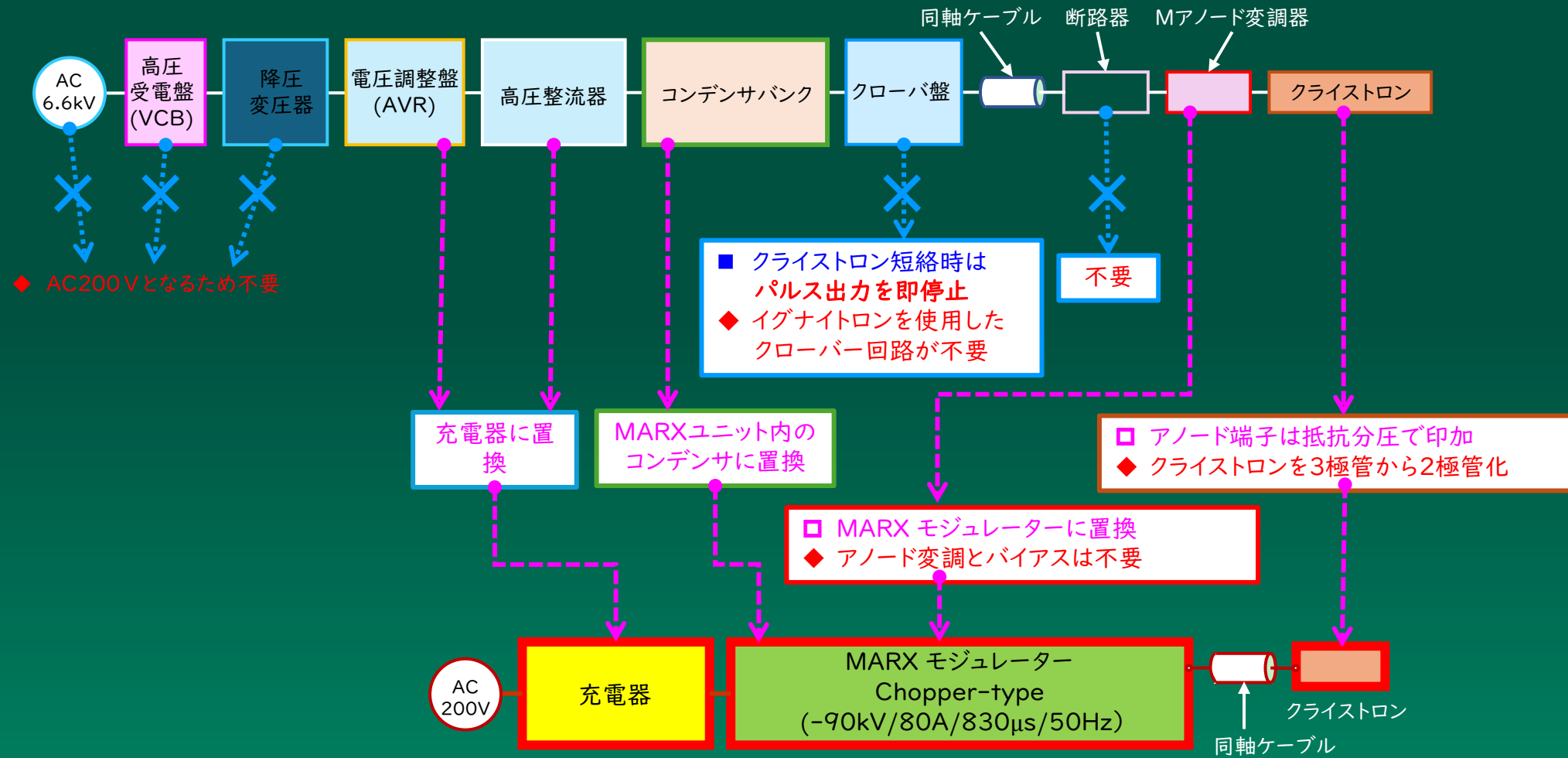


高圧整流器



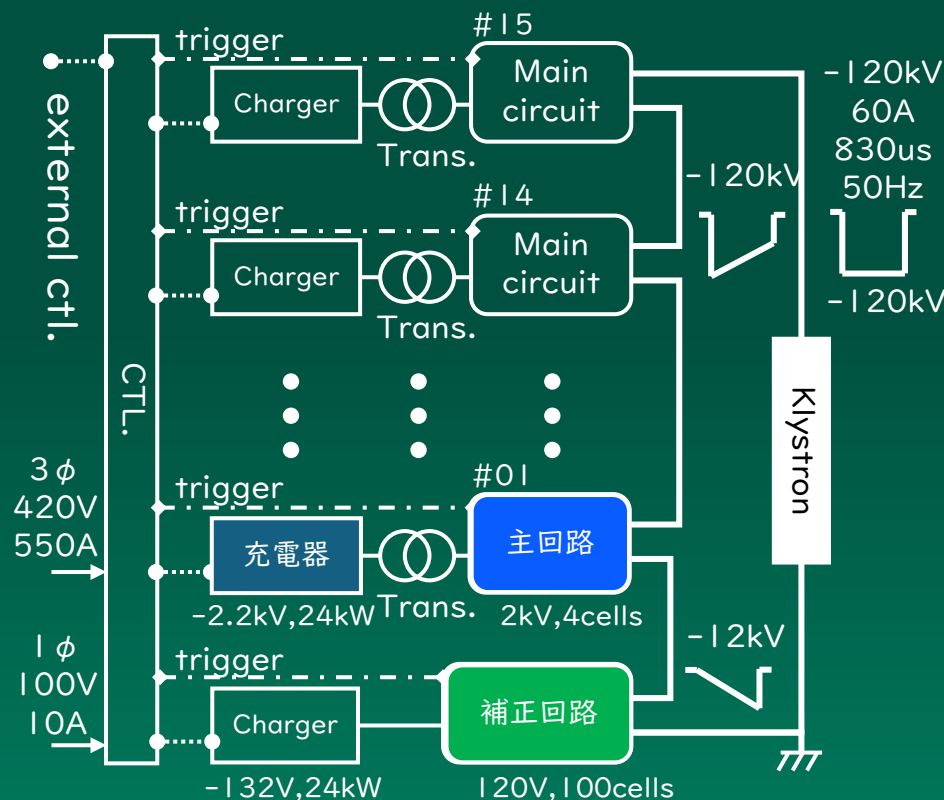
クライストロン

クライストロンシステムの小型化



クライストロン用新MARX電源の開発

項目	本番機	試験機
電圧	120kV	8kV
電流	60A	60A
パルス幅	830us	830us
繰り返し	25Hz/50Hz	1Hz
出力リップル	0.1%	1%
主回路構成	8kV出力 #15units	8kV出力 #1unit
補正回路構成	12kV出力 120V100段	800V出力 80V10段
平均電力	300kW (25Hz)	20kW (25Hz)



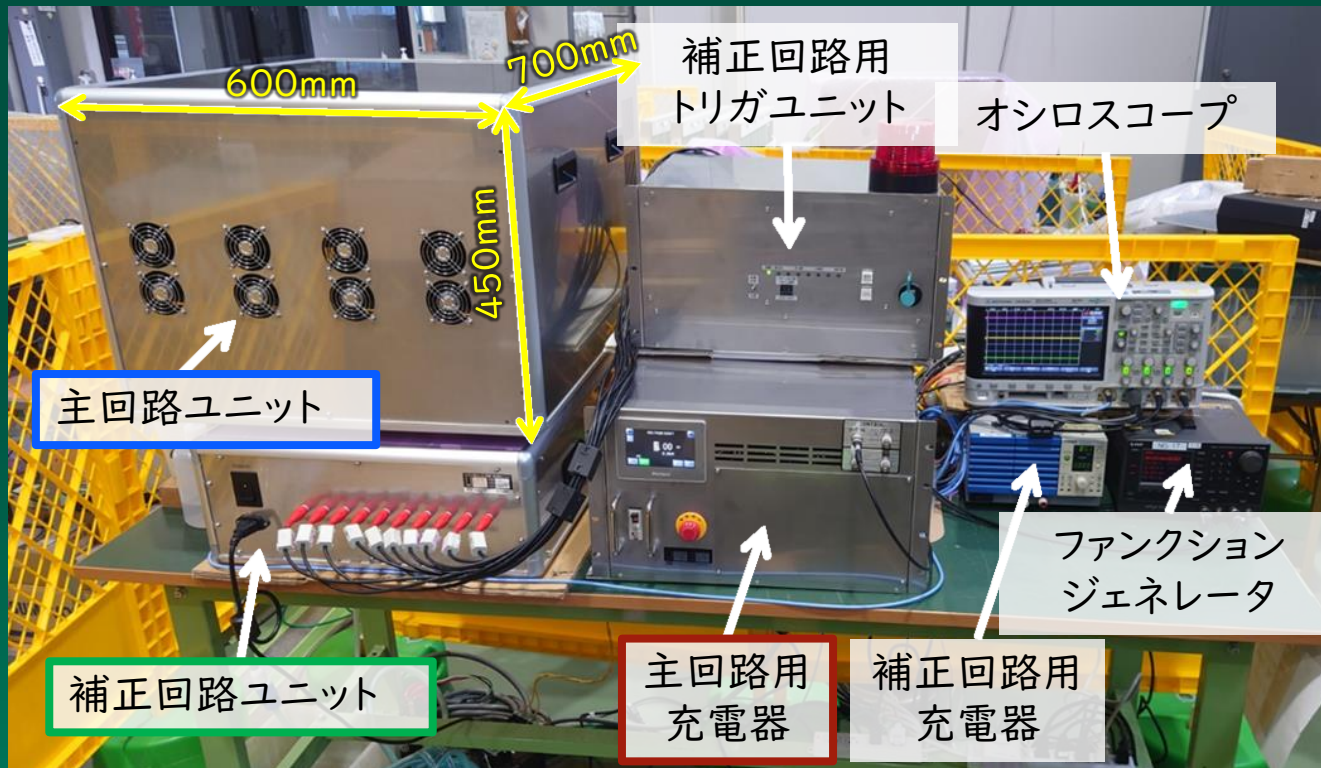
【本番機の回路ブロック図】

- ◆ **主回路ユニット**
 - ・1.7kV/72A SiC-MOSFET
 - ・8kV/60A
 - ・2S2P:4段MARX構成
- ◆ **補正回路ユニット**
 - ・250V240A Si-MOSFET
 - ・800V/60A
 - ・80V×10段:800V
 - ・ドループ補正:10% ⇒ 1%
- ◆ **SiCインバータ充電器**
 - ・充電電圧2.2kV/2.4kW
 - ・出力 1.1A
 - ・出力電位1.2kVフローティング
 - ・安定度 ±0.1%以下
 - ・SiC-MOSFET

【各機器の仕様】

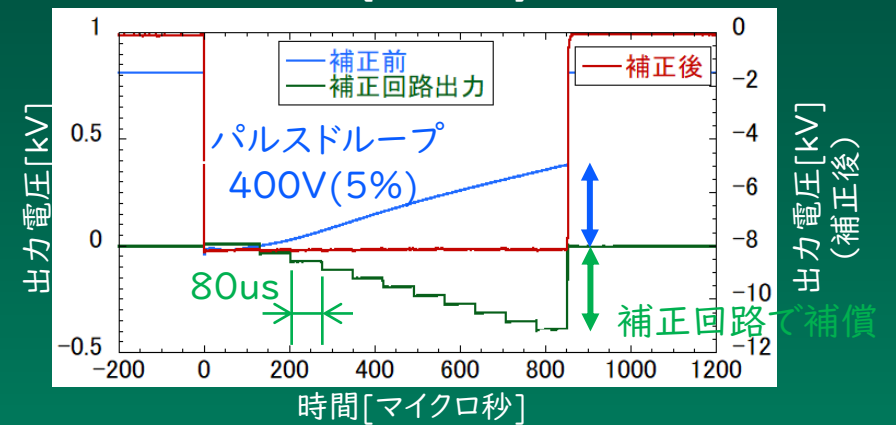
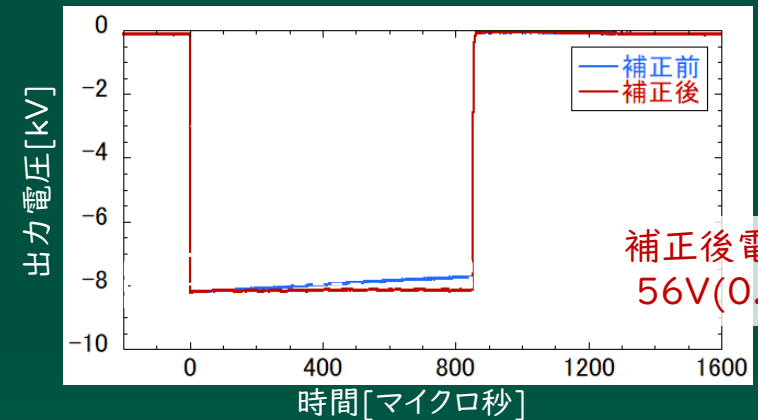
【設計仕様】 主MARX・補正MARX・充電器の連動動作 (8kV/60A/1Hz) を実施

試験結果



【試験風景】

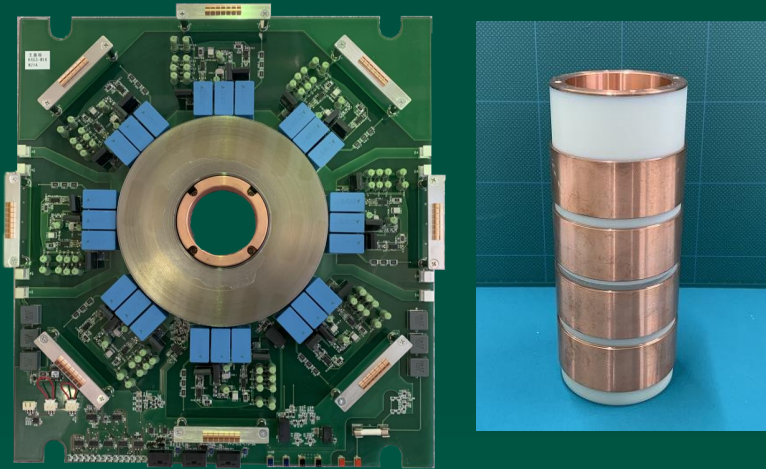
- 80 μ sの時間間隔で出力した10段のステップ状の波形を合成し、830 μ sのパルスドレープを補償
- 400V(5%) \Rightarrow 56V(0.7%)を確認



まとめ

次世代パワー半導体を用いた電源について

半導体用回路設計・構造設計



- 次世代パワー半導体
SiC-MOSFETの活用
今後の期待: GaN (窒化ガリウム),
Ga2O3 (窒化ガリウム), C (ダイヤモンド)

- 低ノイズ・高波形精度
同軸型放射対称回路
LTD回路

- 高絶縁・絶縁材 (油、ガス) が不要
耐コロナ
故障低減、廃棄物削減

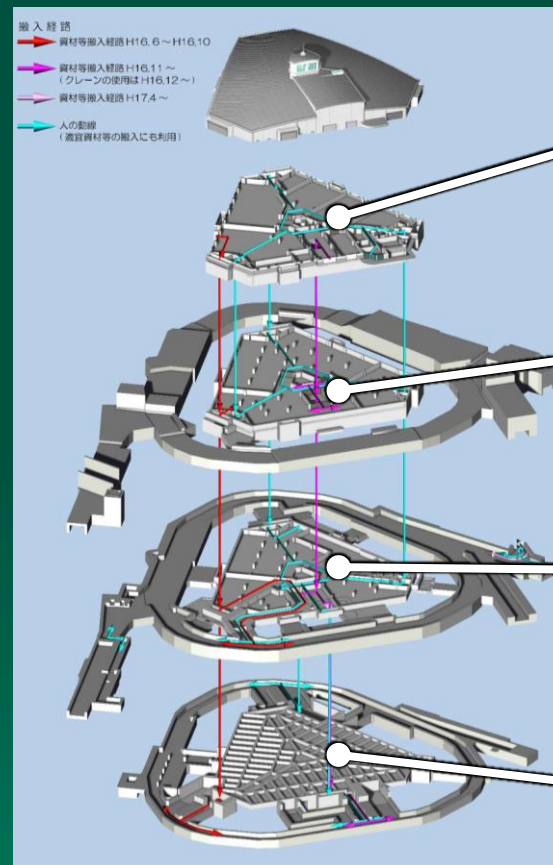
- メンテナンス性
バイパス回路で短時間での復旧が可能
長寿命化・安定化



半導体化の利点

□ 高効率・低損失化・省電力化
電気代の削減
冷却設備（冷却水・空調）が不要・縮小
変電設備の小型化

□ 装置の小型化
設置場所が限定されない
電力ケーブルの短縮化
建屋・設置場所の狭小化



地上1階
電源・空調・冷却水

地下1階
電源・空調・冷却水

地下2階
(主トンネル:電磁石)

地下3階
電源・空調・冷却水

省スペース化、省エネ化
冷却水が不要となれば・・・(^▽^)/

将来計画・展望

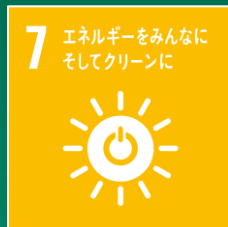
- 可搬型加速器・ミュオンイメージング
トラック・コンテナを使った移動式の加速器
移動式の医療用加速器、X線非破壊検査など
- 加速器新設時の土地・建屋・電気代・維持費の削減

□ 「サステナブル」な社会をつくる



持続可能な開発目標
(Sustainable Development Goals: SDGs)

省エネ電源の開発



設備の縮小



設計時に検討して欲しいこと

メンテナンス性を考えた構造



物は必ず壊れるという考えをもつこと
調査、交換作業がやりやすい設計

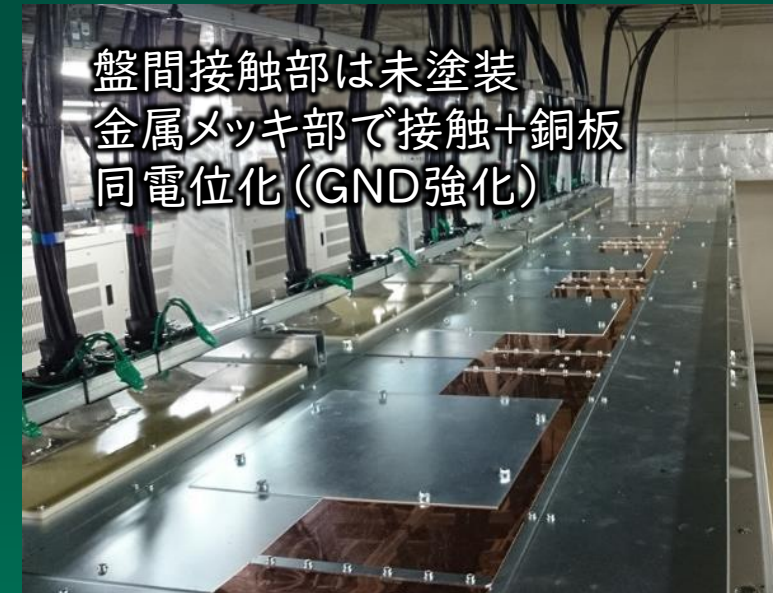
筐体のファラデーゲージ化



ユニット:金属メッキ



「盤間」という概念を無くす



未塗装・メッキ処理のフレームで製作し筐体をファラデーゲージ化
GND強化により電位差とノイズが低減

火災事故の「想定外」と「リスク」

利用運転の長期停止
社会的信頼の失墜



火災になってしまった原因は？
火災になる前に止めることができなかったか？

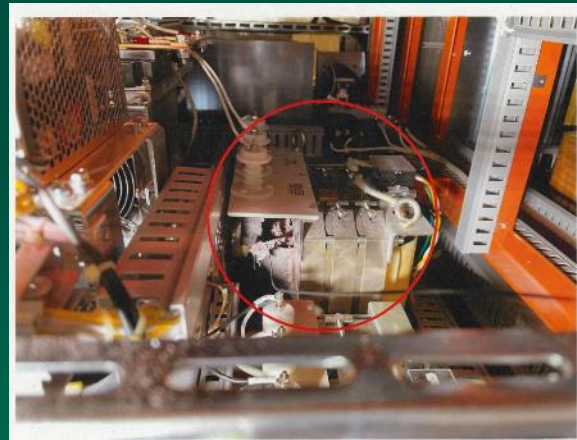


転極器右側面（内部の様子）

<https://j-parc.jp/c/information/2023/10/24001223.html>

転極器

ハドロン電源棟（2024年6月）



<https://j-parc.jp/c/information/2023/06/08001216.html>

変圧器

MR第2電源棟（2024年4月）

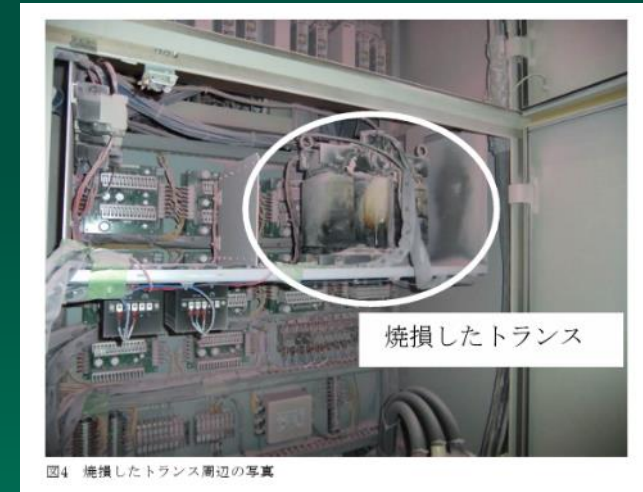


図4 焼損したトランス周辺の写真

<https://j-parc.jp/ja/topics/20150219press.html>

変圧器

MLF実験ホール（2015年1月）

対策

■ 問題点、疑問点の理解

J-PARC火災事故は確認不足などの「ミス」による人災（人的要因）

■ 改善点の洗い出しと適切な対策の導き出し

インターロックなどのシステムを適切に導入する（工学的対策）

電流・電圧の監視システム

分析力を高める（管理的対策）

管理的対策の限界

火災の多くは“設計ミス”や認識不足による“見逃し”が原因で発生している。
過去の事象を分析し、工学的対策を適切に講じる技術力が求められる。

最後に、

世界初、素粒子ミュオンの冷却・加速に成功

～ミュオン加速元年、ついにミュオン加速器の実現へ～

電源が気になりましたか？

謝辞

小野礼人氏 (KEK), 堀野光喜氏, 植野智晶氏
杉田萌氏, 不破康裕氏, 篠崎信一氏 (JAEA)

株式会社パルスパワー技術研究所
徳地明氏, 生駒直弥氏, 亀崎広明氏, 中田恭輔氏

ニチコン草津株式会社
内藤伸吾氏、青木孝典氏、志井春重氏