話題提供：
パワー半導体デバイスを用いた
高速・高電圧パルス発生技術

株式会社パルスパワー技術研究所

生駒 直弥

ムーンショット目標10 奥野プロジェクト ワークショップ
「核融合分野に貢献する1A重陽子線形加速器とCARA加速器の実現可能性」
2025年7月11日
理化学研究所 和光キャンパス

PPJ
Pulsed Power Japan lab.

日本初 本格的パルスパワー専門メーカー

世界トップレベル 高電圧パルス電源を提供

アピールポイント

高電圧半導体スイッチ、磁気スイッチ採用、高電圧、高繰り返し、高精度、長寿命の世界最高性能のパルス電源を提供。

- 世界トップレベルの高電圧パルス発生技術
- 豊富な高電圧、大電流パルス電源開発実績
- 文部科学大臣表彰科学技術賞(2006年)受賞
- 日本電機工業会技術功績者表彰進歩賞受賞
- 海外の国際会議での豊富な発表経験
- 国内外の研究者･協力者との豊富な人脈

事業内容

パルスパワーの発生と制御に関する技術支援･実験品試作･共同研究(大学及び企業からの依頼)

- 仕様検討、基本構想検討
- 実験品の設計･組立･評価試験
- 不具合調査、対策、性能改善
- 実験、データ測定、解析、シュミレーション
- 大学共同研究、学生指導
- 大学非常勤講師

主要取引先･取引先業界

日本原子力研究開発機構／高エネルギー加速器研究機構／理化学研究所／東京工業大学／長岡技術科学大学／宇都宮大学／大阪大学／筑波大学／群馬大学／千葉大学／立命館大学／同志社大学／住友重機械工業(株)／(株)ＩＨＩ／パナソニック(株)／(株)日立製作所／ニチコン(株)／(株)島津製作所／新日鐵住金(株)　他

HONDA/三菱電機(株)/京セラ(株)/日本電気(株)/日本電子(株)/清華大学(中国)/産業技術総合研究所/金属技研(株)/(株)明電舎/京都大学/三菱重工(株)　他

企業情報

代　表　者	代表取締役　徳地 明
資　本　金	1,000万円
設　　立	平成21年5月
所　在　地	〒525-0013 滋賀県草津市新堂町160

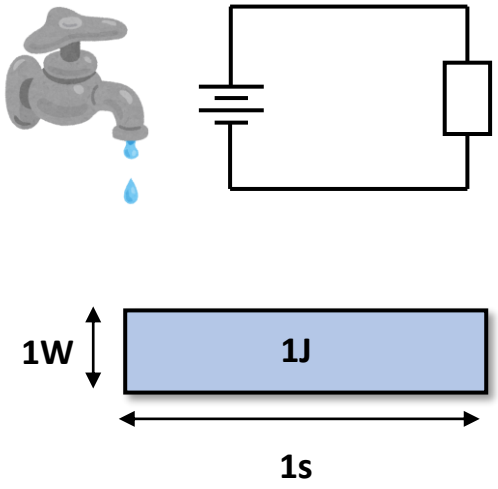
ISO9001取得

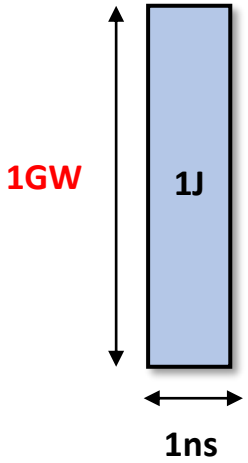
NSF Registered to ISO 9001

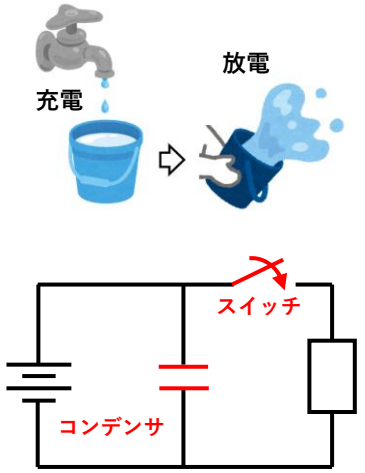
ANAB ACCREDITED ISO/IEC 17021 MANAGEMENT SYSTEMS CERTIFICATION BODY

パルスパワーとは？

Power [W] = Energy [J] / Time [s]







加速器での用途

粒子の発生

- 電子銃電源
- イオン源電源

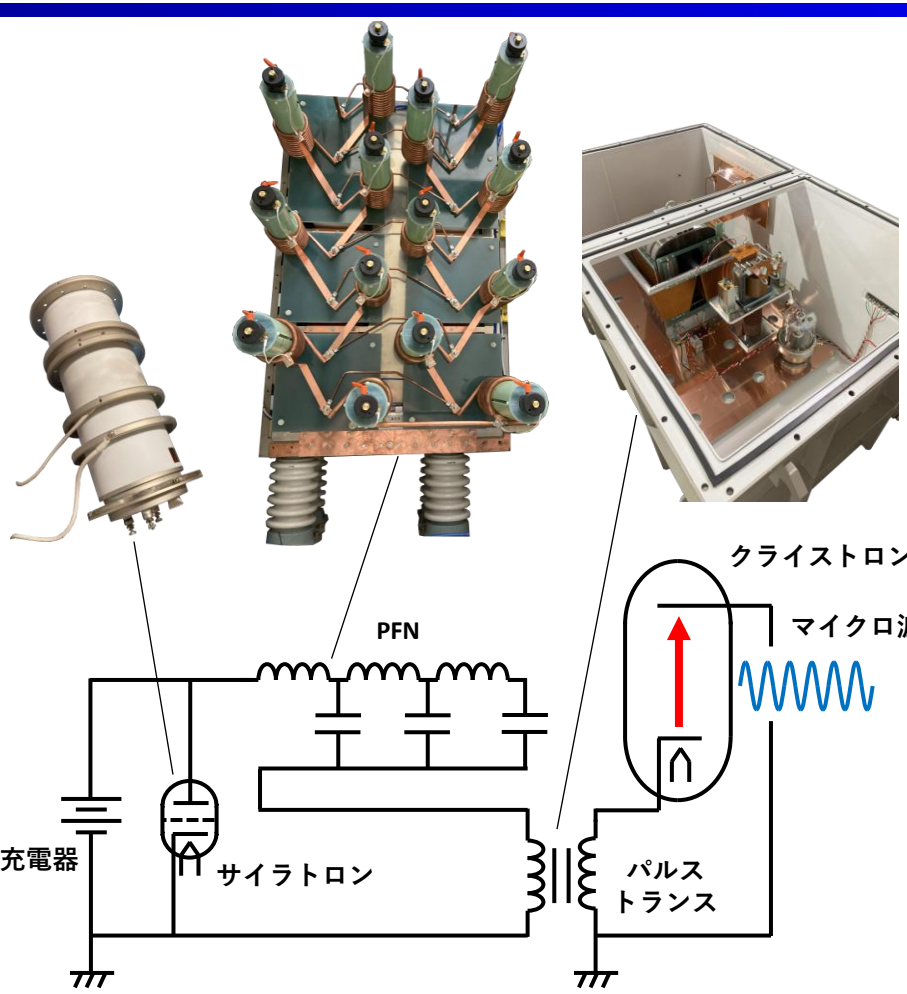
粒子の加速

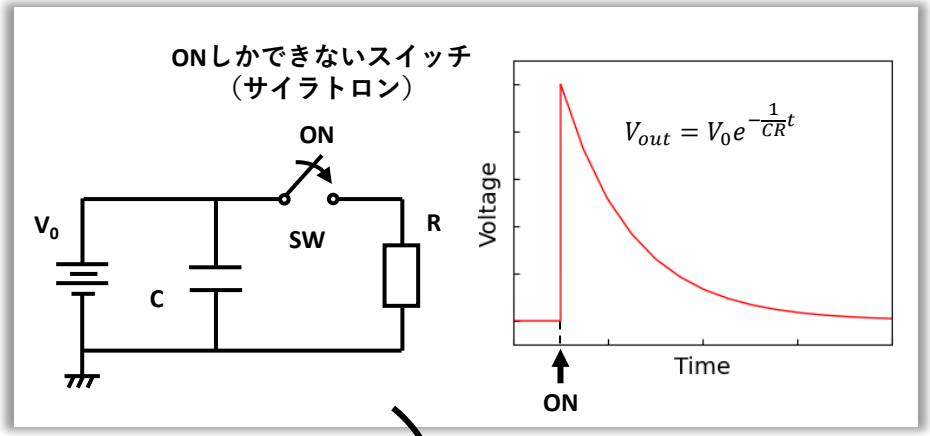
- クライストロン電源
- マグネトロン電源
- 誘導加速電源

粒子の偏向

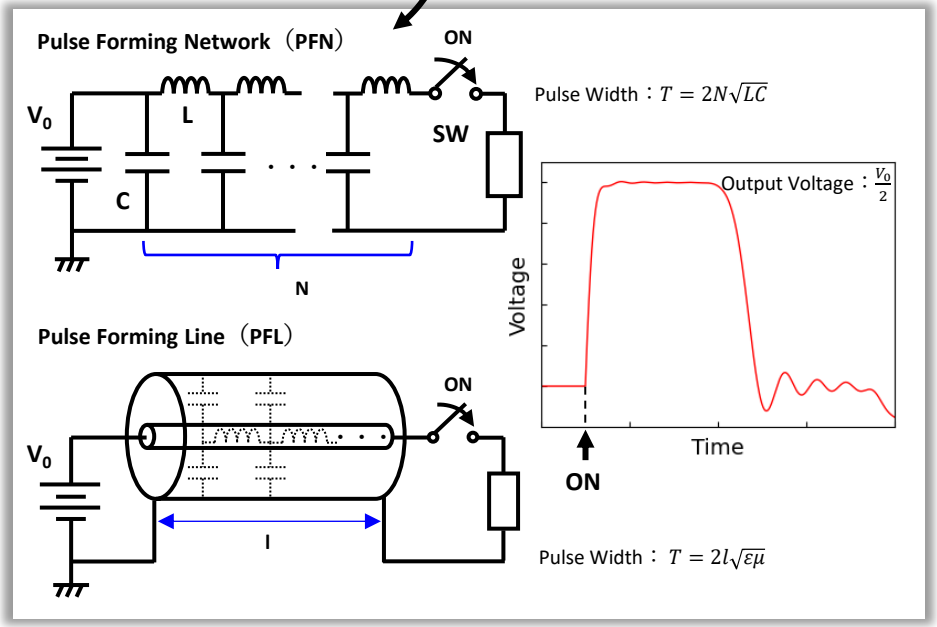
- キッカー電源
- セプタム電源

従来方式 –クライストロン電源を例に–





矩形波を得るには．．．



加速器で要求される高電圧・大電流（数10kV，数kA）をスイッチングするために，サイラトロンが用いられる．

× 寿命が短い（典型的に数万時間）
× 日々の調整が必要
× 高価

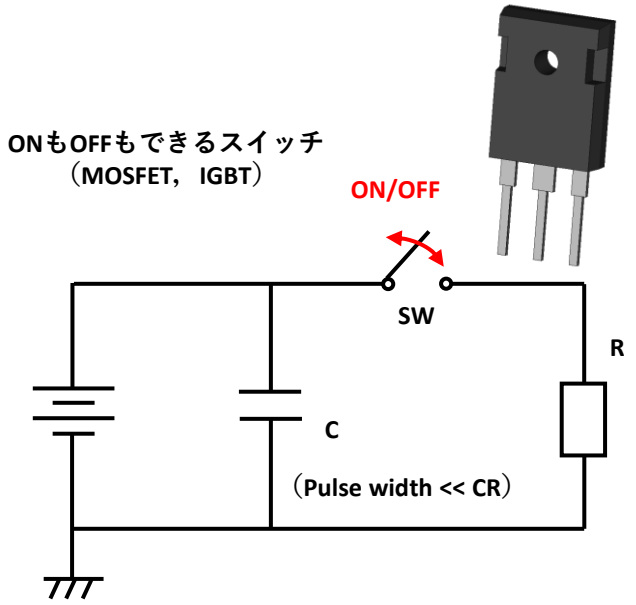
→　電源の半導体化への要求

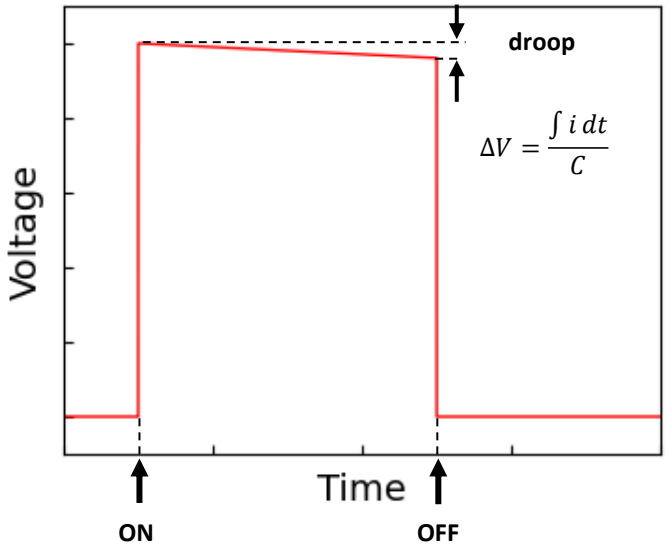
パワー半導体デバイス

- 大電力を扱うことを目的とした半導体デバイス．
- 産業界の需要に応じて，新材料や高耐圧・低損失・高速化の開発が進んでいる．
- これはパルスパワー分野での要求とも一致しており，当社では主にSiC MOSFETを採用した電源を多数開発している．

	Si	SiC	特徴
バンドギャップ [eV]	1.12	3.26	高温で動作
絶縁破壊電界 [MV/cm]	0.3	3.0	高耐圧，低オン抵抗
熱伝導率 [W/cm K]	1.5	4.9	高放熱特性
飽和ドリフト速度 10^7 [cm/s]	1.0	2.7	高周波動作

- 高繰返し
- 高電圧
- 大電流
- 短パルス

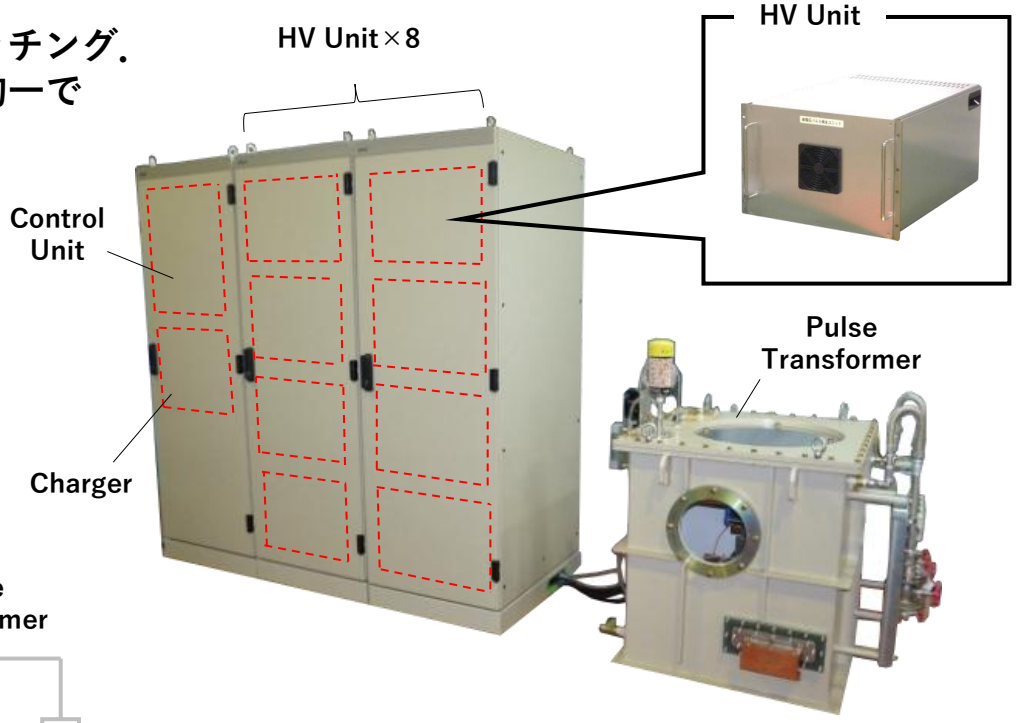


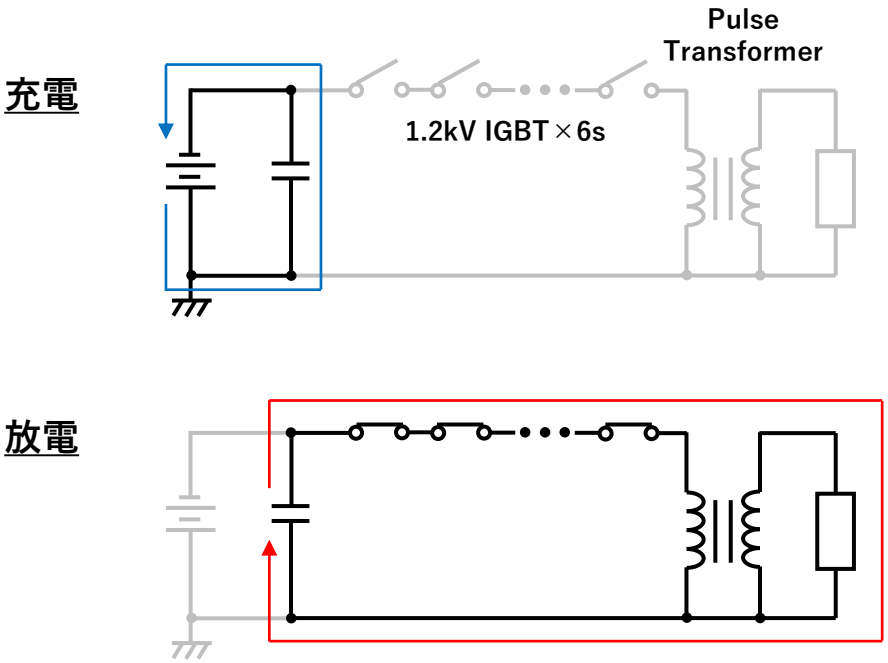


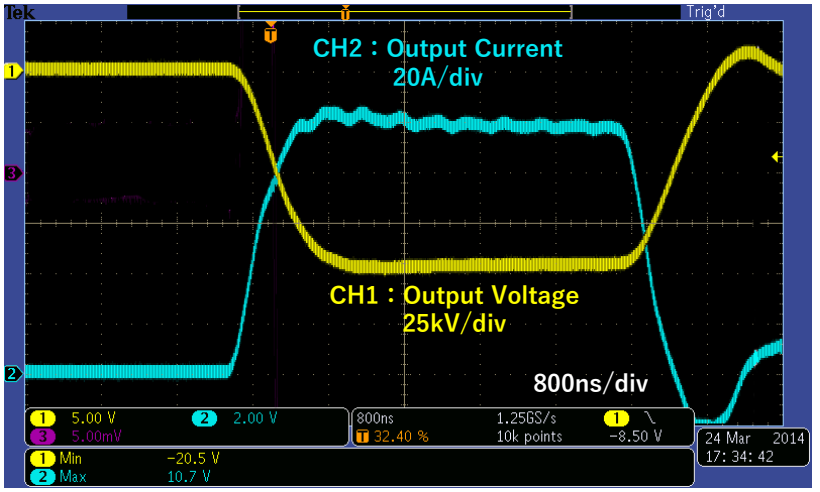
単純直列型 クライストロン電源

- 半導体スイッチを直列接続して高電圧をスイッチング．
- 単純だが，半導体スイッチの分圧バランスが均一でないと故障するため，技術的には難しい．

Charging Voltage	-4 kV
Output Voltage	-147 kV
Output Current	107 A
Pulse Width	4 us
Repetition Rate	10 Hz



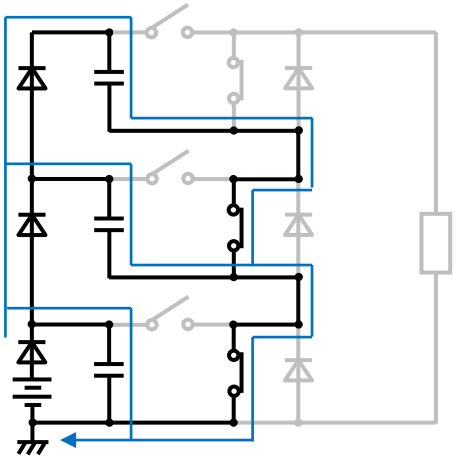




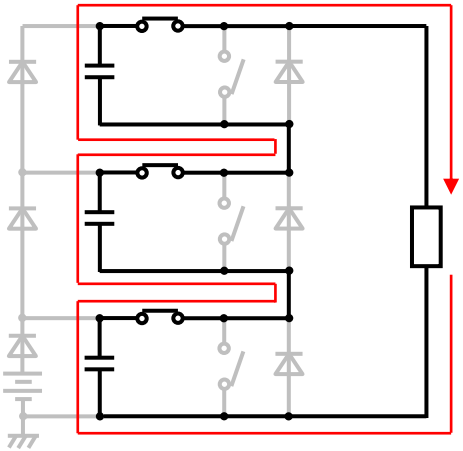
MARXとLTD

MARX

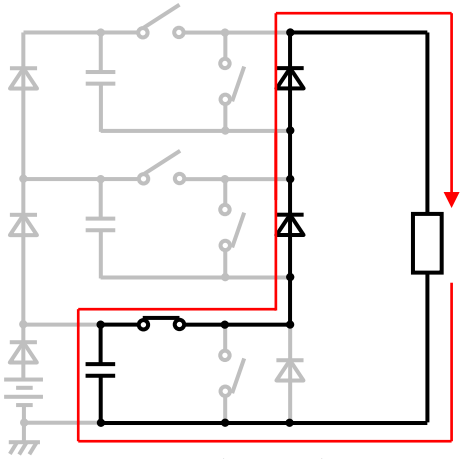
※ ドイツのErwin Marxが1924年に発明



充電



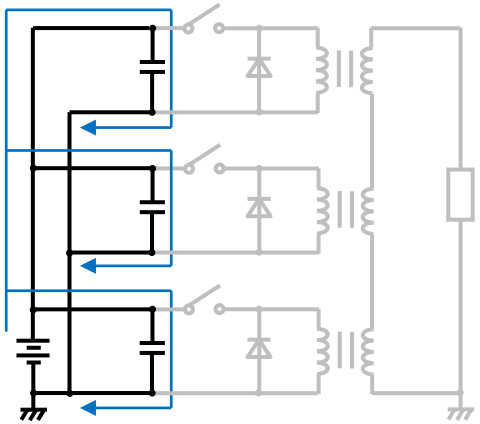
放電



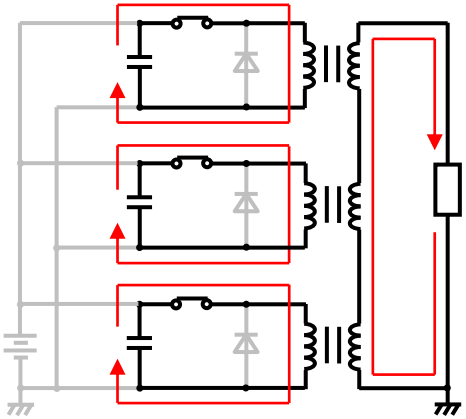
放電（1段のみ）

LTD（Linear Transformer Driver）

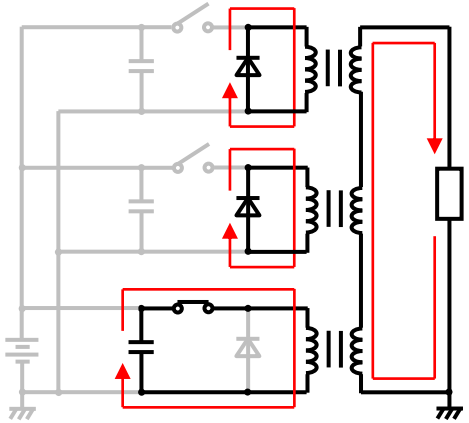
※ 誘導電圧重畳回路（Inductive Voltage Adder）とも呼ぶ.



充電



放電



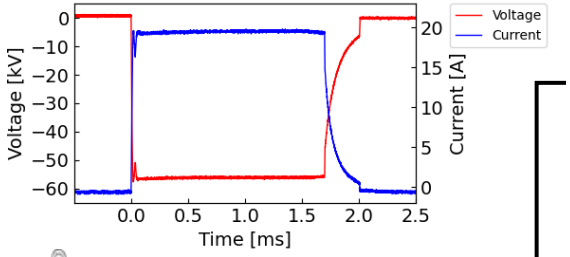
放電（1段のみ）

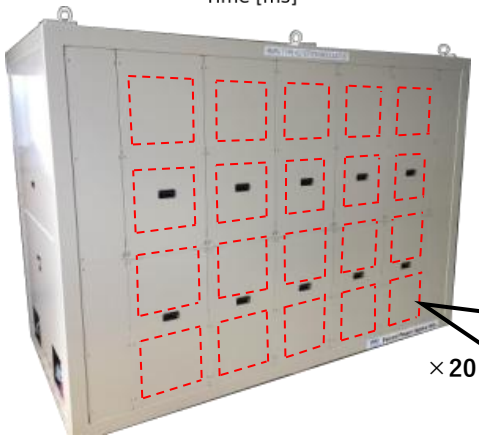
充電電圧×段数倍の電圧を出力.
柔軟な波形制御が可能.

半導体MARX型 クライストロン電源

- パルストランスを使用しないためロングパルスを出力可能.
- 降圧チョッパによるdroop補正.
- モジュール構造で製造・保守に有利.

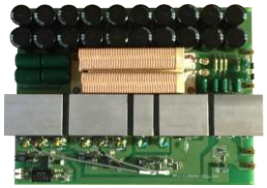
Charging voltage	-2 kV
Number of layers	80
Switching Frequency	50kHz
Output voltage	-120 kV
Output current	140 A
Pulse Width	1.7 ms
Repetition Rate	5 Hz





×20

MARX基板



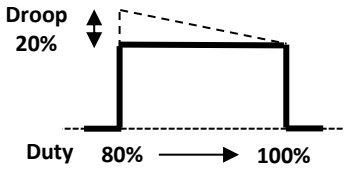
×4

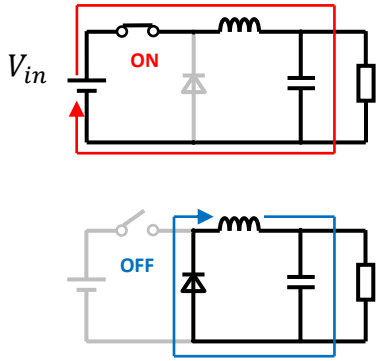
MARXユニット

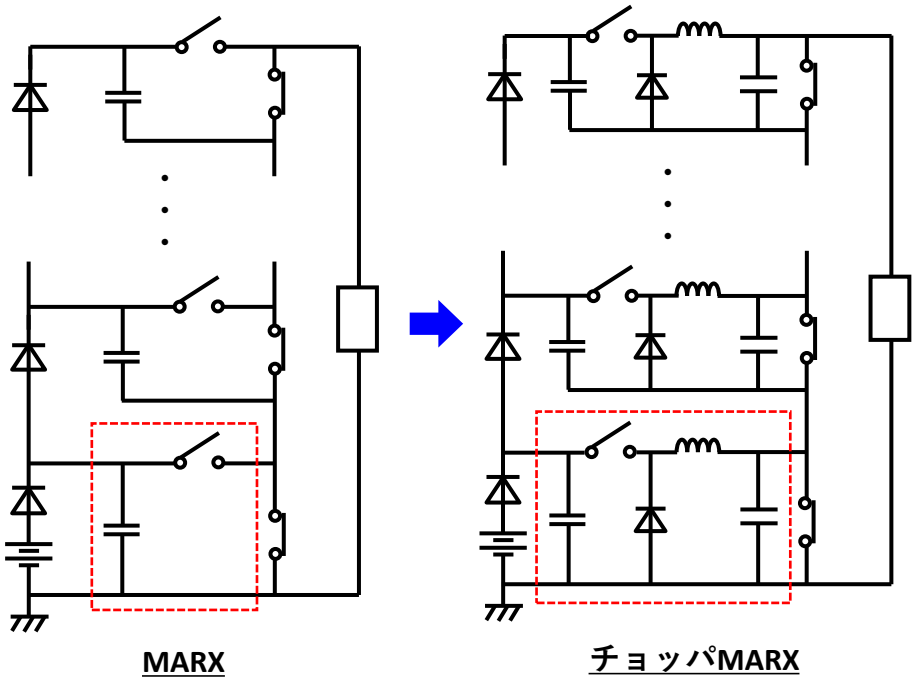
降圧チョッパ

出力電圧： $V_{out} = DV_{in}$

Duty： $D = \frac{T_{on}}{T}$







MARX　　チョッパMARX

澤村陽 *et. al.* PASJ2020 THPP35

半導体LTD型 キッカー電源

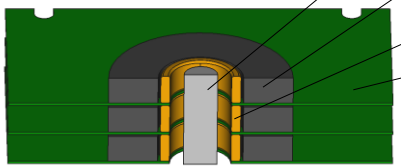
- 各段は接地電位なので，電気信号で直接トリガ可能．
  → 超低遅延．
- コアの飽和によりパルス幅が制限される．
  → ロングパルスには不向き．

$$S\,B_{sat} > \int V\,dt$$

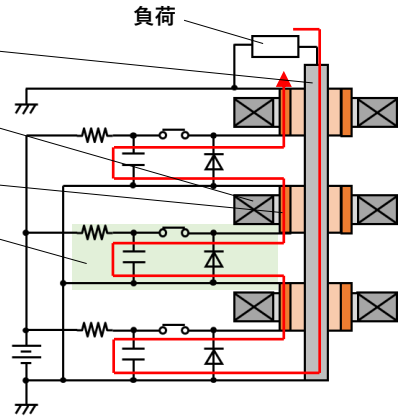
S ：コアの断面積

B_{sat}：飽和磁束密度

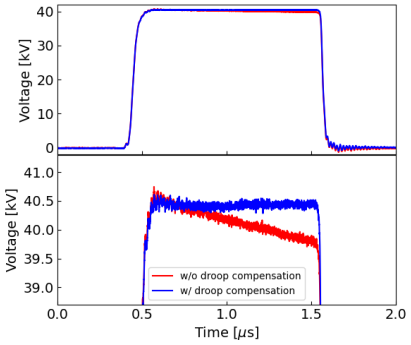
V ：出力電圧

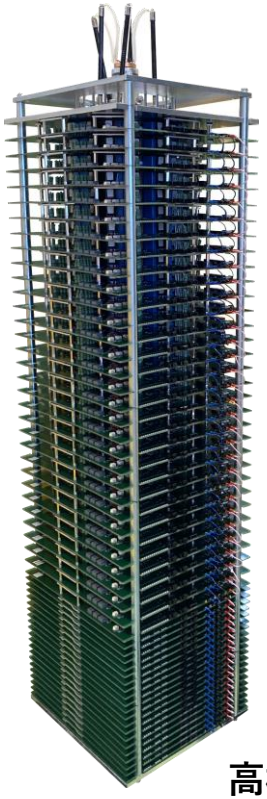


断面図

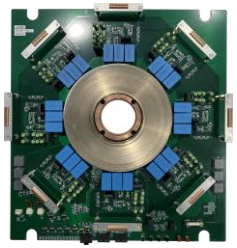


Charging voltage	1.25 kV
Number of layers	Main：32 Compensation：20
Output voltage	40 kV
Output current	2 kA
Pulse Width	1.2 us
Repetition Rate	25 Hz

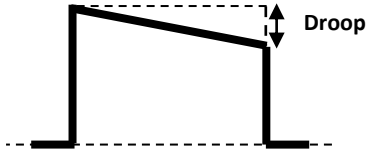




主基板



1.25kV×32枚
同時ON



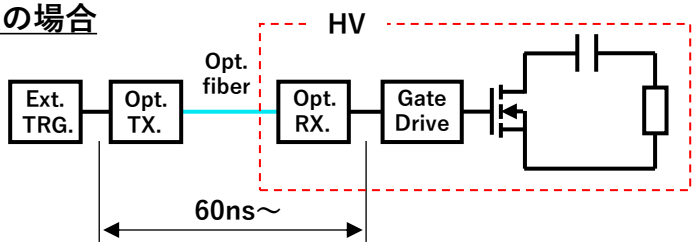
＋

補正基板

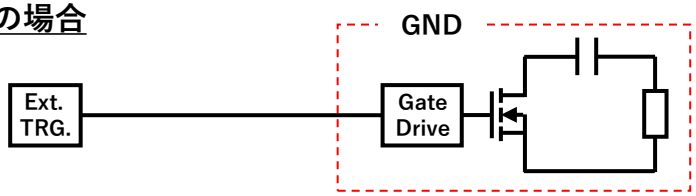
100V_{max}×20枚

多チャンネルトリガ
発生器を用いて
順番にON

MARXの場合



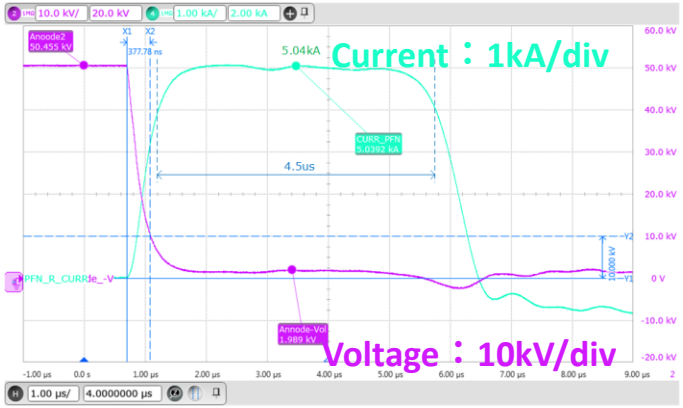
LTDの場合

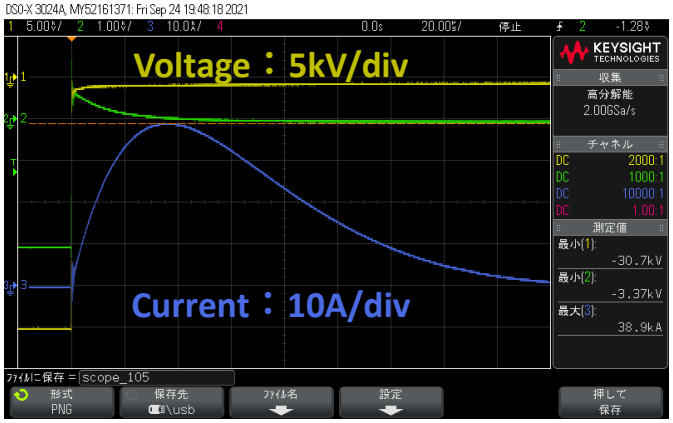


高柳智弘 *et. al.* PASJ2024 WEOA05

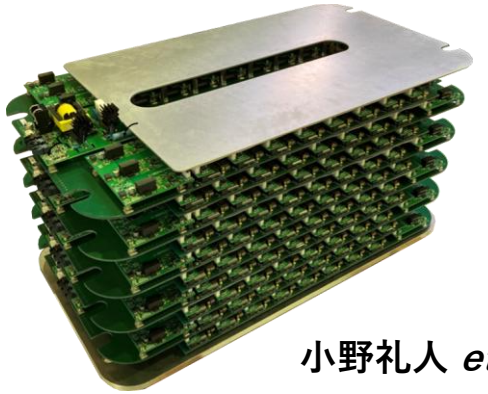
高電圧半導体スイッチ

	サイラトロン代替スイッチ	イグナイトロン代替スイッチ
Voltage	-50kV	-30kV
Current	5kA	40kAp
Pulse width	5us	50us
Repetition Rate	60Hz	Single Shot
Switching Device	Static Induction Thyristor	MOS-Gated Thyristor
Switch Configuration	2s8p / PCB × 12 PCB	3s16p / PCB × 10 PCB





稲垣隆宏 *et. al.* PASJ2017 TUOL08

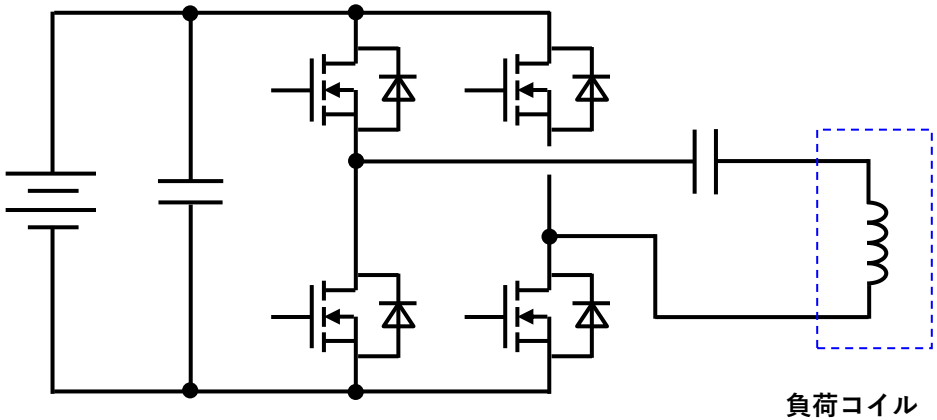


小野礼人 *et. al.* PASJ2023 FRP17

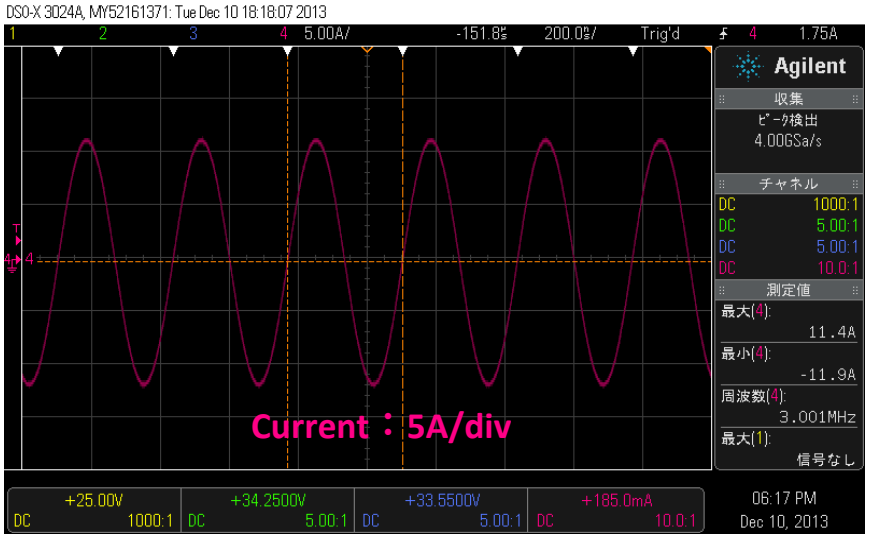
パータベータ電源

- 高周波MOSFETを用いたフルブリッジインバータ方式
- 1ユニット内に8基板並列×4ユニット並列で±300Aを出力

Load inductance	100nH
Output current	±300A
Frequency	3MHz



フルブリッジ
インバータ



まとめ

・高電圧パルス電源の分野では，サイラトロン等の放電管を使用した従来方式の電源を，パワー半導体デバイスを使用した新方式の電源で置き換える取り組みが進行中.

・サイラトロンに匹敵する高電圧・大電流を扱うためには，多数の半導体デバイスを使用する必要があり，単純直列からMARX，LTDなど複数の方法がある.

・所望の波形を得るためには，用途に適した回路方式や素子の選定の他に，低インダクタンスな構造や，絶縁技術も重要.