



Accelerator Laboratory

TUOL07

KEKにおけるILCクライストロン電源開発の現状

明本光生、川村真人、設楽哲夫、竹中たてる、中島啓光、福田茂樹、本間博幸、
松本利広、道園真一郎

高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設

第14回日本加速器学会年会
2017年8月1日(火)

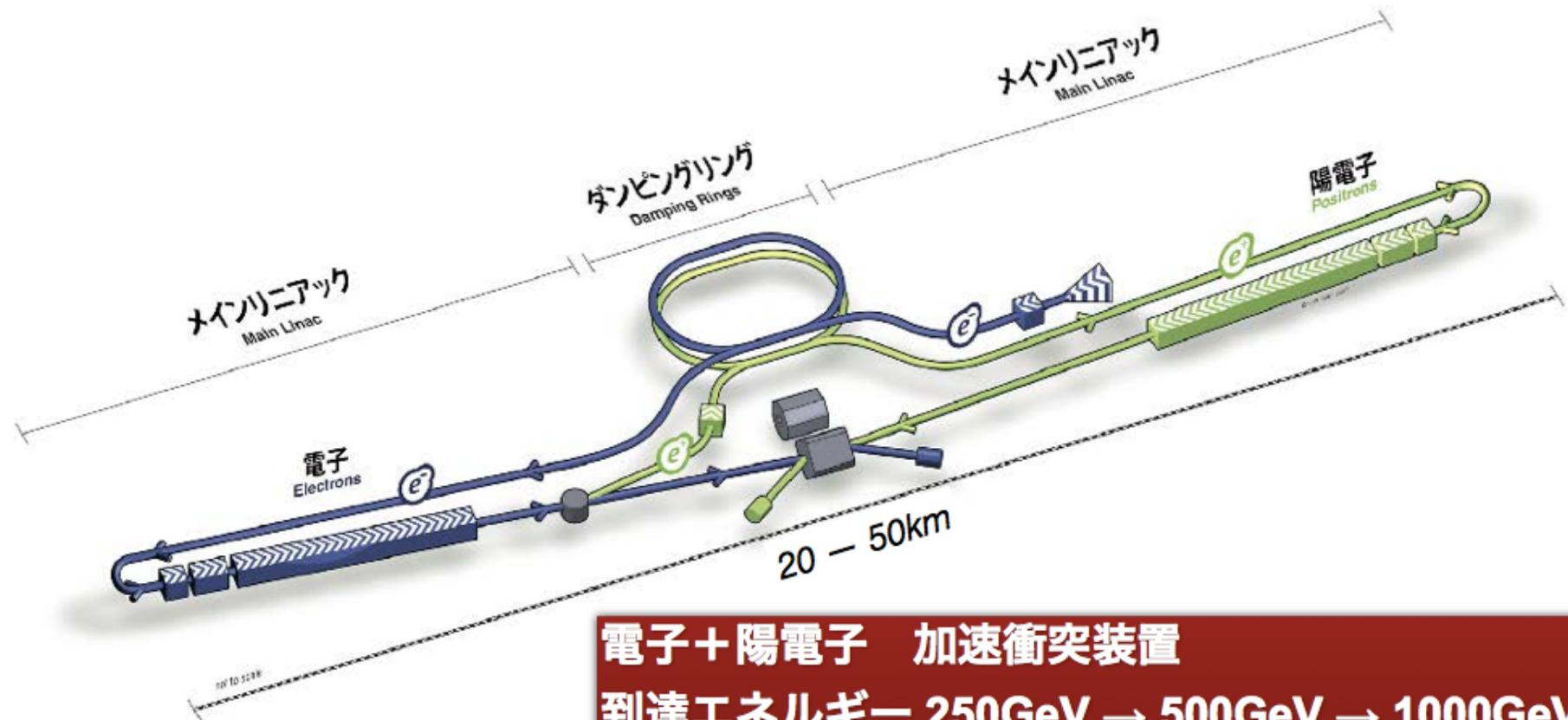
発表内容

- (1) ILC クライストロン電源の概要
- (2) 従来のパルス電源
- (3) Marx型パルス電源の開発状況
- (4) まとめ



Accelerator Laboratory

ILC



電子+陽電子 加速衝突装置
到達エネルギー 250GeV → 500GeV → 1000GeV
全長 20km → 50km
北上山地 (岩手県~宮城県)

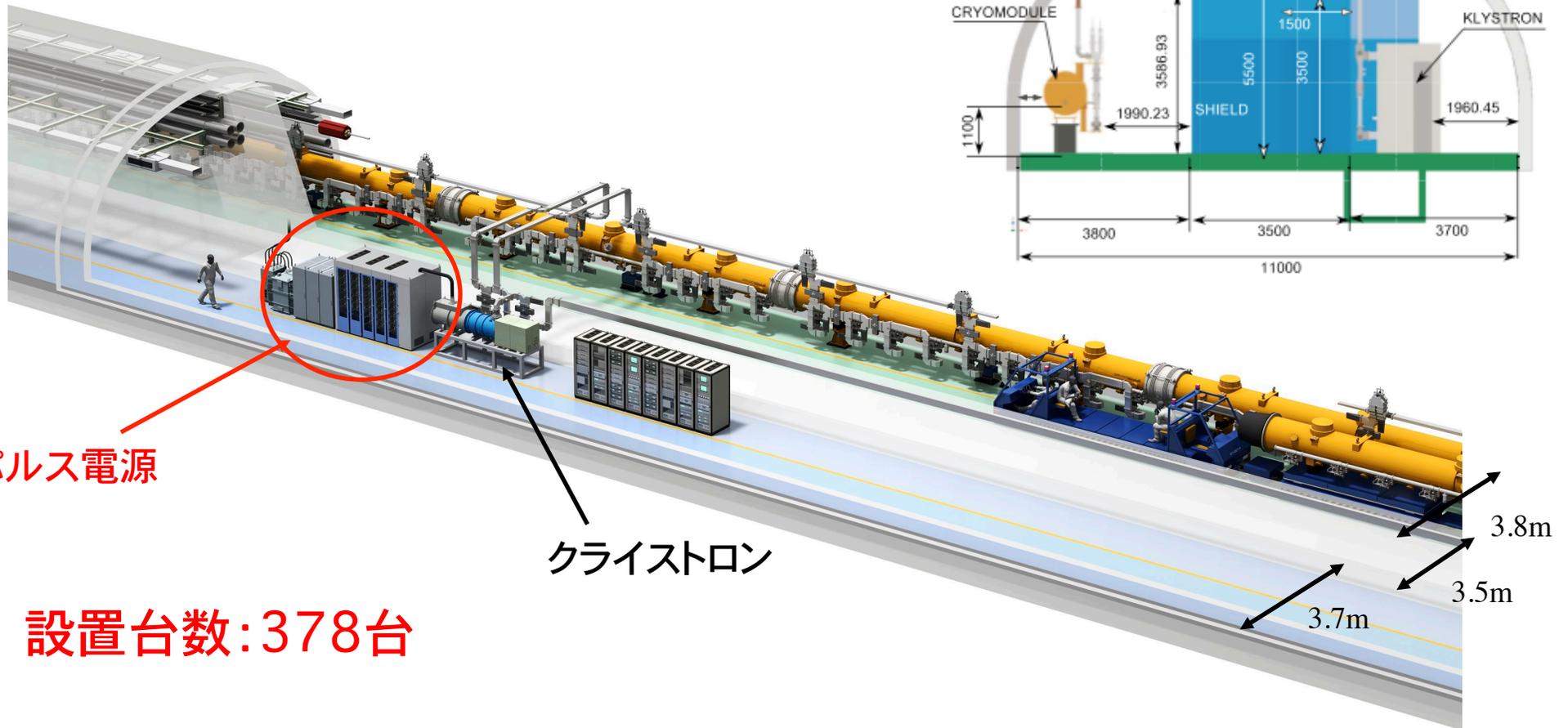
確実な最重要研究対象	必要なエネルギー	直線 (ILC)
ヒッグス粒子	240 GeV	20 km
トップクォーク	350 GeV	24 km
2つのヒッグス同時生成	500 GeV	30 km
未知の領域	1000 GeV ~	50 km



Accelerator Laboratory

主リニアックRFシステムの構成

トンネルの断面図



パルス電源

クライストロン

設置台数: 378台

39 Cavities/57m

©Rey.Hori/KEK



Accelerator Laboratory

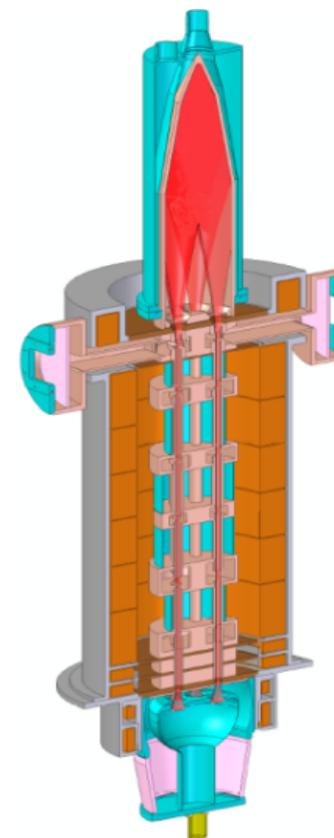
10 MW Multi-Beam Klystron

Specifications (Toshiba E3736)

- Operating Frequency 1.3 GHz
- RF Pulse Width 1.5 ms
- Peak Output Power 10 MW
- Number of Beams 6
- Beam Voltage 120 kV
- Beam Current 140 A
- Micro-Perveance 3.4
- Repetition Rate 5 pps
- Efficiency 60%



全長 3.15 m



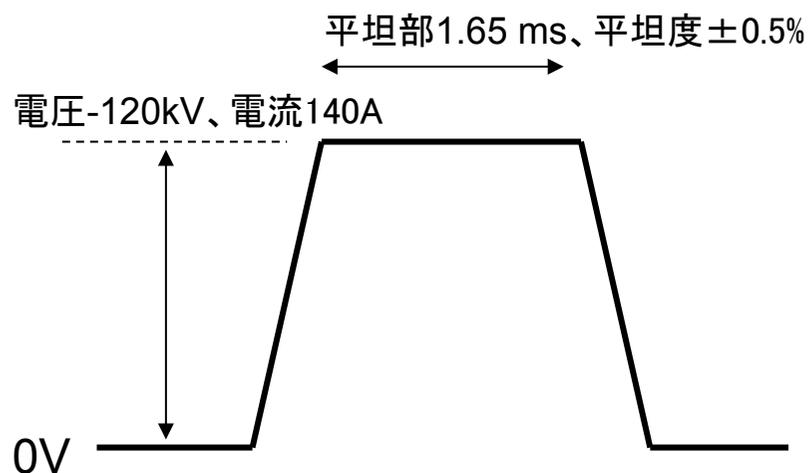
Toshiba E3736



Accelerator Laboratory

ILCクライストロン電源の仕様

パルス波形



クライストロンの印加波形

- パルス幅(平坦部)が長い 1.65 ms(1.76ms)
- パルス平坦度 ±0.5%
- 繰返し 5 Hz

パルス電源の仕様 (TDR)

Parameter	Unit	Specification
Output voltage	kV	120
Output current	A	140
Pulse width	ms	1.65
Pulse repetition frequency	Hz	5 (10)
Max. average power	kW	139
Output pulse flat-top	%	±0.5
Pulse-to-pulse voltage fluctuation	%	±0.5
Energy deposited into klystron during a gun spark	J	< 20

電源の要求事項

- コンパクト
(トンネル内に配置)
- 低コスト
(約378台)
- 高稼働率
(24H長期運転)
- メンテナンスが容易



電源のコンデンサ容量

出力電圧Vは

$$V = V_0 e^{-\frac{t}{CR}}$$

コンデンサの放電により電圧の低下(サグ)の度合いを示したパラメータ、サグ率D

$$D = 1 - e^{-\frac{\tau}{CR}}$$

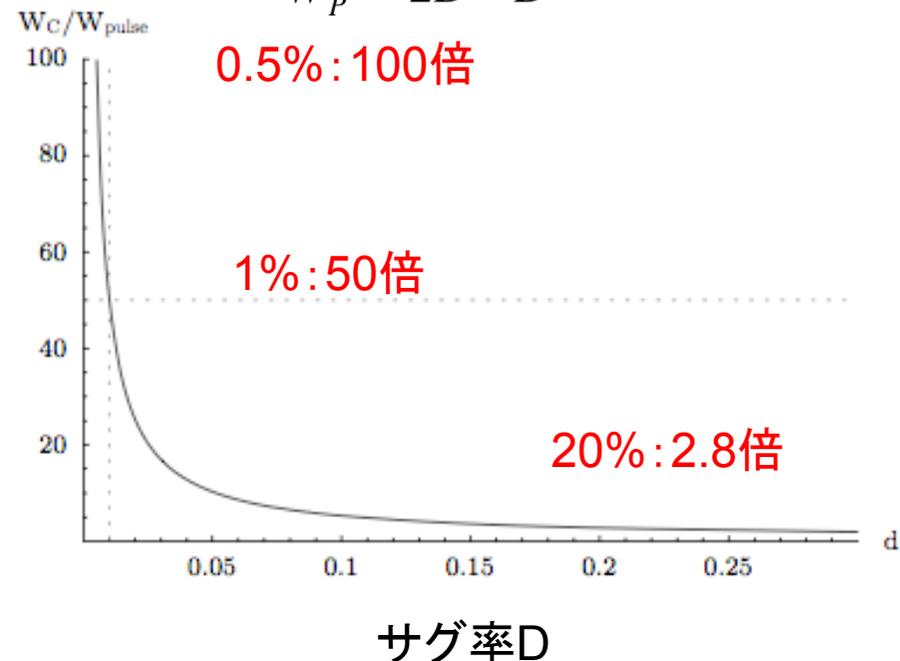
パルス幅が時定数CRより小さい場合($\tau \ll CR$),

$$D = \frac{\tau}{CR}$$

D: 1%と20% を比較すると、約18倍のコンデンサのエネルギー比になる。

コンデンサのエネルギー(W_C)と出力パルスのエネルギー(W_P)の比

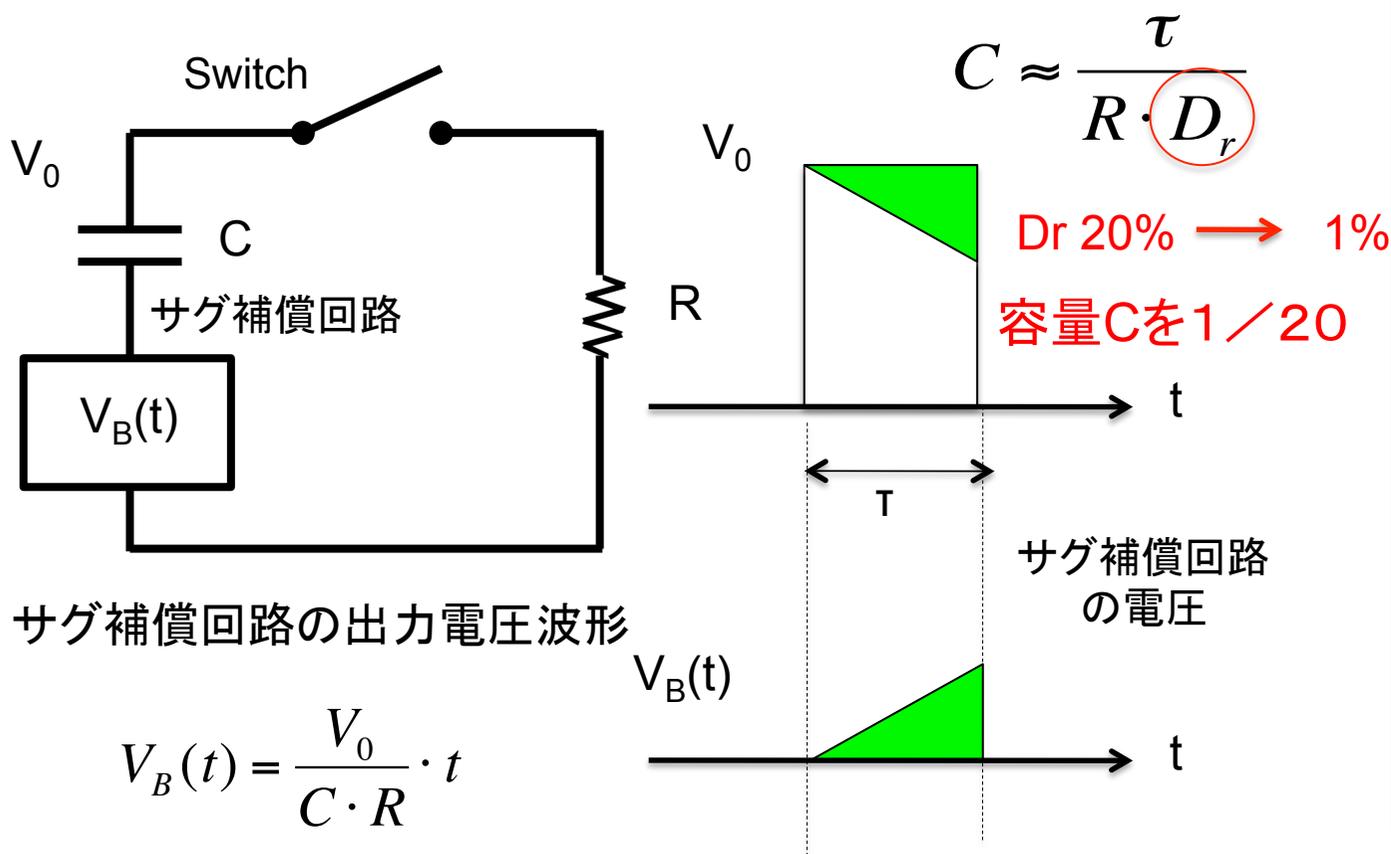
$$\frac{W_C}{W_P} = \frac{1}{2D - D^2}$$





コンデンサバンクの小型化

サグをどう補償するか？



サグ補償回路

- バウンサー方式 (LC共振)
大型、調整幅が固定



- チョッパ方式
PWM制御で三角波
- マルクス方式

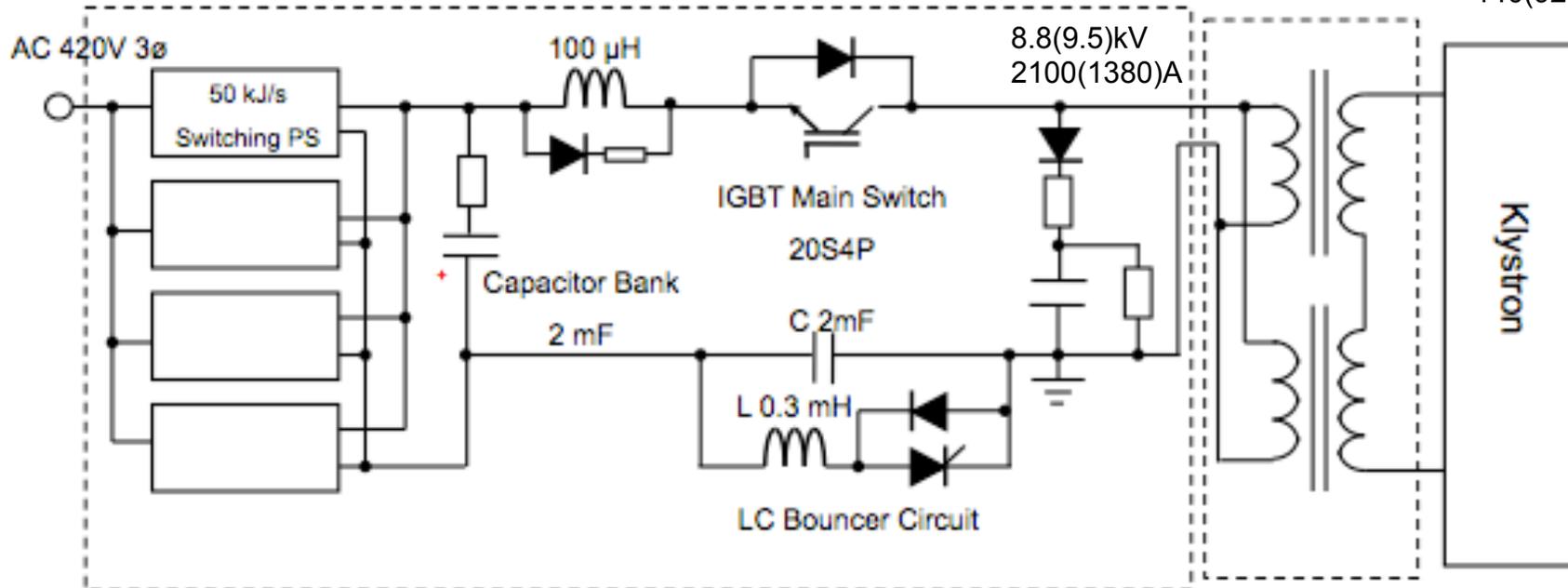
C: コンデンサバンク容量、R: 負荷抵抗値



Accelerator Laboratory

バウンサー型パルス電源(STF#2)

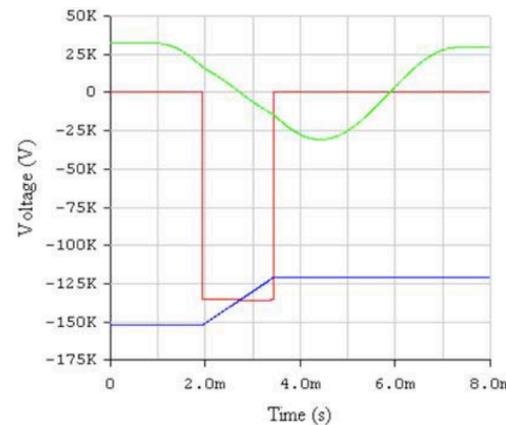
120(130)kV
140(92)A



Main Cabinet

Pulse Transformer

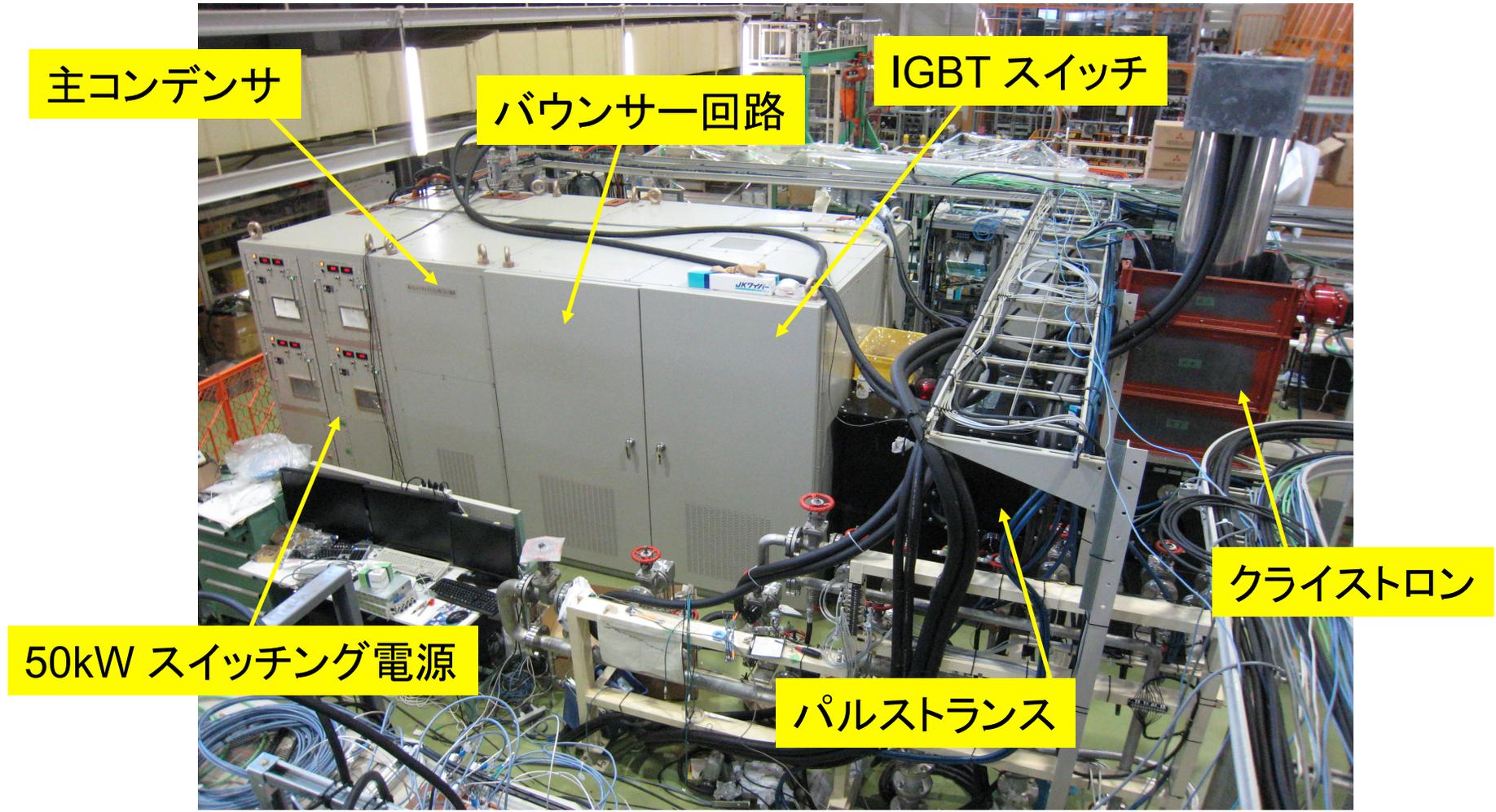
1:15





Accelerator Laboratory

STF Modulator #2の外観



電源本体 : 4.2m width x 2.2m depth x 2.2m height **パルストランスのサイズとコストが問題**

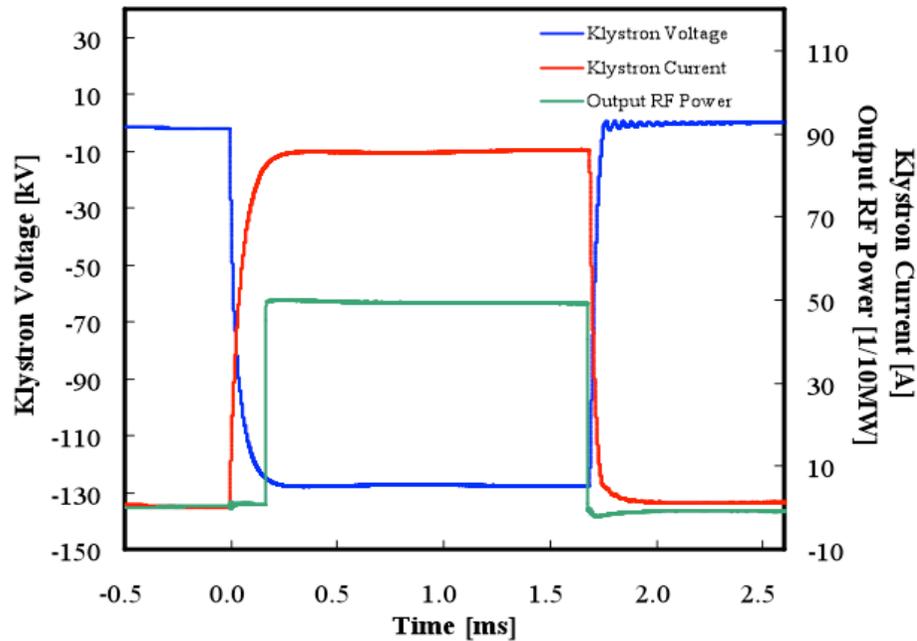
STF#3では3.8m (IGBT SW(1.2 kV 20S4P)からIEGT(4.5 kV 6S) SWへ)



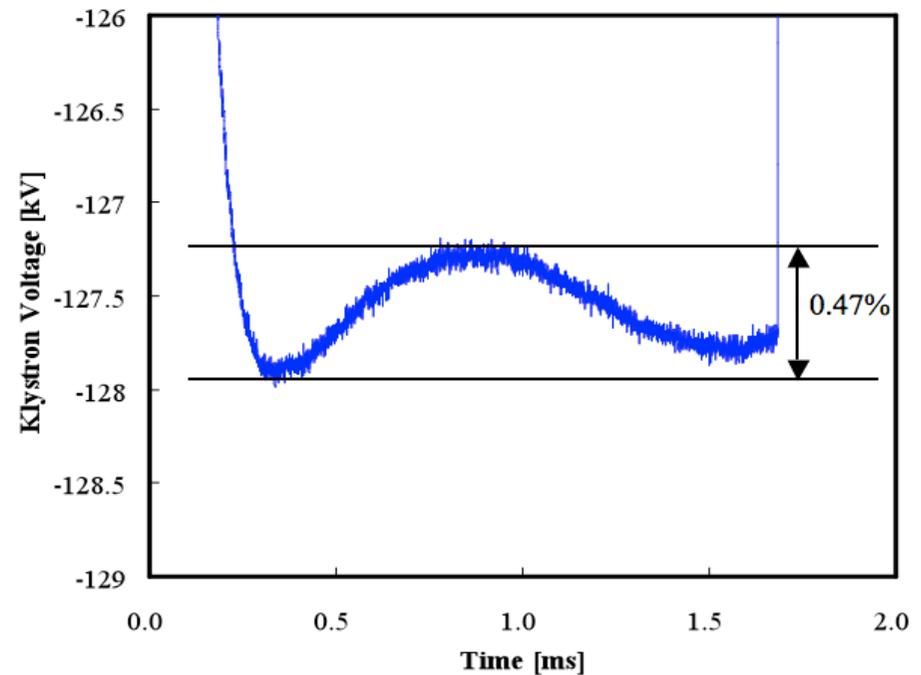
Accelerator Laboratory

5 MWクライストロン実運転時の波形(STF#2)

クライストロン波形全体



クライストロン波形平坦部



$E_s=9.6$ kV, $P_w=1.70$ ms, $f_r=5$ pps
 $T_d=456$ μ s

Rise-time(10-90%)=0.92 μ s

20% droop → 0.5%



Accelerator Laboratory

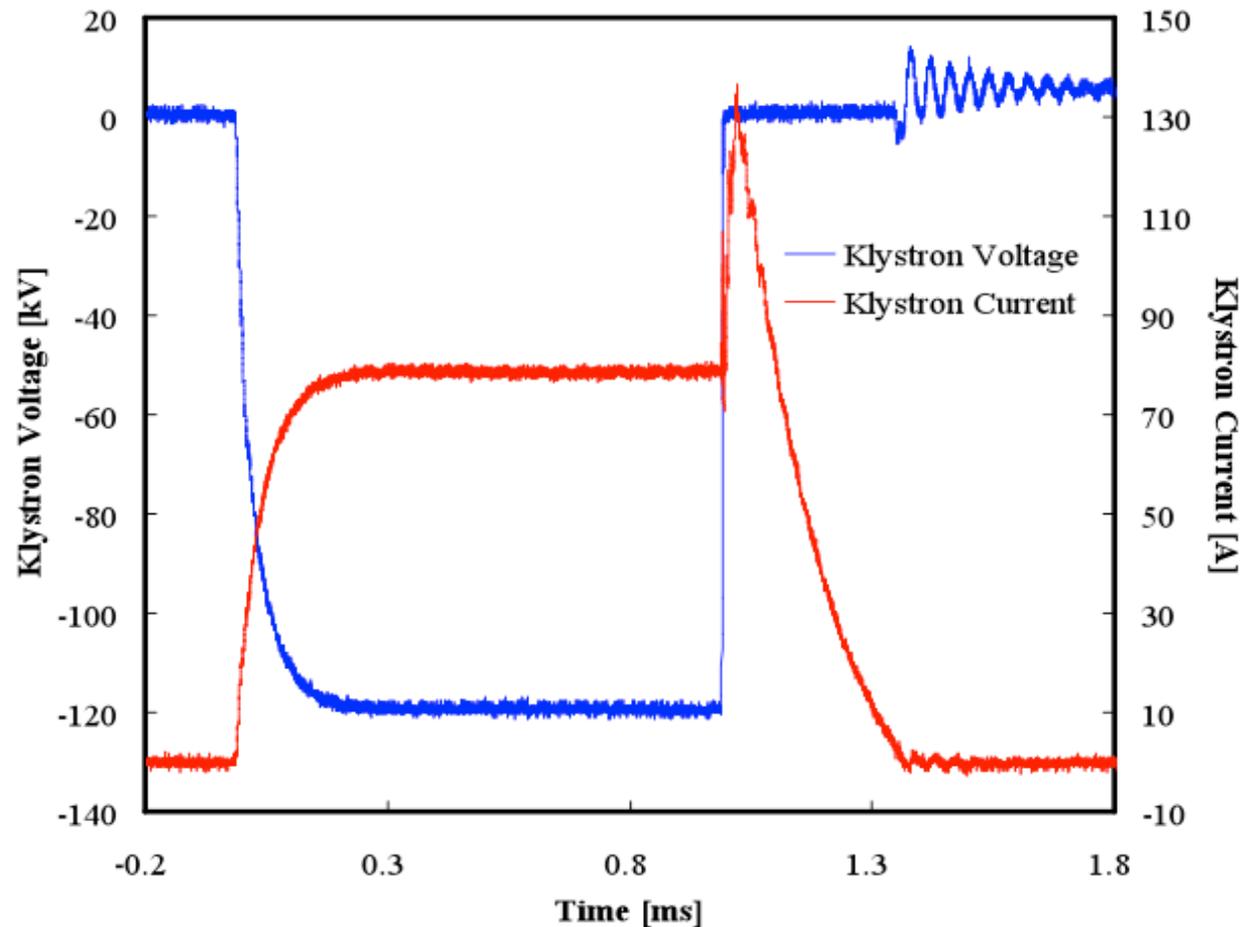
5MWクライストロンの短絡時(STF#2)

クライストロンへの注入
エネルギーW

アーク電圧 = 100 V

$$W = 100V \cdot \int I_k dt$$

W=2.0 J < 許容エネルギー20 J

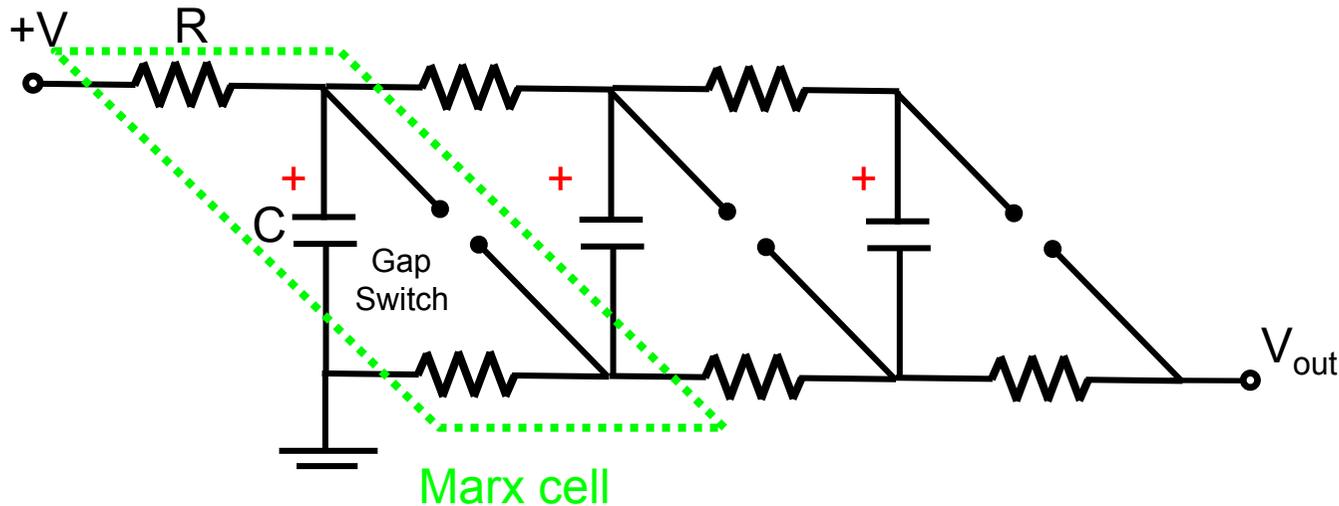


Es=9.0 kV, Pw=1.7 ms, fr= 5 pps



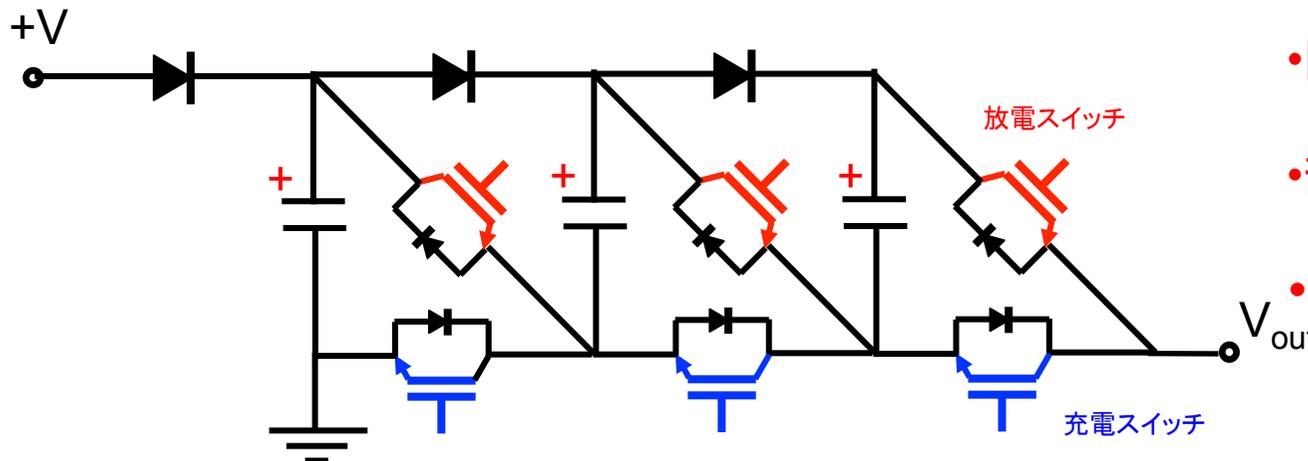
Marx回路方式の動作原理

- Classic Marx circuit (1923年 Erwin Marxによる発明)



- 並列で充電
- 直列で放電
- 段数倍の電圧を出力

- Solid state Marx circuit (2000年 A. Krasnykh)



拡張性と柔軟性に富む

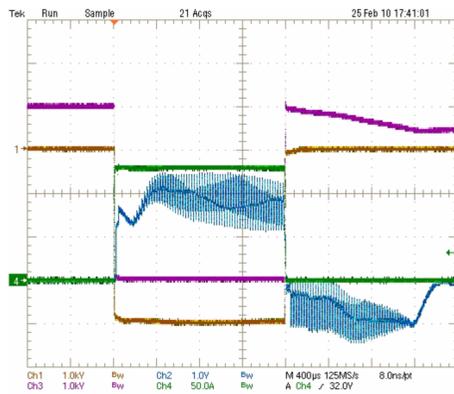
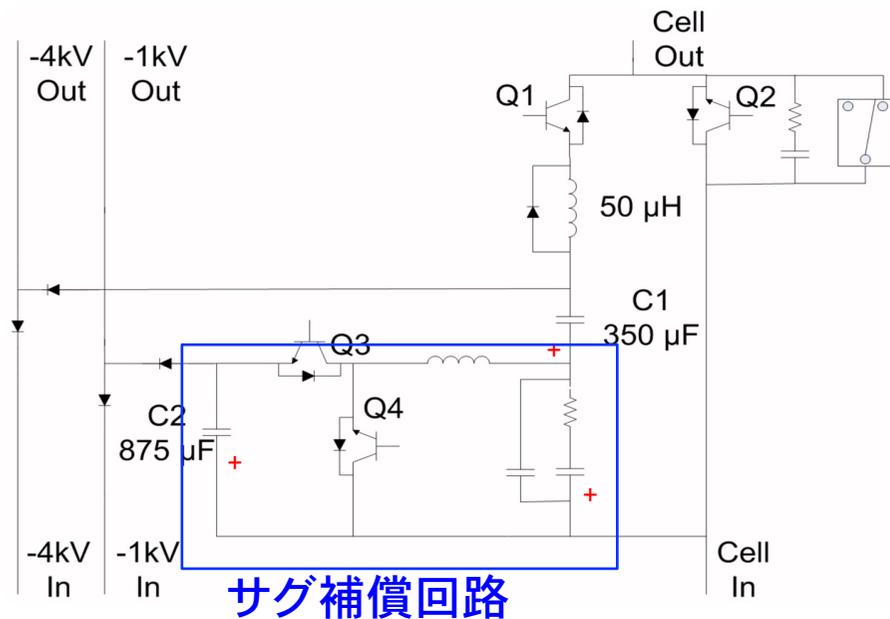
- 回路がブロック構造
量産に向く
- 部品の耐圧は充電電圧
低価格化できる
- 各段独立に ON/OFFできる
波形のデジタル制御



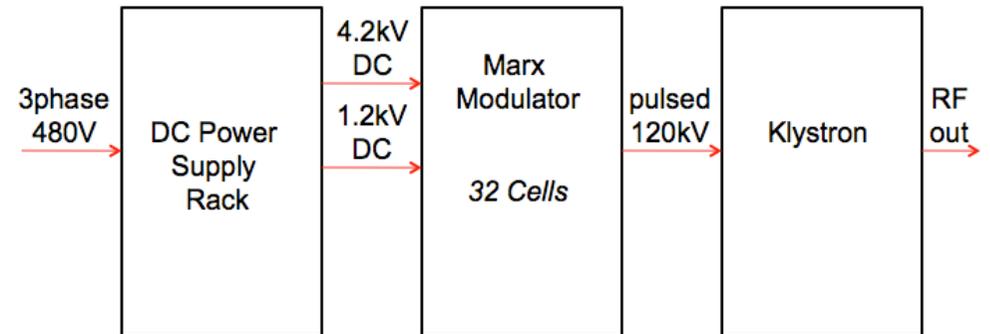
Accelerator Laboratory

P2 - Marx Modulator(SLAC)

- SLAC P2 Marx Cell



Cell Output Current
Cell Output Voltage
Main IGBT V_{ce}
PWM Inductor Current



- 32 Cells
- 3.75 kV Nominal Cell Voltage
- N+2 Redundancy (4 kV Max)
- 350 μ F Cell Capacitance
- One-cell 20% Droop Compensation
- Active, closed-loop control regulates output voltage
- Air Cooling/Insulating(No oil)
- Independent Charging Supplies
- FPGA-based Diagnostic/Control Module



Accelerator Laboratory

P2 - Marx Modulator(SLAC)

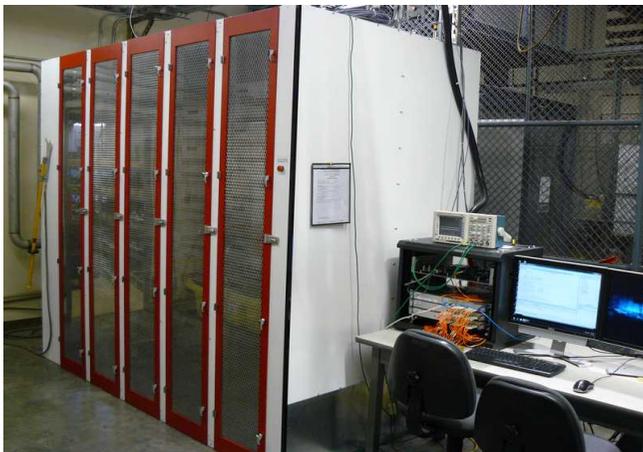
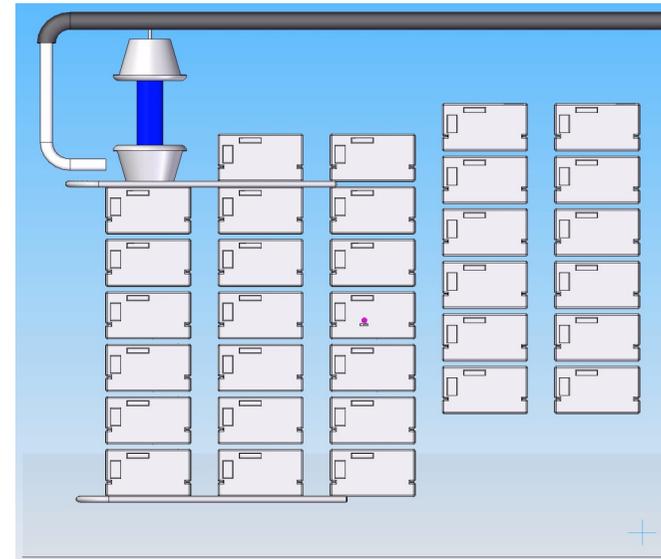
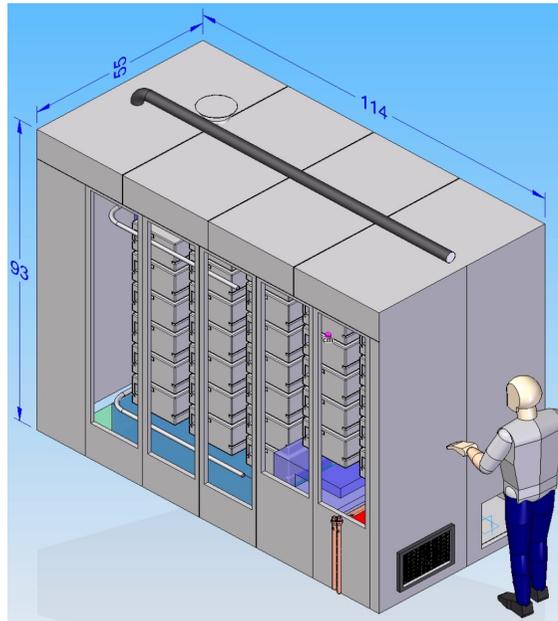
Layout

283 cm H

168 cm D

347 cm W

Oil-free
Easy access



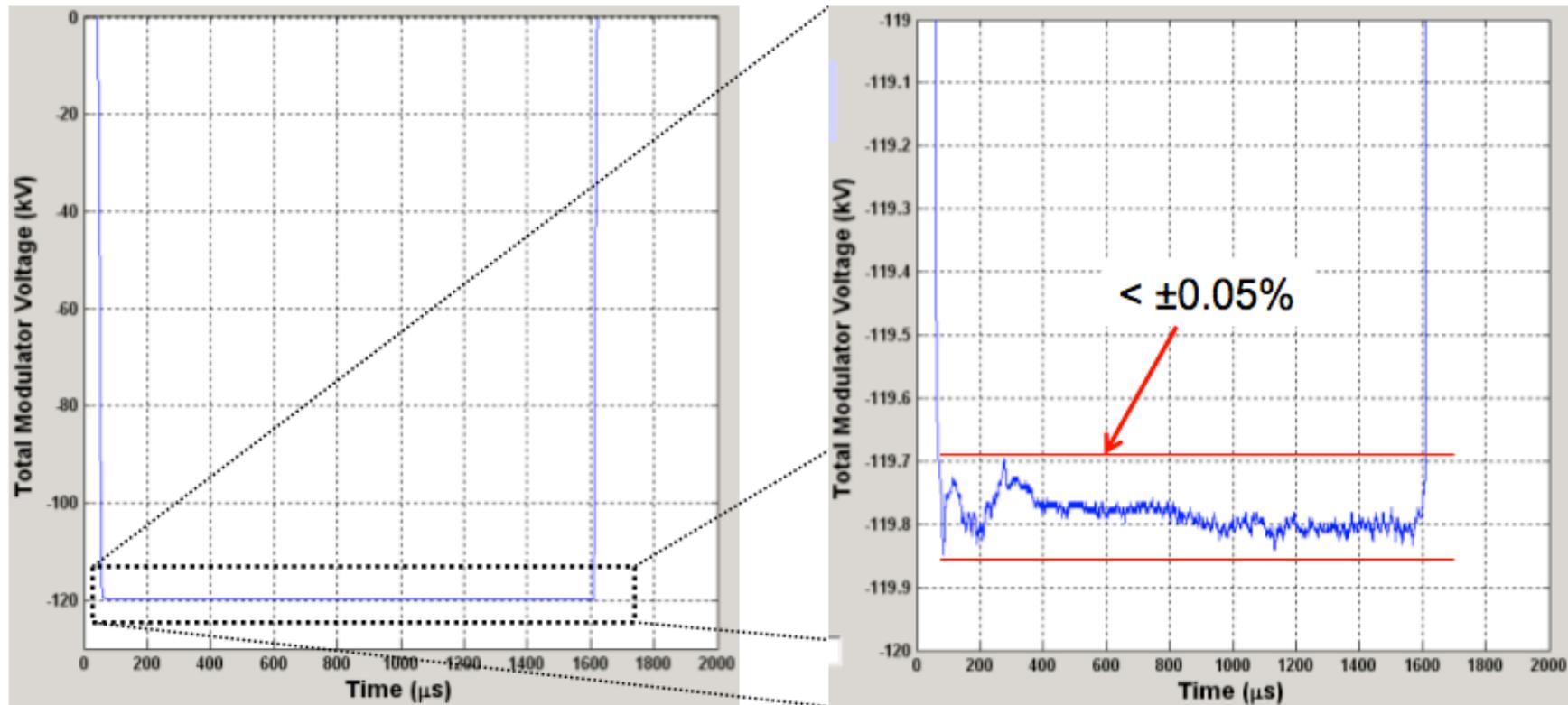
Marx cell : 22.7 Kg



Accelerator Laboratory

P2 - Marx Modulator(SLAC)

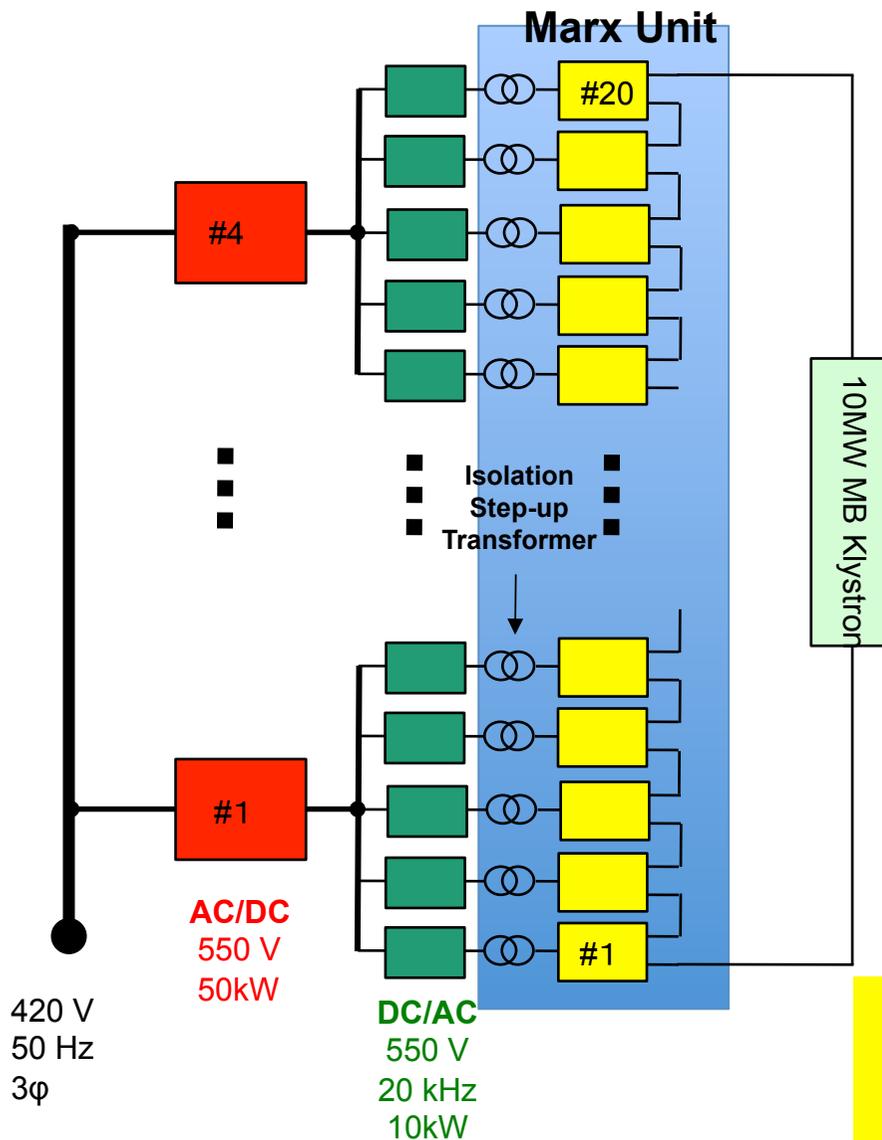
Performance



- DC to pulse efficiency of $>94\%$
- Active regulation demonstrated
- Pulse to pulse stability $<500\text{ppm}$ (not yet fully characterized)
- Ongoing fault/life testing



KEKチョツパ型Marx電源の開発



- チョツパ型DC-DCコンバータ(Marx セル) 80段(セル)を直列接続
1ユニットに4段(セル)、合計20ユニット
- 各ユニットは独立の高周波トランスを通して充電する。
- 1機能回路で、単純制御と小型化、低価格化を目指す。
- SiCパワーデバイスを採用(高効率化)

-120 k V
140 A
1.7 ms
5Hz



Marx Unit
AC/2kVDC/Flat Pulse
-6.4 kV, 140 A, 1.7ms,
5Hz



Accelerator Laboratory

KEK Marx型パルス電源



Size 1.6 m(D) x 3.3 m(W) x 2.3m(H)

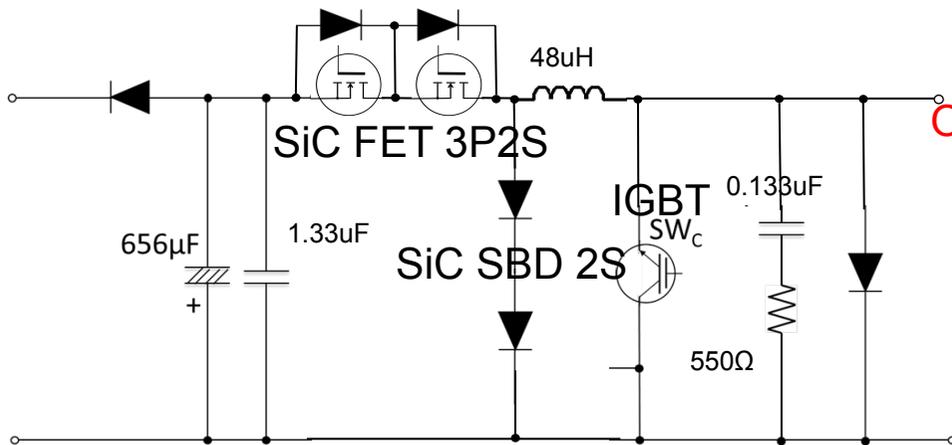


Accelerator Laboratory

Marx Cell(基板)

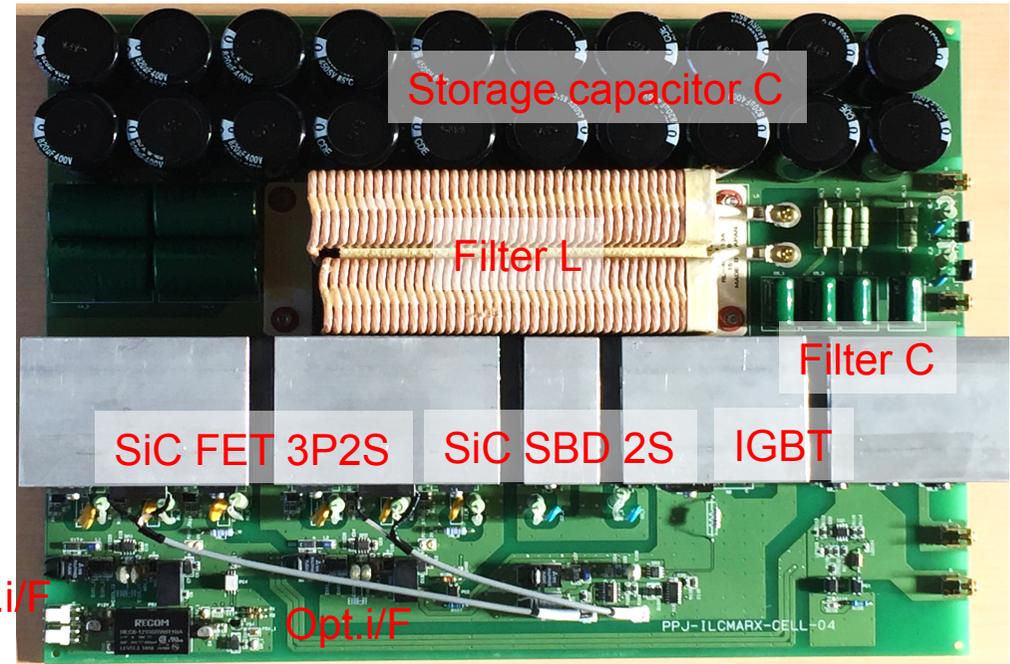
Marx cell parameters

Parameter	Value
Input voltage	-2.0 kV
Output voltage	-1.6 kV
Capacitor voltage droop	20%
PWM frequency	50 kHz



Circuit diagram of Marx cell

Marx Cell



400mm×300mm×75mm(H)

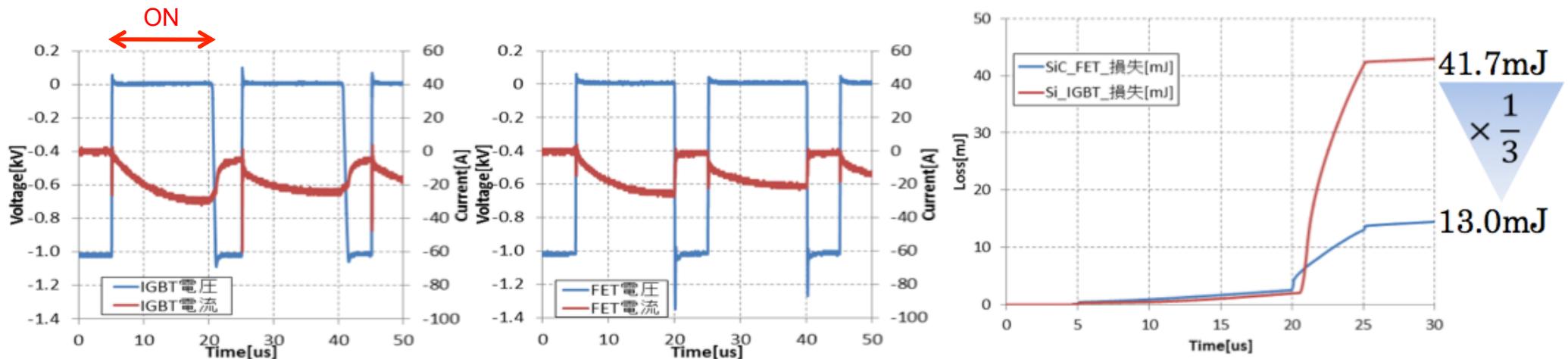
- SiC power devices(1.2 kV FET, SBD)
- 出力電力効率: 93%.
- 光ケーブル: トリガー信号、制御信号ON, Ready(2)



Accelerator Laboratory

SiC パワーデバイスによる高効率化

•Siデバイスと比べて1/3のスイッチングロス



Si IGBT: IXGK75N250
2500V, 75A

SiC FET: SCH2080KE
1200V, 40A
2S3P

Switching loss(1 cycle)

•Frequency: 50 kHz、Duty cycle :75%、Charging voltage :1 kV

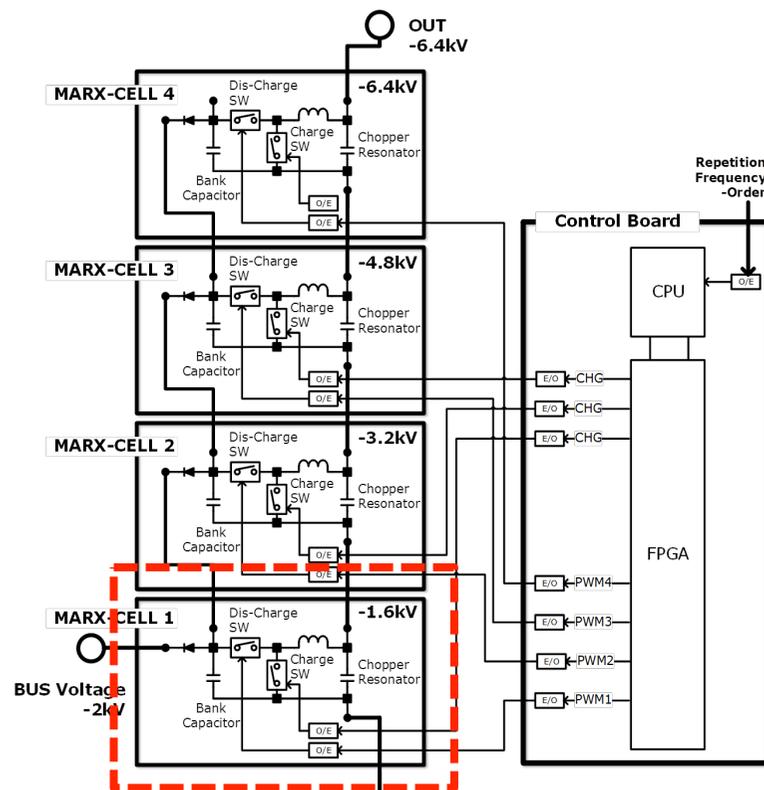


Marx unit

Marxユニットは4段のチョッパ回路でスイッチはFPGAで制御される。

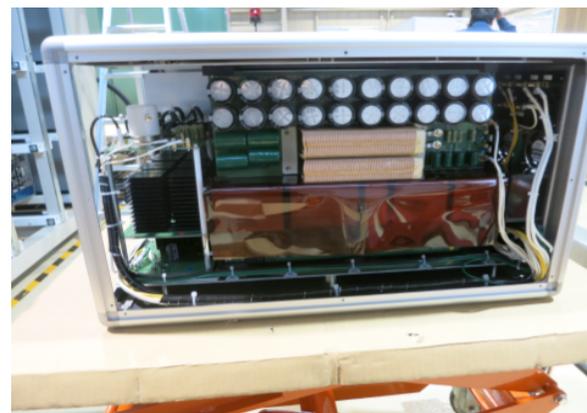
Marx unit parameters

Parameter	Value
Input voltage	2.0 kV
Output voltage	-6.4 kV
Capacitor droop	20%
Number of Marx cell	4



Marx cell (Step-down converter)

Block diagram of Marx unit

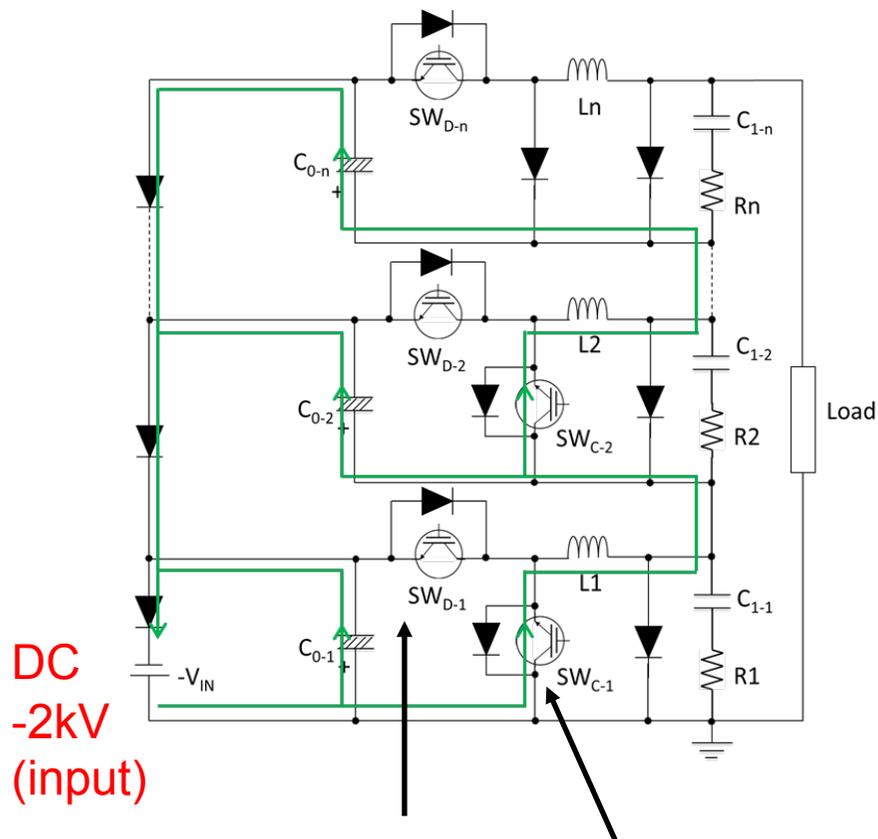


455mm×650mm×382mm(H)



Marx unitの動作

Charging

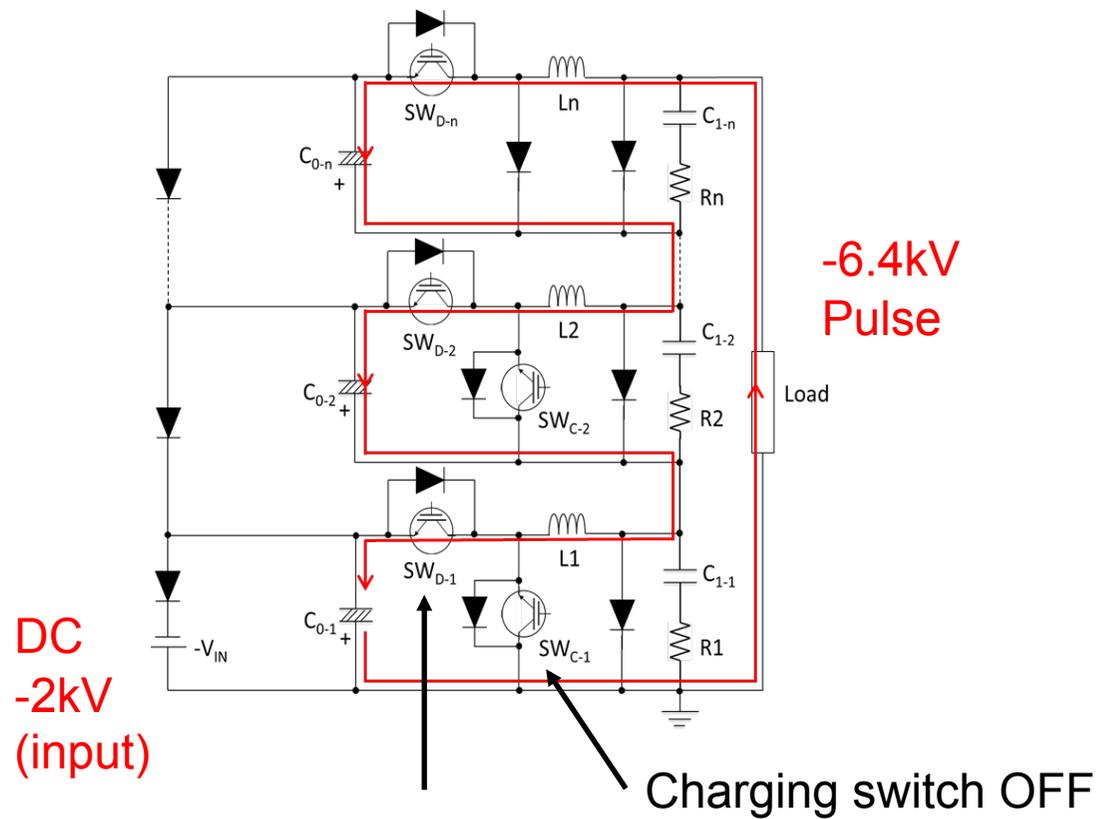


DC
-2kV
(input)

Chopping switch OFF

Charging switch ON

Pulsing



DC
-2kV
(input)

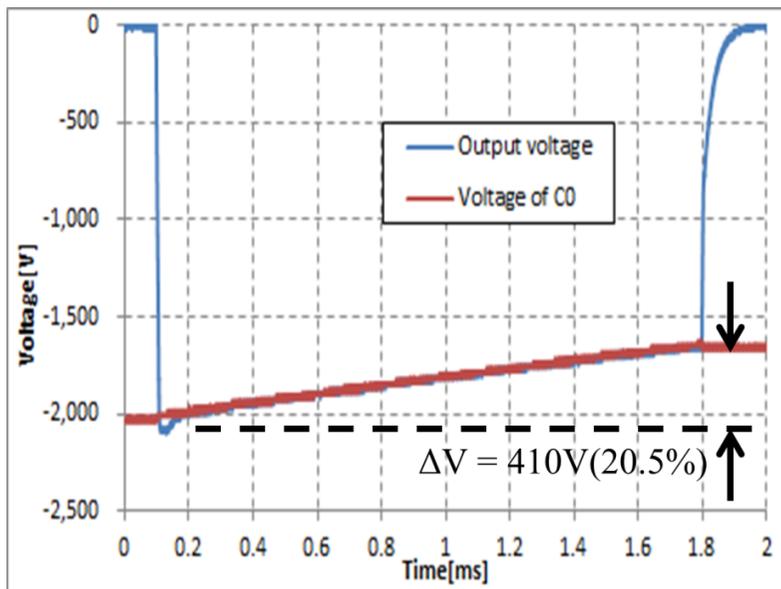
Chopping switch(50kHz)

Charging switch OFF

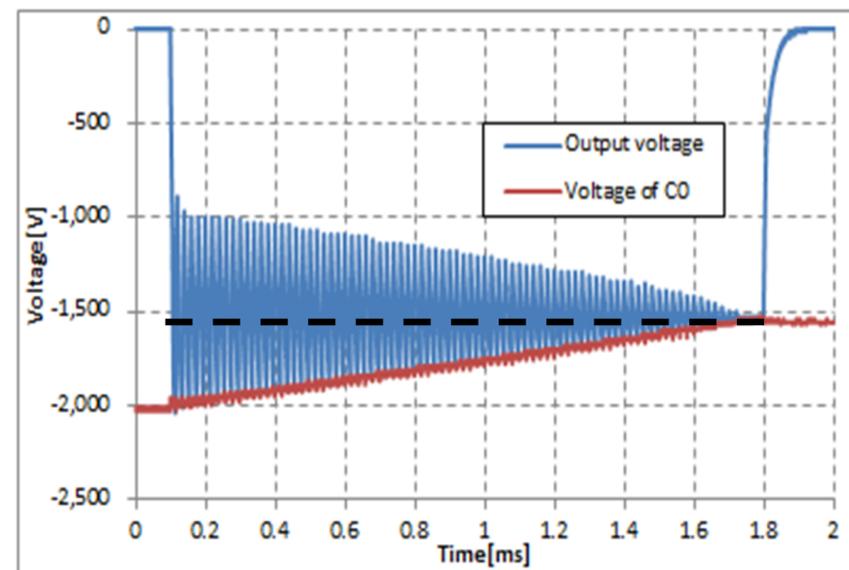
-6.4kV
Pulse



出力電圧波形のサグ補償(Marxセル)



Droop ratio: 20%



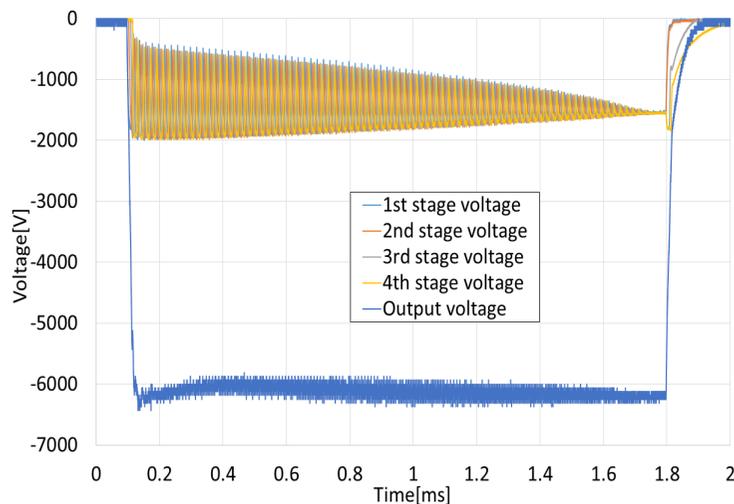
PWM duty cycle is increased from 76% to 95% in proportion to time.



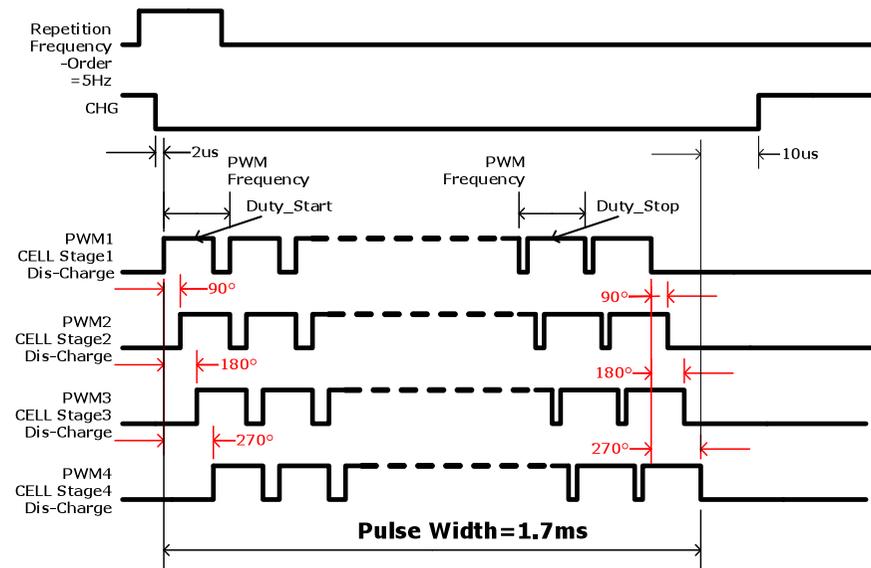
リップルの低減

Marxユニット: 各段のチョッパスイッチに90°の位相差制御

ユニットでの出力電圧波形



4セルのスイッチ信号のタイミング



Ripple ratio : 52% → 6%(for Marx unit)

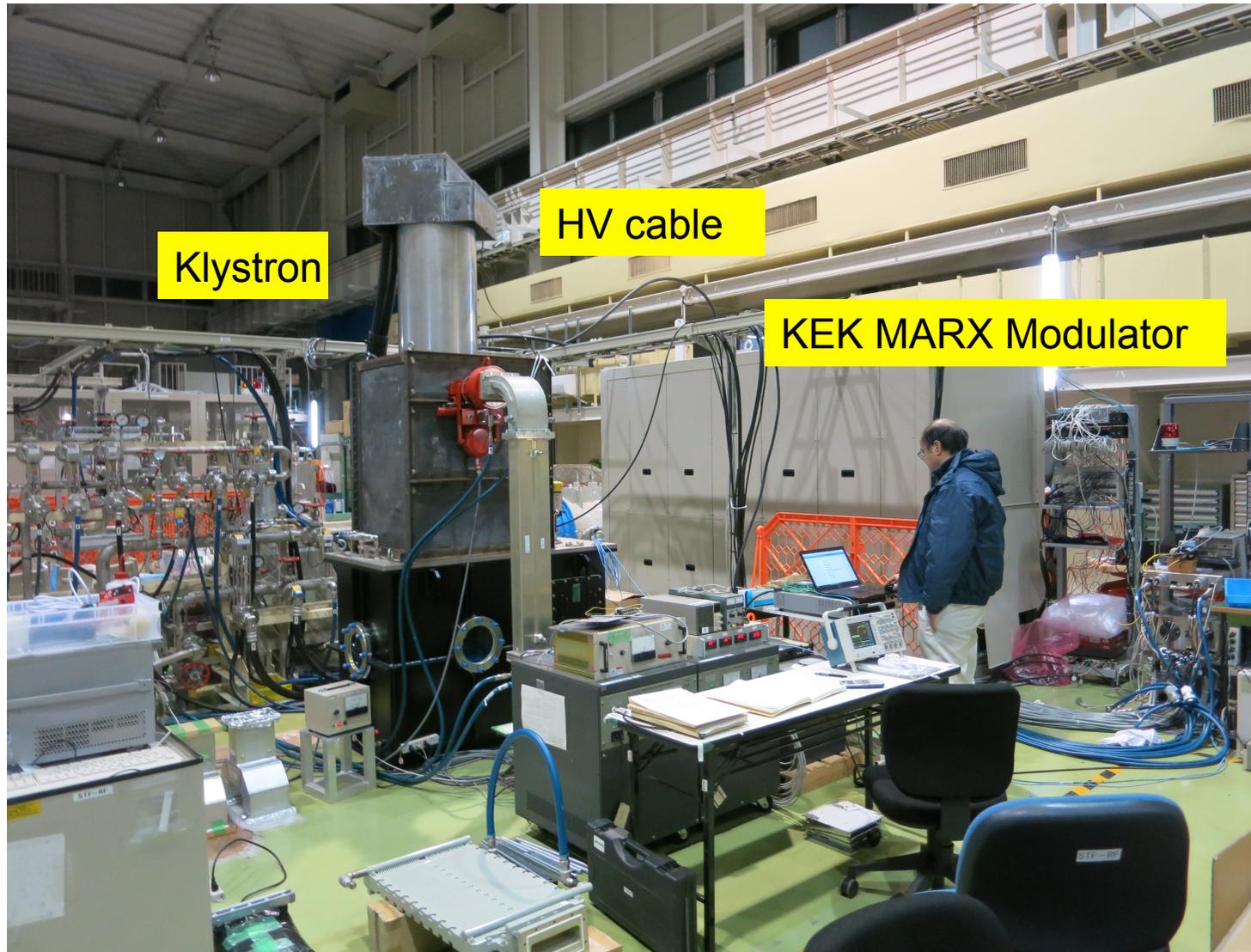
Each cell gate signal is shifted by 90 degrees.

全体: 各20ユニットに位相差制御してリップルを低減する。



Accelerator Laboratory

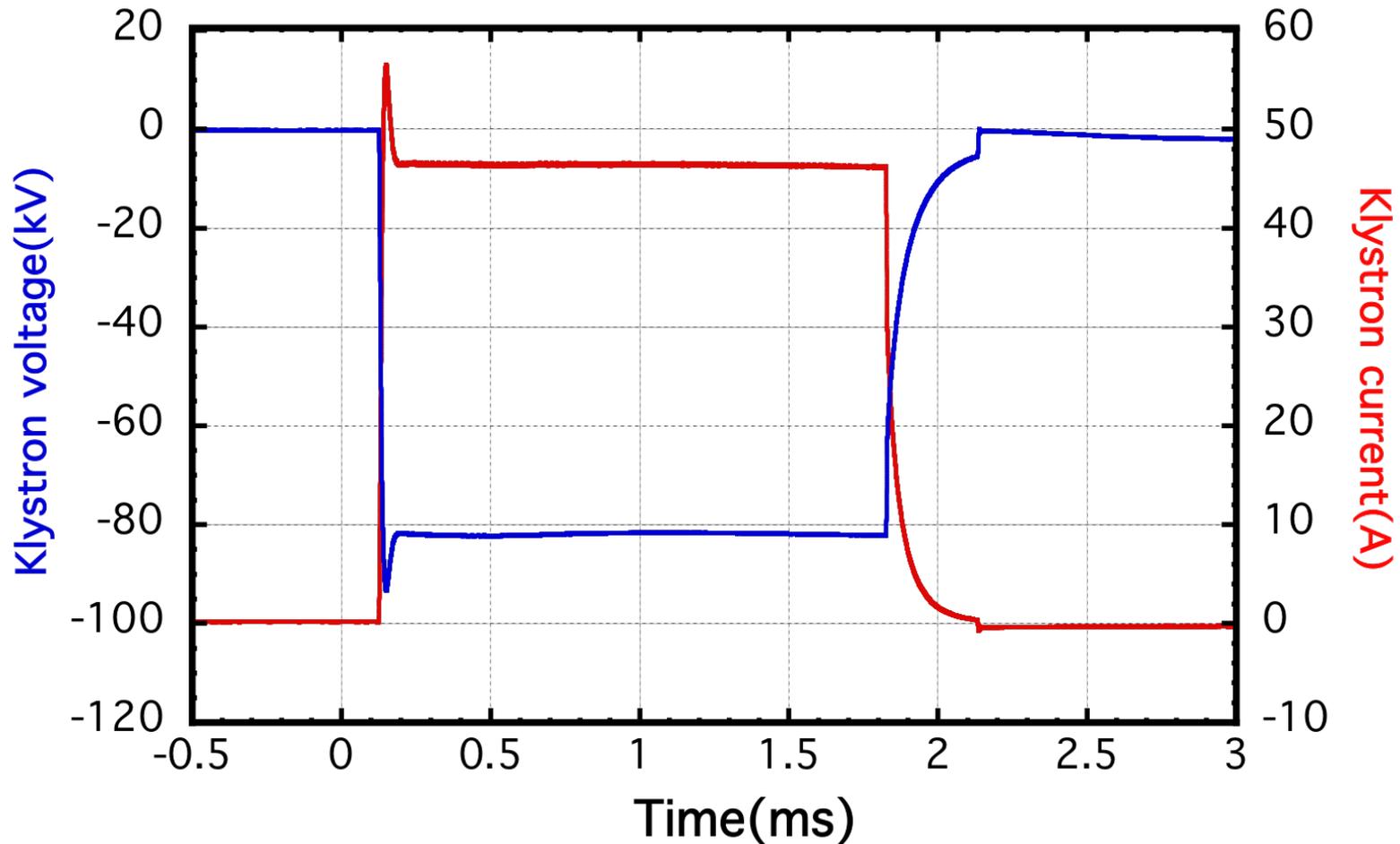
KEKチョッパ型Marx電源の高圧試験





Accelerator Laboratory

Klystron voltage and current waveforms

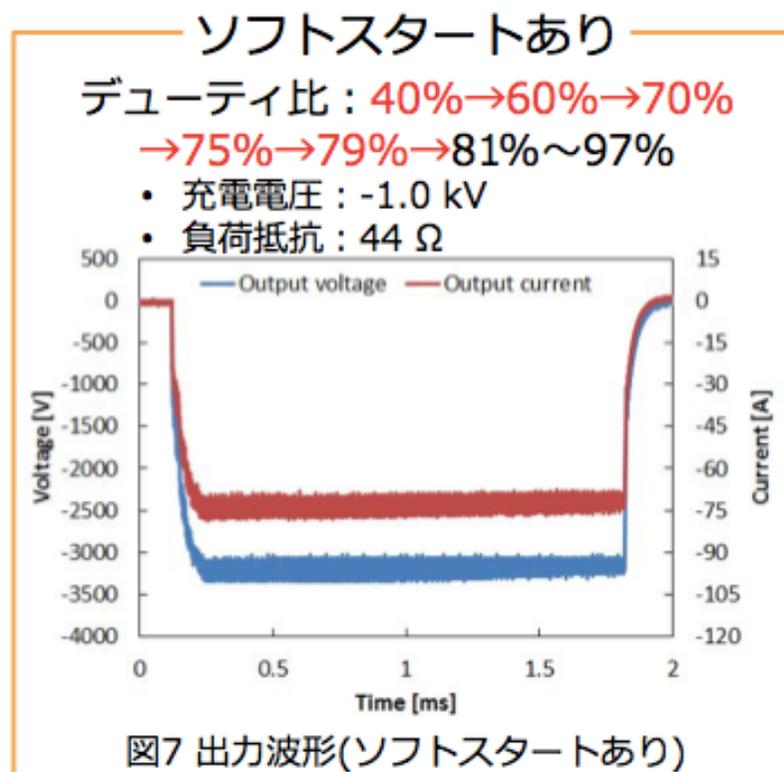
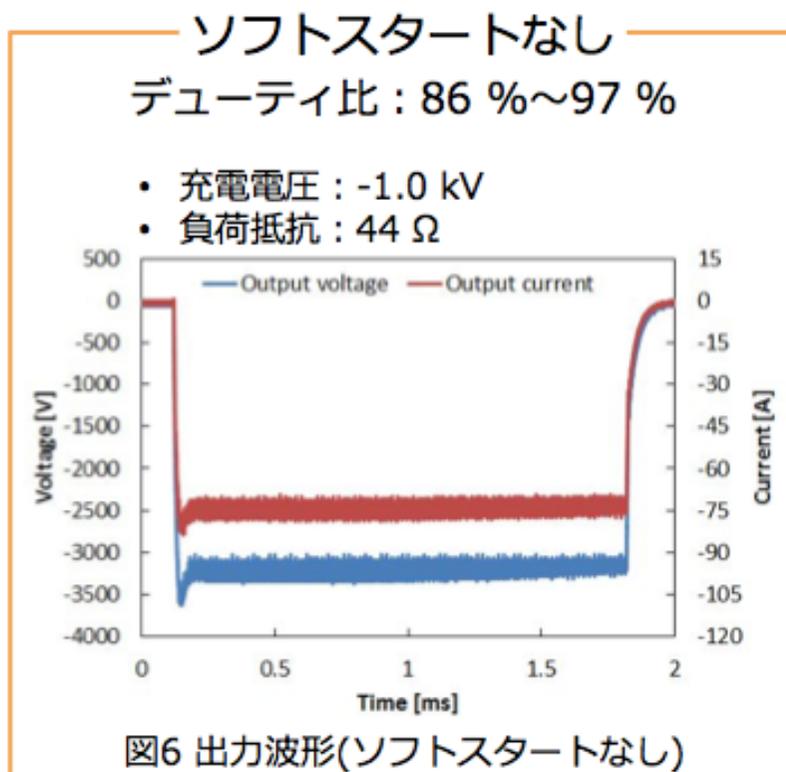


82kV, 46A, 1.7ms, Ripple 0.3%, Duty cycle 86-97%, Flatness 1%(p-p), Charging voltage 1200V



ソフトスタート試験

1 ユニット オーバシュートの抑制





まとめ

- (1) ILCクライストロン電源はMarx型電源がベースラインになる。
- (2) アナログ電源(単電源、単スイッチング)から
デジタル電源(多電源接続、高速スイッチング)へ
 - ・柔軟性と拡張性に富む電源である。
 - ・パルス波形特性、コスト、サイズが格段に改善される。
- (3) KEKでは SiCデバイスをベースとしたチョッパ型Marx電源の開発を長岡技術科学大学とパルスパワー技術研究所との共同研究で進めている。



Accelerator Laboratory

謝辞

チョツパ型Marx 電源の開発にあたりまして、長岡技術科学大学の江 偉華氏、須貝 太一氏、佐々木 尋章氏、株式会社パルスパワー技術研究所の徳地 明氏、澤村 陽氏に大変お世話になりました。この場をお借りしてお礼を申し上げます。