

SACLA油密閉型モジュレータに用いる 50kV半導体スイッチの開発

理化学研究所 放射光科学総合研究センター

稲垣隆宏、近藤力、安積隆夫、大竹雄次

スプリングエイト・サービス株式会社

益田邦和

パルスパワー技術研究所

徳地明、天神薫、木田保雄

Outline

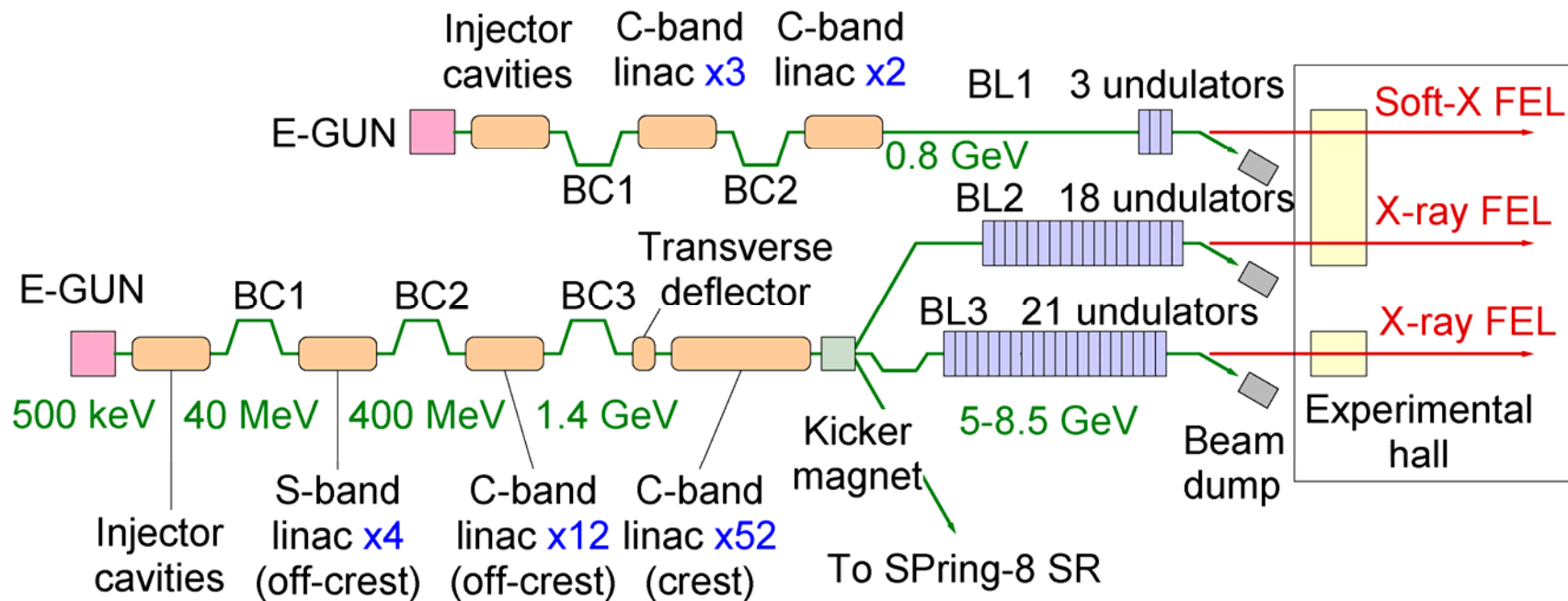
- 開発の目的
- スイッチの設計
- スイッチの構成
- 大電力試験
- まとめ

SACLA加速器のクライストロンとモジュレータ

- X線自由電子レーザー施設「SACLA」
 - 2011年～ 年間 6,000～7,000時間 運転
 - 2015年～ BL1専用加速器 (SCSS+) 運転
- 110 MW パルス・モジュレータ
 - 50 MW クライストロンのパルス電源
 - SACLA 8 GeV加速器で72台使用
 - SCSS+/BL1 800 MeV加速器で7台使用

Cバンド 50MW
クライストロン

110MW パルス
モジュレータ

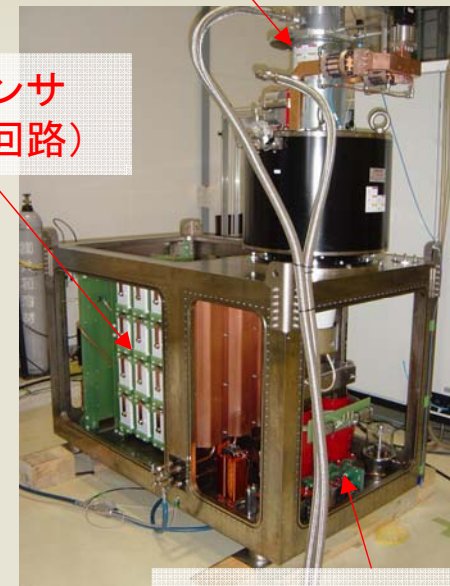


SACLA 油密閉型モジュレータの構成

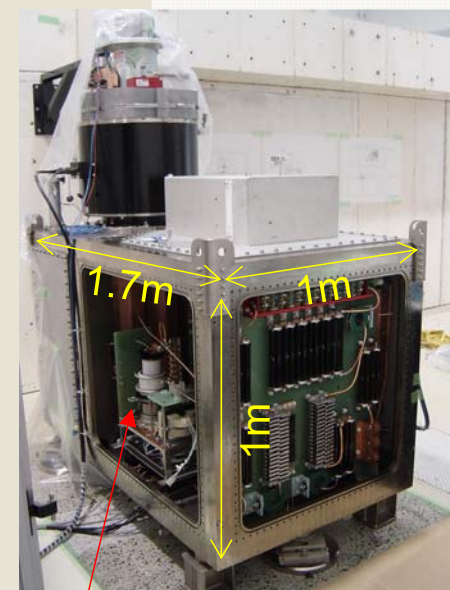
- クライストロン定格 -350 kV、310 A (Lバンドは-290kV、270A)
- EMIノイズ低減のため、パルストランスタンクと一体化
- 小型化、高信頼化のため、絶縁油を封入
- RF安定化のため、充電電源を高安定化 (<10ppm)

クライストロン

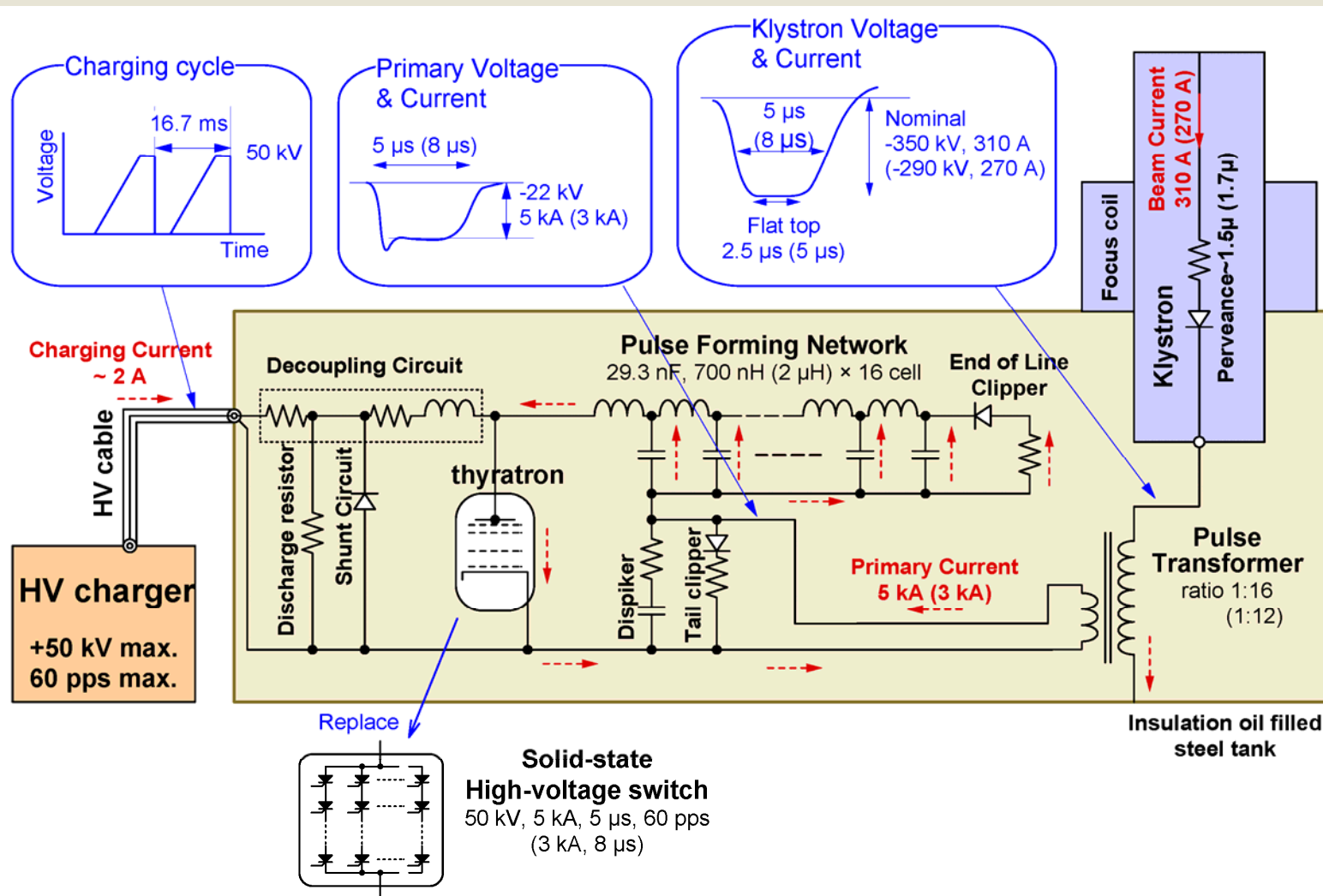
コンデンサ
(PFN回路)



パルストランス

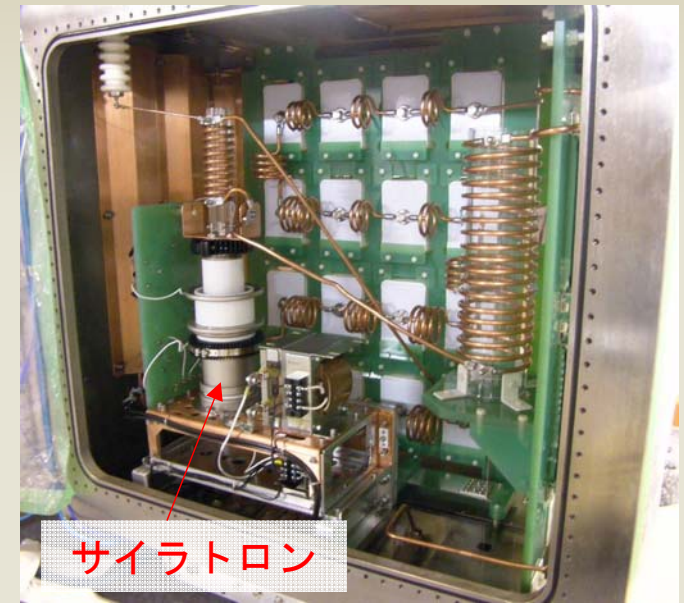


サイラトロン

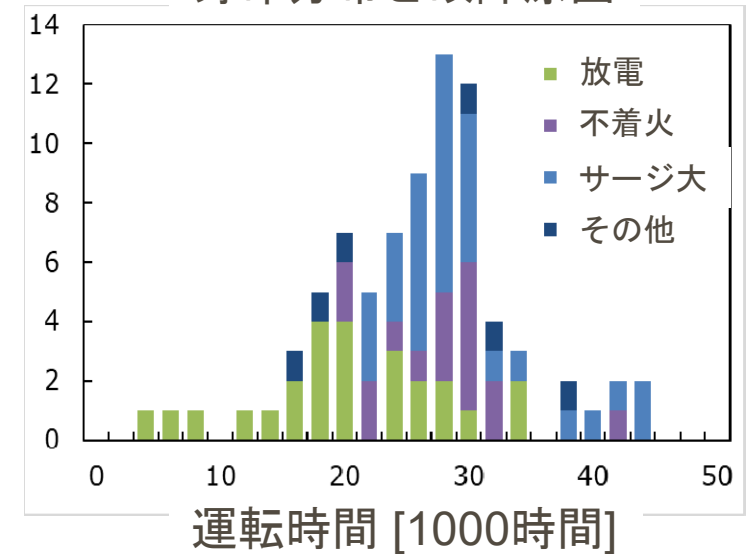


サイラトロン of トラブル

- サイラトン： 水素ガスでの放電を利用した放電管
 - 79本を使用 CX-1836, CX-1937, L-4888D
 - 2年経過後から、カソード等の劣化による障害が多発
[明日のポスター発表 WEP062 (中澤) を参照]
 - サージの増大、トリガ回路の故障 運転の中断
 - 導通損失の増大、変動 RFの変動
 - 導通タイミングの変動
 - 耐電圧不良、自爆の頻発
 - ...
 - 平均寿命 ～ 4年 (25,000時間) あまりに短い！
 - 毎年、15～20本を購入し、交換している。
- ⇩
- 半導体化して、保守コストの削減と、運転の中断リスクを減らすことを計画した。



サイラトロン of 寿命分布と故障原因



Outline

- 開発の目的
- スイッチの設計
- スイッチの構成
- 大電力試験
- まとめ

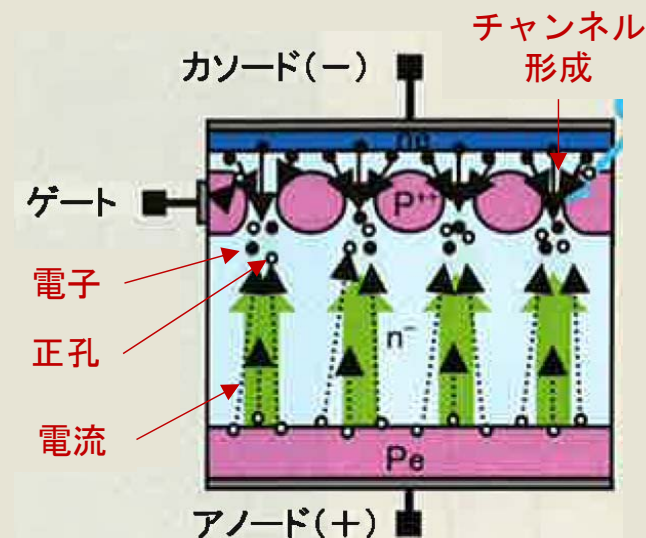
半導体スイッチの要求仕様

項目	要求仕様	備考
充電電圧	最大 50 kV	
パルス電流	最大 5 kA, 5 μ s (Lバンドは 3 kA, 8 μ s)	
繰り返し	最大 60 pps	
ターンオン時間	< 500 ns	高電圧立上り \sim 1 μ s
時間ジッタ	< 3 ns (rms.)	RFの安定度要求より
電流の安定度	< 100 ppm (rms.)	RFの安定度要求より
電力損失	< 3.8 kW (60 pps)	定格出力38 kWの10%
温度	< 60 $^{\circ}$ C	絶縁油の推奨温度
動作環境	絶縁油中	
冷却	油冷	水冷は漏れるリスクあり不可
サイズ	700 \times 300 \times 800 mm以内	サイラトロンに置き換え設置
寿命	>> 4年	
コスト	サイラトロンと同程度	

半導体素子

- IGBT スイッチング遅く、損失大
 - FET 通過電流小さく非現実的
 - 静電誘導型（Static Induction : SI）サイリスタを使用
 - PINダイオード+制御ゲート の構造
 - PINダイオードと同様に低損失で大電流を通過可能
 - 高耐電圧 ~ 3.2 kV
 - 高速スイッチング ~ 200 ns
 - 樹脂パッケージ 油中でも使用可能
 - 阪大産研や長岡技大、KEK等で使用実績あり
- 1素子あたり 1 kA以上の大電流を通過可能

※ただし、現在は製造中止に...



※日本ガイシ パンフレットより引用

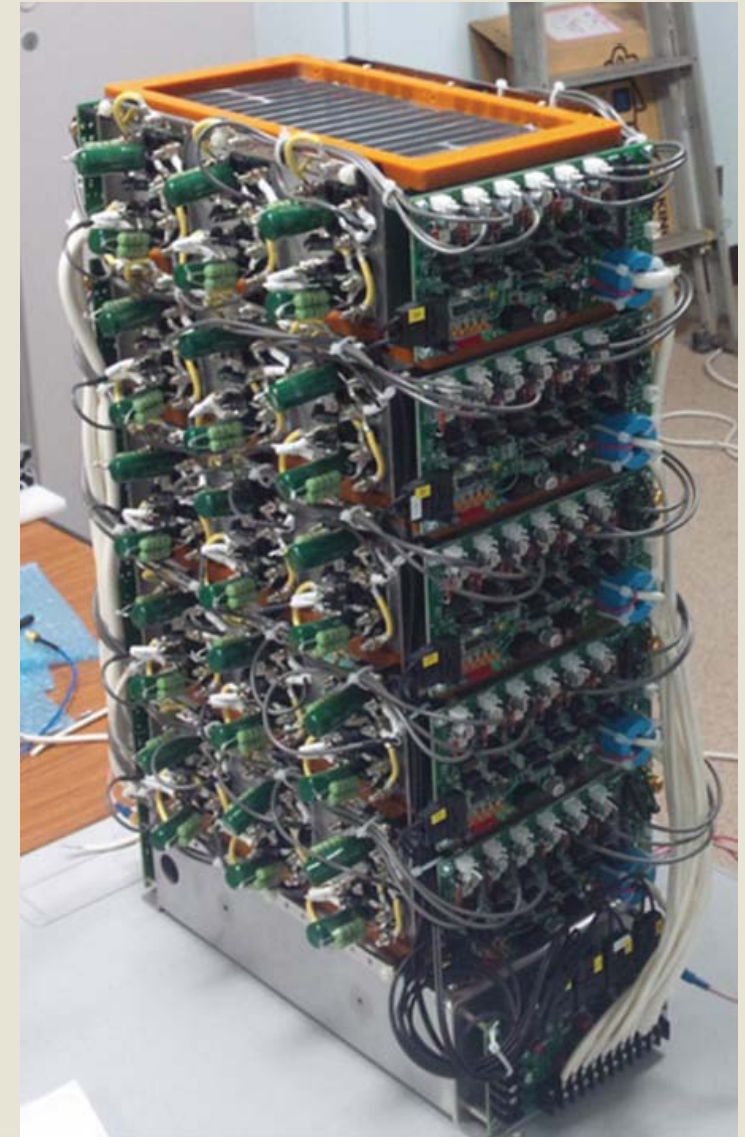
新電元工業(株) サンプル品



阪大産研の半導体スイッチ

- Lバンド加速器のモジュレータにて使用
 - 25 kV、6 kA、10 pps
 - Siサイリスタ 10直列 6 並列
 - 大気中で使用、空冷、全高 540 mmこれを参考に、再設計を行った。
- SACLAの要求仕様 50 kV、5 kA、60 pps
 - 発熱が1桁大きい
 - ⇒損失の見積、素子数の検討
 - 油中での使用
 - ⇒油の循環による放熱
 - サイズの小型化 全高800 mm以内
 - ⇒油中のため、小型化

A. Tokuchi, et. al., NIM-A 769 (2015)
2013年加速器学会 上司氏 / 磯山氏報告



SIサイリスタ素子の試験

スイッチの構成を決めるため、特性を測定した。

1. 漏れ電流 → 直列数を決定

- 2.7kV以上で増加
- 60°C以上で増加

$$50 \text{ kV} / 24 \text{ 直列} = 2.1 \text{ kV}$$

(耐電圧3.2 kVの66%) で使用

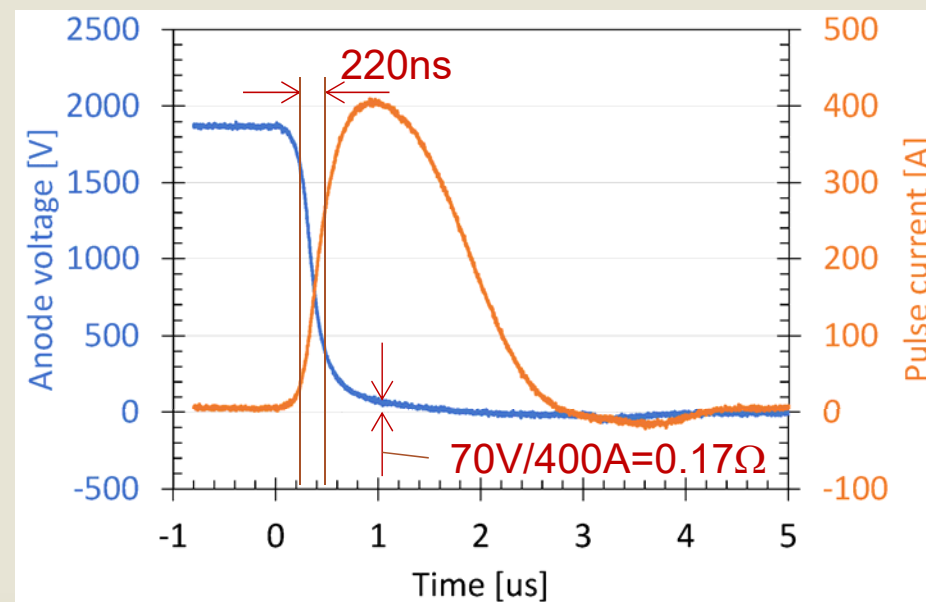
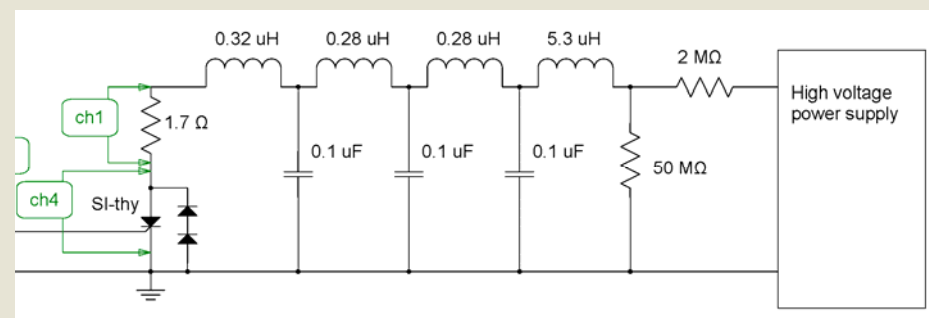
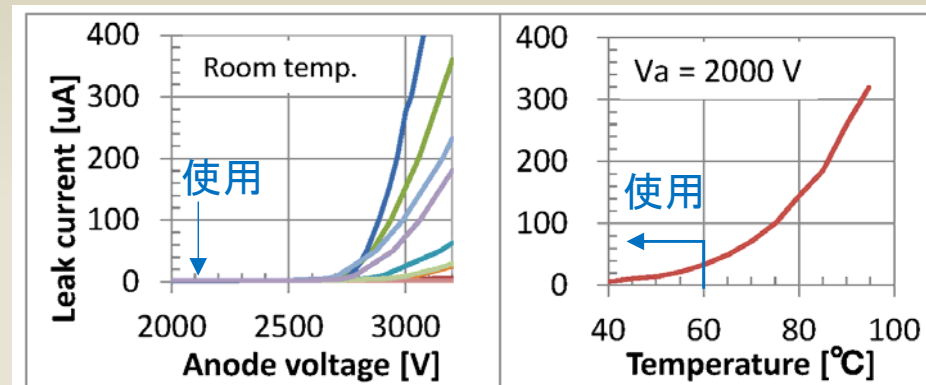
2. 通過損失 → 並列数を決定

- 1.9 kV、400 Aのパルス試験を実施
- 立上り時間~220 ns OK
- ロスは通過損失が主
- オン抵抗~0.17Ω

$$5 \text{ kA} / 8 \text{ 並列} = 625 \text{ A} \quad (\text{阪大の63\%})$$

$$(625 \text{ A})^2 \times 0.17 \Omega \times 5 \mu\text{s} \times 60 \text{ pps} = 20 \text{ W}$$

$$20 \text{ W} \times 192 \text{ 素子} = 3.8 \text{ kW} \quad \text{OK}$$



Outline

- 開発の目的
- スイッチの設計
- **スイッチの構成**
- 大電力試験
- まとめ

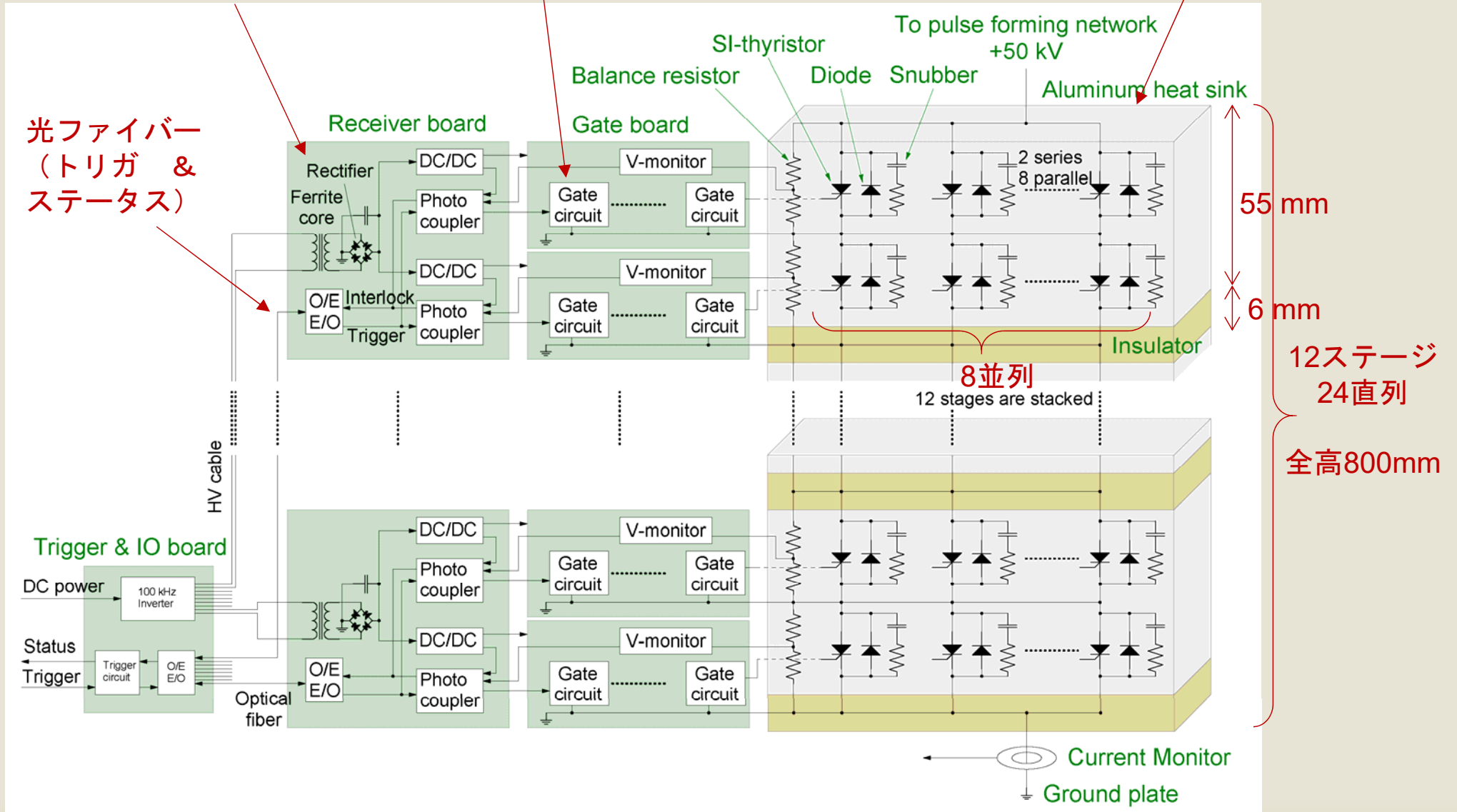
半導体スイッチの構成

ゲート駆動電力は
100 kHzにて伝送

ゲート回路
(素子ごとに)

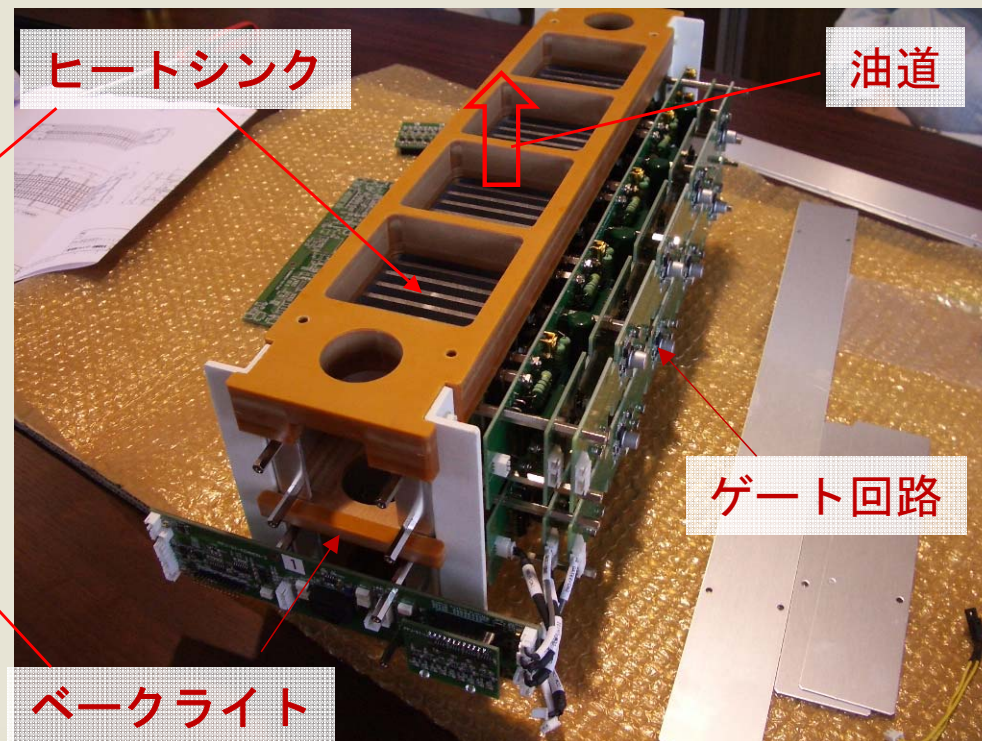
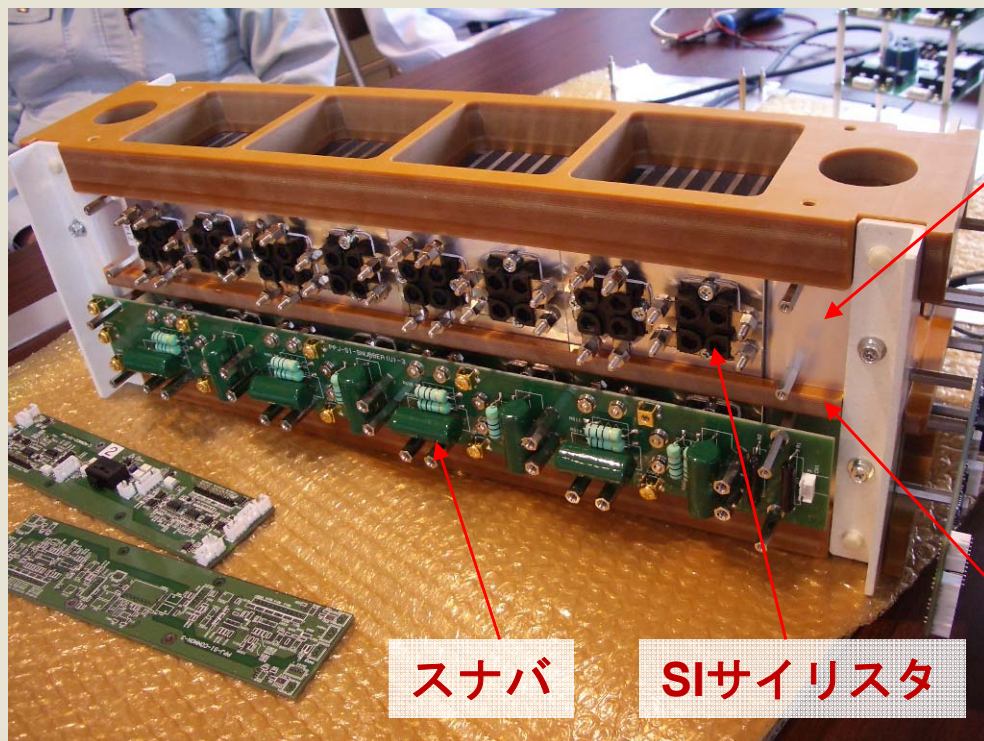
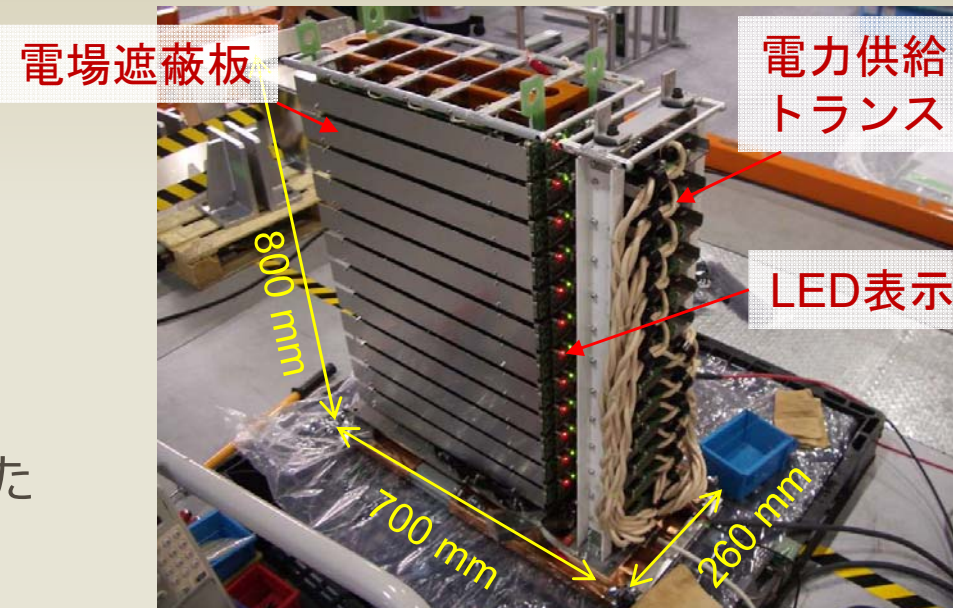
2直列8並列を1ステージとする
ヒートシンクに素子を貼り付ける

光ファイバー
(トリガ &
ステータス)



モジュールの構成

- ヒートシンクを構造体とし、SIサイリスタを貼付
- 中央に絶縁油を流し、放熱
- 外側に、スナバ回路、ゲート回路を配置
- 絶縁材（ベークライト板）を挟んで、積み上げた



Outline

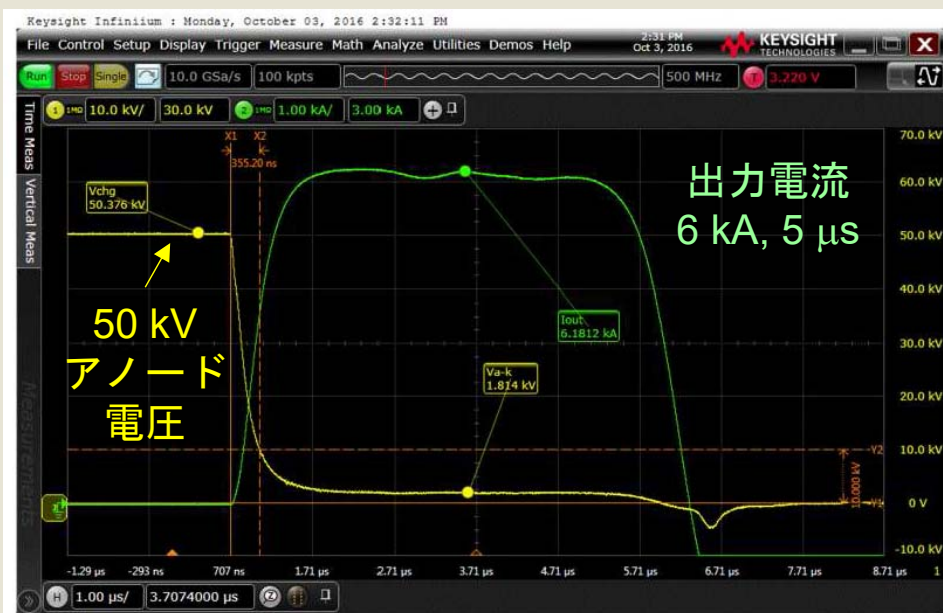
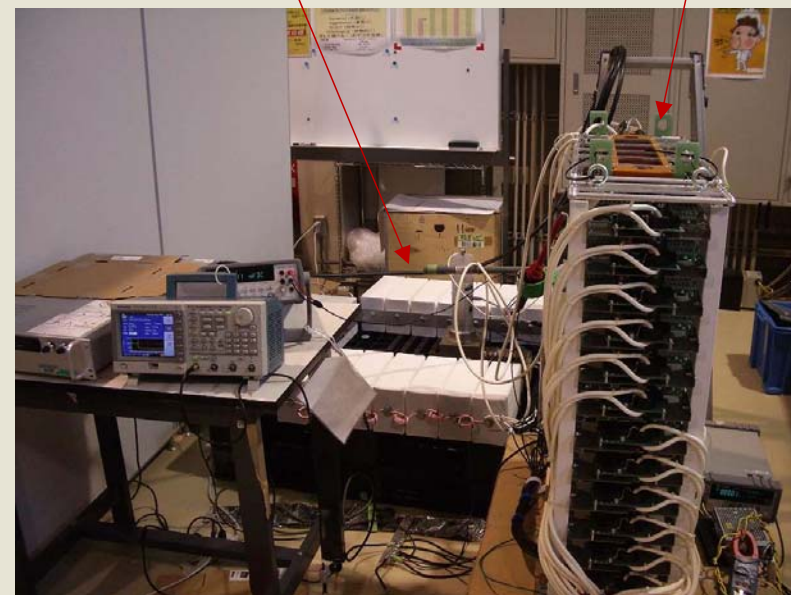
- 開発の目的
- スイッチの設計
- スイッチの構成
- **大電力試験**
 - 気中での単発試験 50 kV, 6 kA, 5 μ s
電圧分担、電流分担の確認
 - Cバンド・モジュレータに外部接続して試験 50 kV, 5.2 kA, 5.0 μ s
パルス波形、立上り速度、損失の確認
 - Lバンド・モジュレータ内に設置して試験 50 kV, 3.2 kA, 7.8 μ s
温度上昇、安定性の確認、長期間の実運転
- まとめ

気中での単発試験

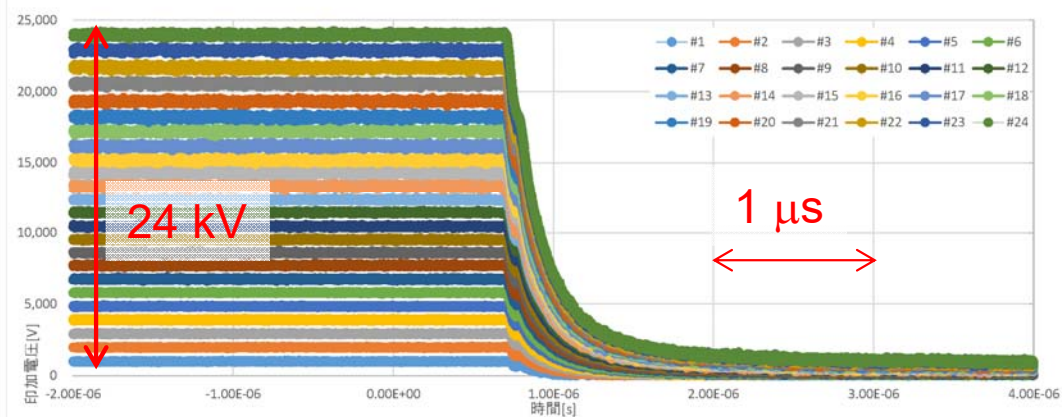
- 最大50 kVまで印加し、6 kA, 5 μ sのパルス出力を確認
- 24直列の電圧分担 (ほぼ $\pm 20\%$ 以内
(1段のみ+40%))
- 導通のタイミングも一致
- 8並列の電流分担 $\pm 30\%$ 以内
- いずれも、素子のマージン ($\sim 50\%$) 内なのでOK

PFN回路
17段

半導体スイッチ



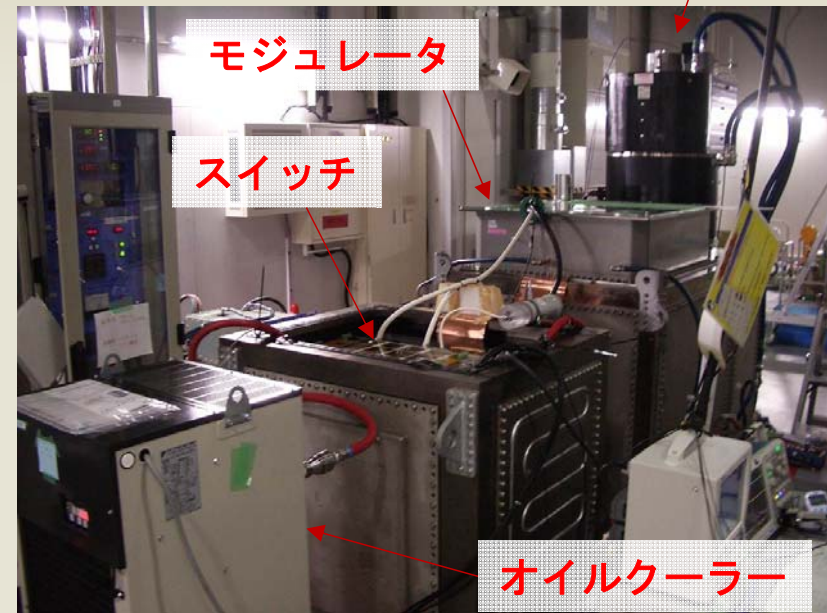
各段の電位を重ねて表示



Cバンド・モジュレータに接続しての試験

- 小型の油タンクに入れ、25°Cの油を循環
- モジュレータとはケーブルで接続
- 60 ppsにて、13時間の運転 問題なし
- 50 kVにて、パルス電流 5.2 kA, 5 μ s
- アノード電圧の立下り 200 ns
- オン抵抗 0.4 Ω
- 電力損失 60 J (3.7 kW@60pps)
- サイリスタ素子の温度 32°C OK
- オイルクーラーでの冷却 $\Delta T \sim 3.3^\circ\text{C}$
- 流量36L/minとすると、発熱 3.4 kW
- いずれも想定通りであり、問題ない

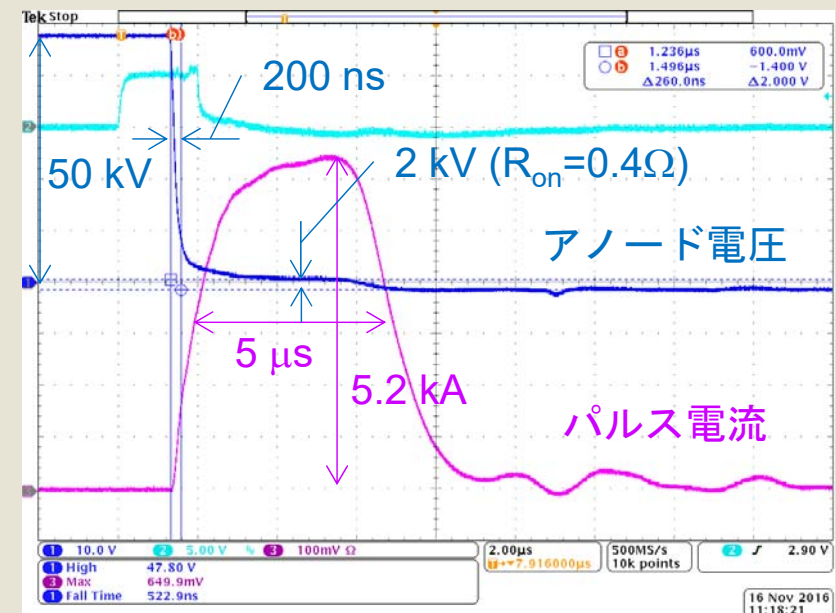
クライストロン



モジュレータ

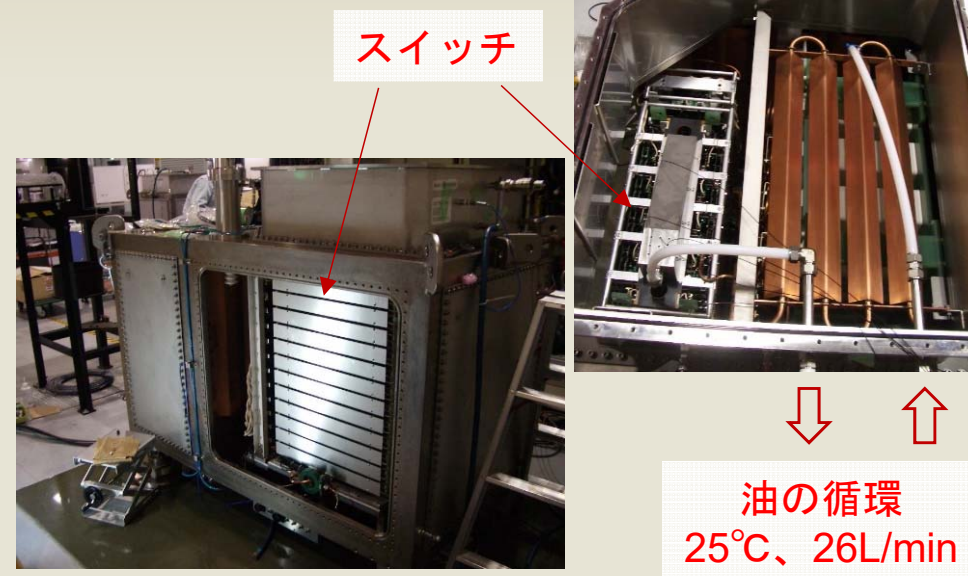
スイッチ

オイルクーラー

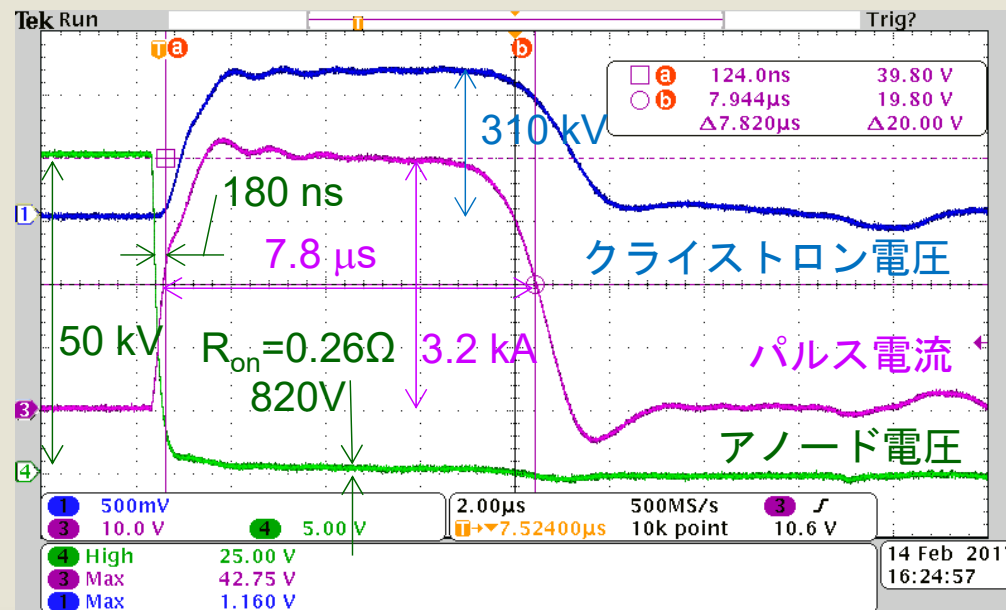


Lバンド・モジュレータ内に実装しての試験

- モジュレータを改造し、半導体スイッチを設置
- オイルクーラーを接続し、25°Cの絶縁油を循環させ冷却
- 60 ppsにて、47時間の運転 問題なし
- 50 kVにて、パルス電流 3.2 kA, 7.8 μ s
- 電力損失 35 J (2.1 kW@60pps)

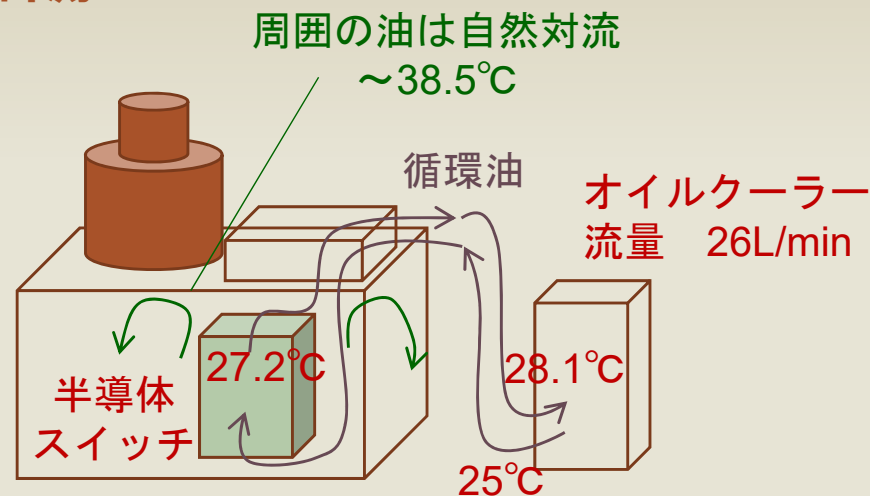


- 高精度オシロで、ショット毎安定度を測定
 - タイミングジッタ 0.3 ns (rms.)
 - クライストロン電圧の変動 29ppm(rms)
 - パルス電流の変動 16ppm (rms)
- いずれも仕様(<3ns, <100ppm)を満たす。



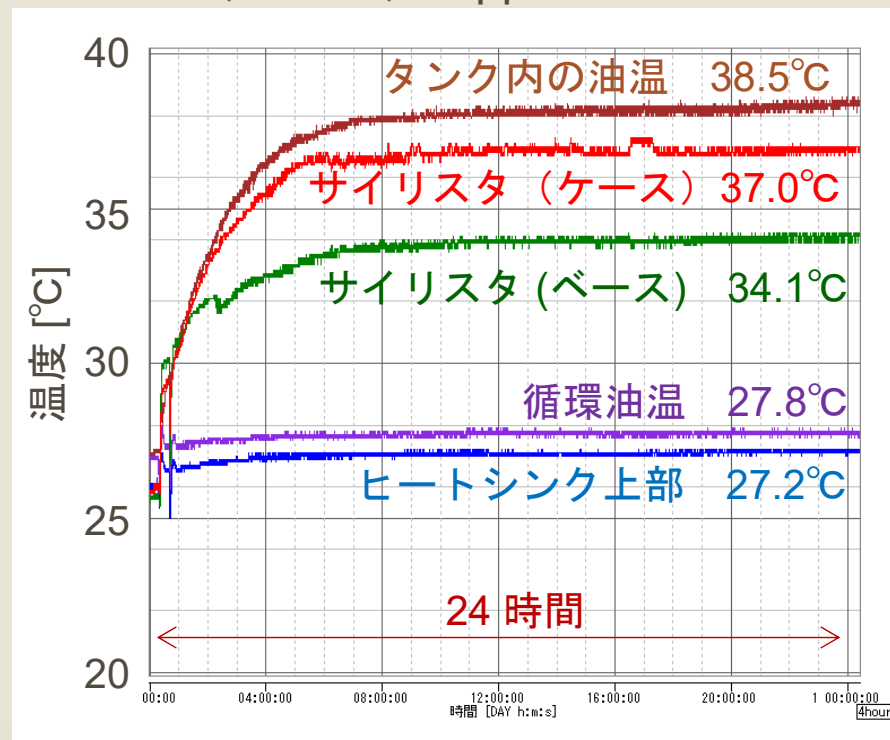
連続運転時の温度 ファイバー温度計で計測

- 半導体スイッチは油の循環で27°Cに冷却
- タンク内の油は自然対流のため38.5°C
- 測定した温度は、この中間の温度となっている。
- 60°C以下であり、問題ない。



- オイルクーラーでの冷却 $\Delta T \sim 3.1^\circ\text{C}$
- 流量26L/minだと **発熱 2.3 kW**
- 波形からの計算や、設計時の想定と一致。
- その後、Lバンド高周波機器の試験に用いられ、これまで60 ppsで1800時間の運転を行っている。
- 特に問題もなく、安定して運転できている。

50 kV, 3.2 kA, 60 pps運転時の温度



Outline

- 開発の目的
- スイッチの設計
- スイッチの構成
- 大電力試験
- まとめ

まとめと今後の予定

- サイラトロン の代替として、絶縁油中で60ppsで使用できる半導体スイッチを開発
- 大電力試験を行い、要求仕様を満たすことを確認

項目	要求仕様	大電力試験の結果
充電電圧	50 kV	50 kV
パルス電流	5 kA, 5 μ s or 3 kA, 8 μ s	5.2 kA, 5.0 μ s or 3.2 kA, 7.8 μ s
繰り返し	60 pps	60 pps
ターンオン時間	< 500 ns	200 ns
時間ジッタ	< 3 ns (rms)	0.3 ns (rms)
電流の安定度	< 100 ppm (rms)	16 ppm (rms)
電力損失	< 3.8 kW (60 pps)	3.7 kW (60 pps, 5.2 kA, 5.0 μ s)
温度	< 60 $^{\circ}$ C	< 37 $^{\circ}$ C (60 pps, 3.2 kA, 7.8 μ s)

- 60ppsで1800時間の運転を行い、長期信頼性も問題ない
- 今後、SACLAの実機にて使用することも検討
- このSIサイリスタは製造中止になったので、次回は別の素子で半導体スイッチを製作予定