

SACLAにおける大電力RF機器 の高繰り返し化

近藤力¹⁾, 稲垣隆宏¹⁾, 櫻井辰幸¹⁾, 大島隆¹⁾, 恵郷博文²⁾
大竹雄次¹⁾

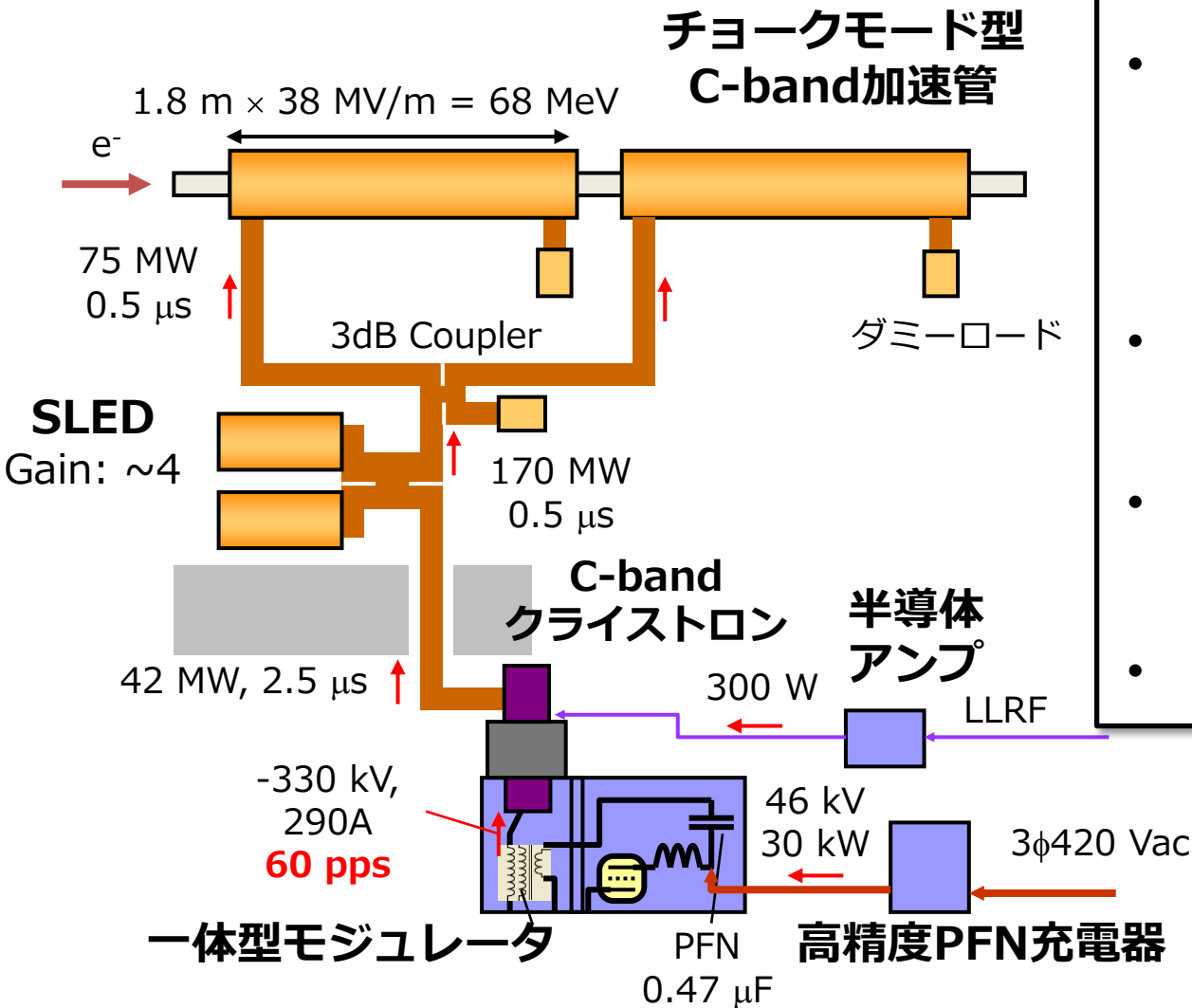
¹⁾ RIKEN SPring-8 Center, ²⁾ JASRI



発表内容

- 大電力RF機器の高繰り返し化の背景 & 目的
- 設計方針
- 開発機器
 - PFN充電器（インバーター方式高電圧電源）
 - モジュレータ電源
 - C-band加速管
- 動作試験
 - 電源試験
 - RF試験
- まとめ

SACLAのC-band加速システム



特徴

- 高いRF安定度
RF振幅. $< 0.01\%$,
RF位相. $< 0.2^\circ$
PFN充電電圧. $< 0.01\%$ (pp)
- 高電界加速
 $> 38 \text{ MV/m}$
- コンパクト
1unitあたり4m間隔
- 繰り返し 60pps(max.)

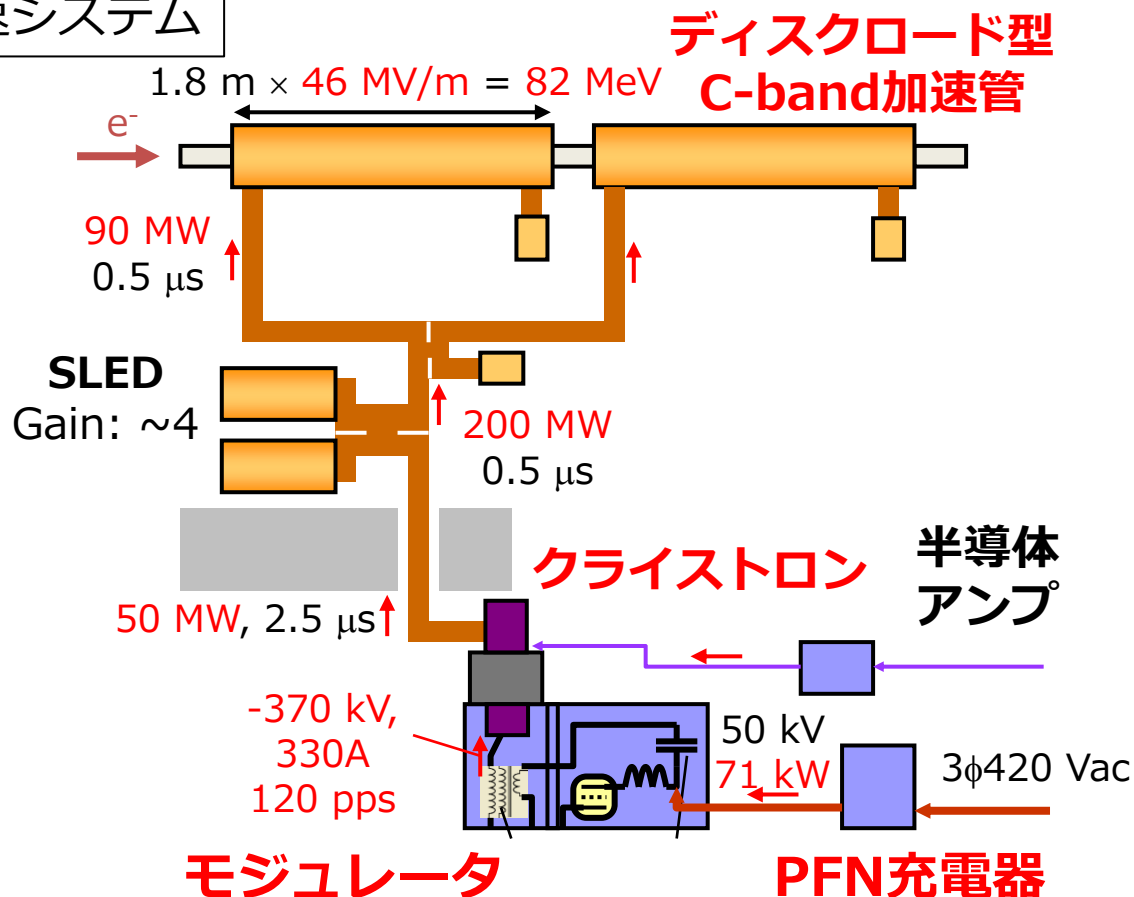
高繰り返し化への背景と目的

- XFELはシングルユーザーマシンであり、複数ビームライン化や高速振り分け計画されている。しかし、複数ライン化した場合は、X線レーザーの1ビームラインあたりの照射頻度は減少するため、これを補償するにはビームの繰り返しを増やす必要がある。
- 高繰り返し化という将来的な課題に対し、予備的な装置開発として、**120pps運転可能な**大電力RFシステムを製作し、実証試験を行う。

高繰り返しRFシステムの開発方針

- ① 既存システムの構成は同一とし、個々の機器の120pps化する
- ② 個々の機器は、既存機に要求されている性能を維持し、また既存機との互換性も持つ。

120pps用加速システム



120pps運転に向けた改良点

- PFN充電器(インバーター式高電圧電源)
 - 熱損失の増大(4kW→8kW) ; 電力変換の効率化
冷却強化...
 - 充電時間の短縮(15ms→7.5ms) ; 制御システムの改良
- モジュレータ
 - 熱損失の増大(5kW→8kW) ; 冷却能力の強化など
- クライストロン
 - 熱損失の増大(32kW→64kW) ; コレクタの強化
- C-band加速管
 - 熱損失の増大(1.6kW→3.2kW); 詳細な熱設計
 - 高電界化(~50MW/m)

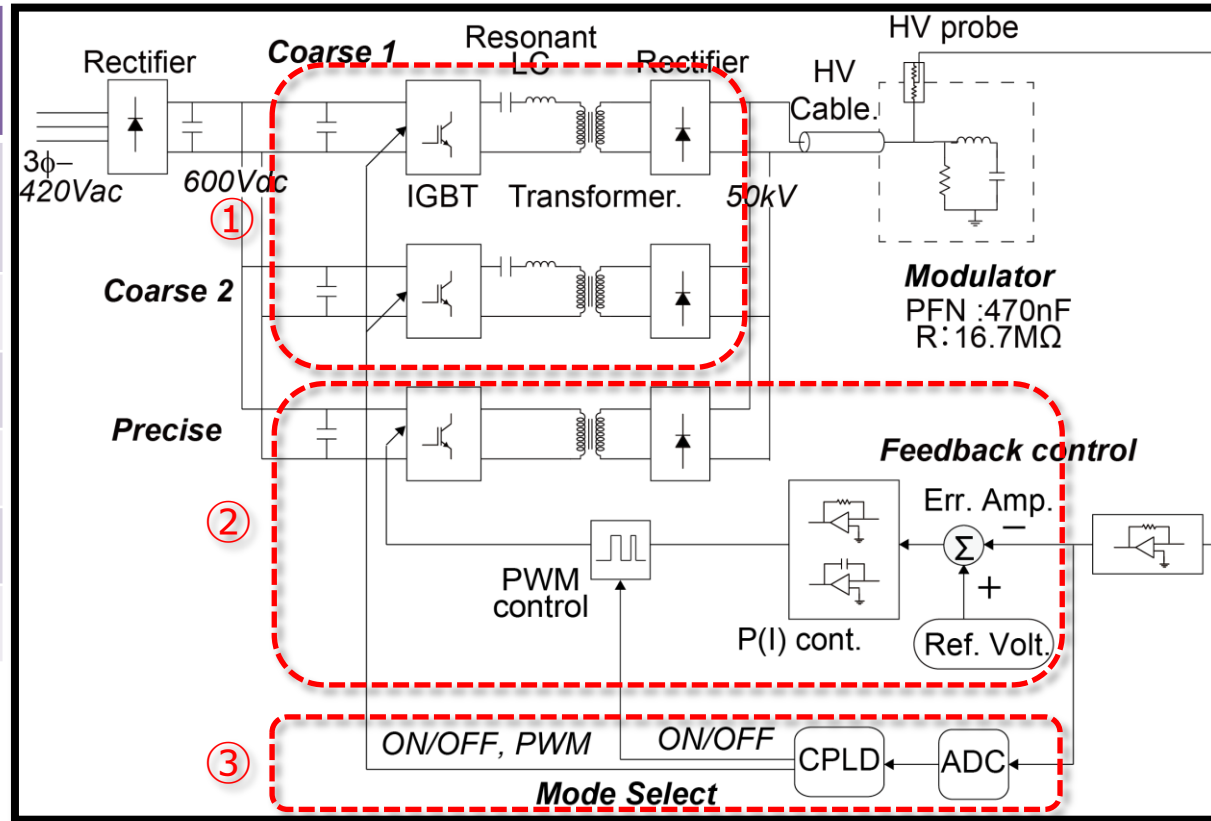
PFN充電器(インバーター式高電圧電源)

主な仕様

	60pps (既存)	120pps
負荷コンデンサ	470nF	
充電電圧	50kV	
安定度(pp)	100ppm以下	
充電時間	15ms	7.5ms
出力電力	35kW	71kW
熱損失	4kW	(8kW)

cf. SAP059 田中 et.al., “高精度充電器の開発”

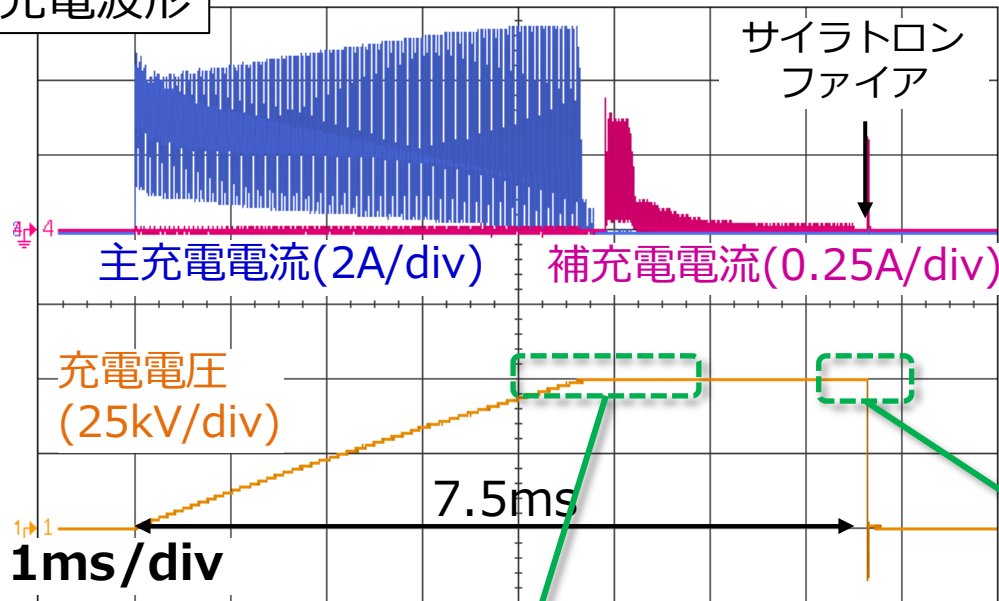
ブロック図



- ① 急速な充電 → 主充電ラインの2系統並列運転化
- ② 電圧高精度 & 高速整定 → 補充電ラインのPWM制御
- ③ スムーズな主補の切換 → 切換のデジタル制御

充電時間の短縮化の結果

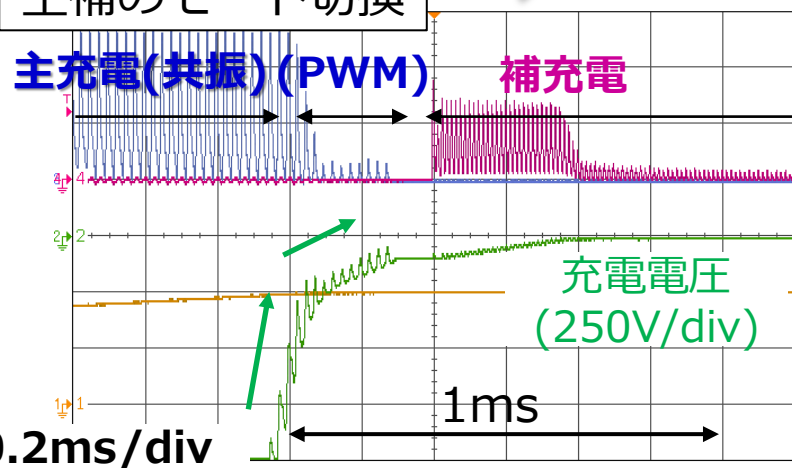
充電波形



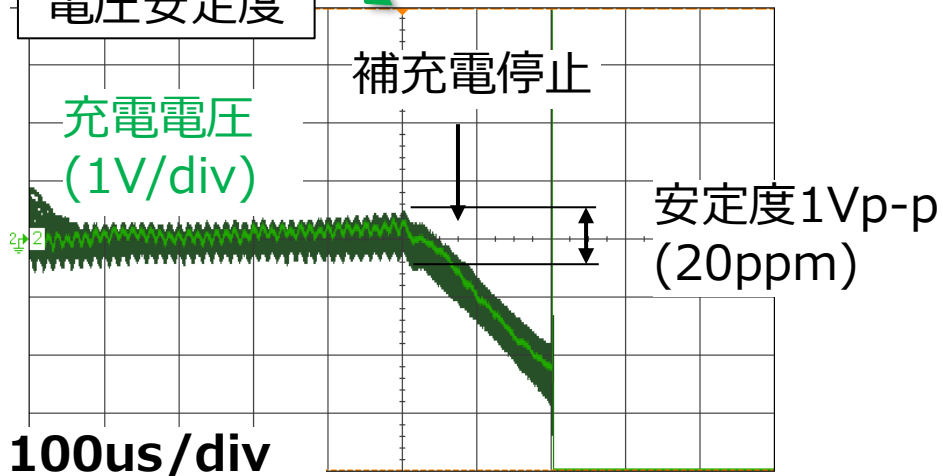
充電動作

- 昇圧時間： ~4.6ms/50kV
- 主補切換から整定まで： ~1ms
- **充電開始から整定完了： ~5.6ms**
- 安定度： 20ppm@50kV

主補のモード切換

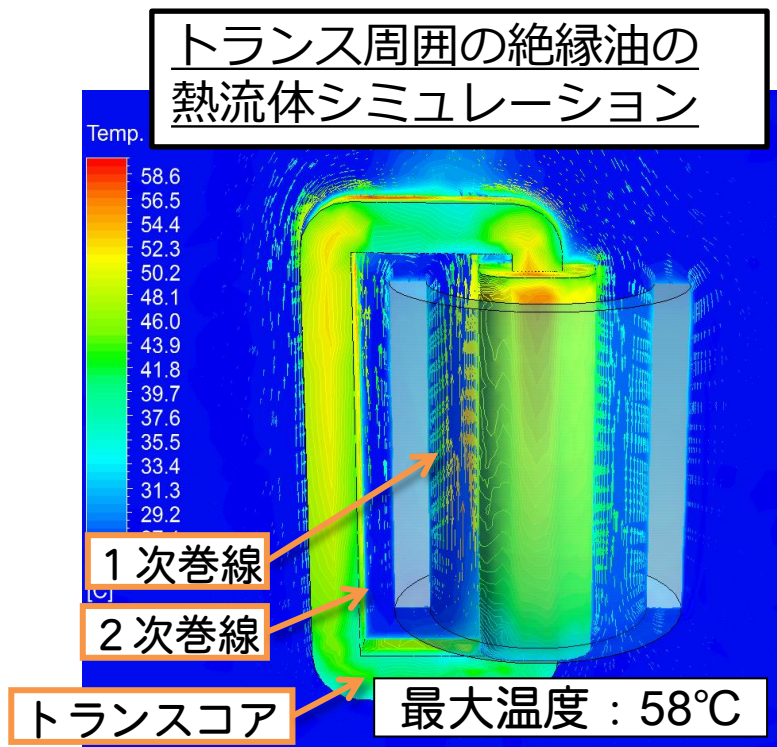


電圧安定度



熱対策

- 熱損失(推定:~8kW@120pps)の抑制
 - 太い配線の使用、トランスコアの増量、 etc.
 - 電力変換効率93%(実測)を達成。出力 70.5kWに対し熱損失 5.4kW。
- 内部絶縁油のスムーズな自然対流による冷却の効率化
 - 油の自然対流を妨げない配置を、シミュレーションにて検討
 - 試験機を透明水槽に入れ、実際の対流を確認



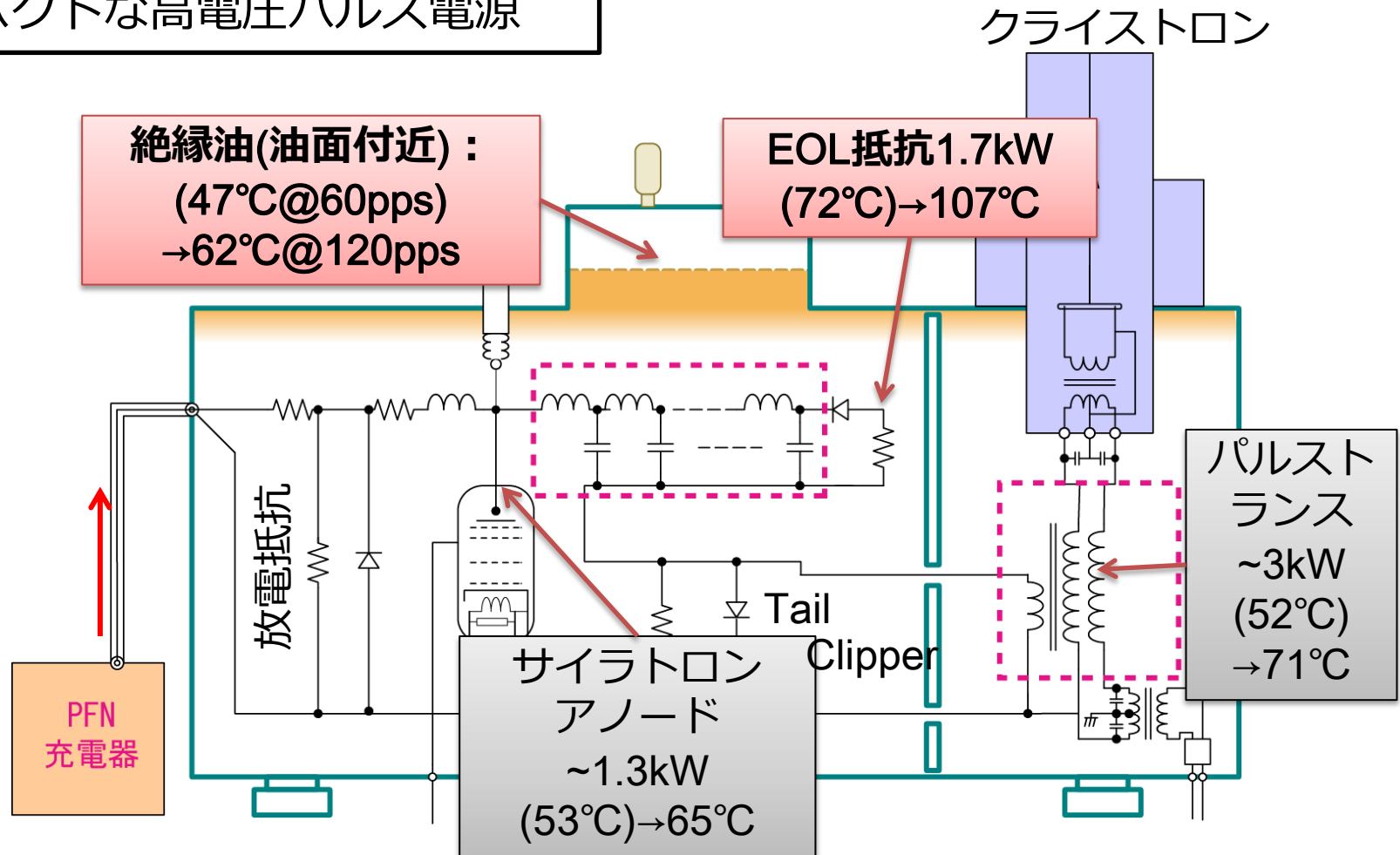
モジュレータ電源の発熱計算 & 温度推定

一体型モジュレータ

クライストロンとモジュレータを、
鉄製油密閉タンクに組み込んだ、
コンパクトな高電圧パルス電源

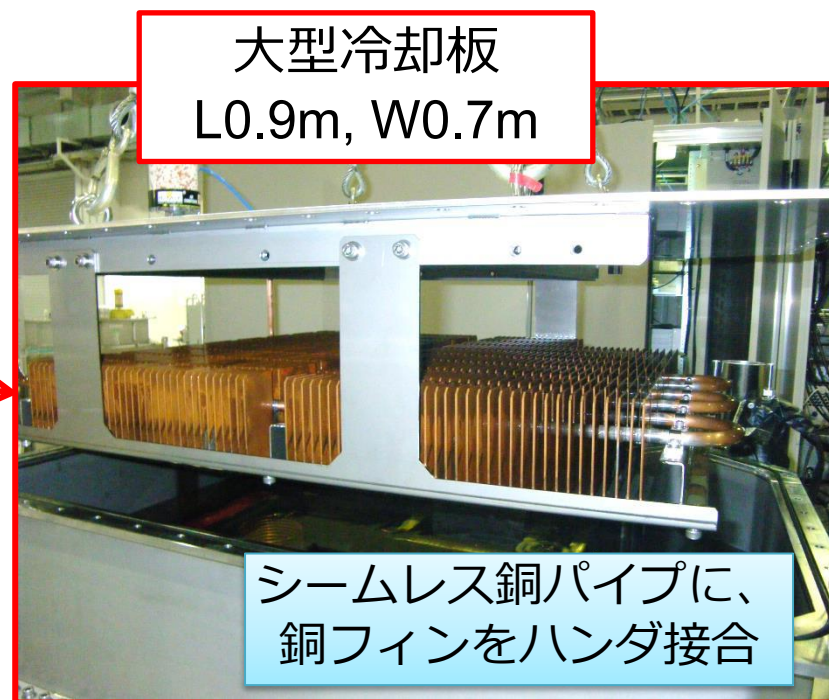
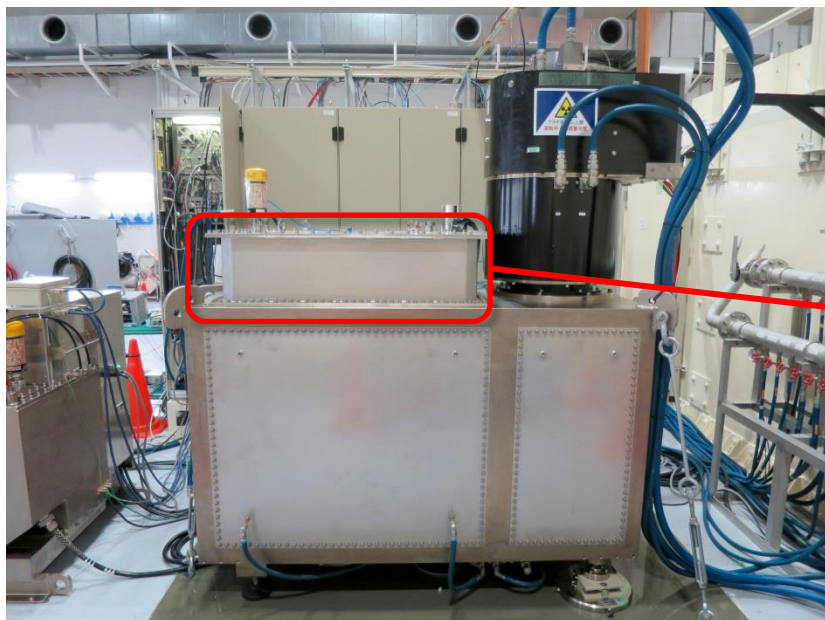
発熱推定方法

既存機の実測値より、120pps
運転時の発熱、温度を推定。



発熱対策

- 高発熱の抵抗体は本数を増やし 1 本あたりの熱負荷の軽減
例) EOL抵抗 : 6本→12本
- 絶縁油の冷却強化
自然対流を利用したファンレスを継承
新規開発したフィン付きの大型冷却板を上部タンクに設置



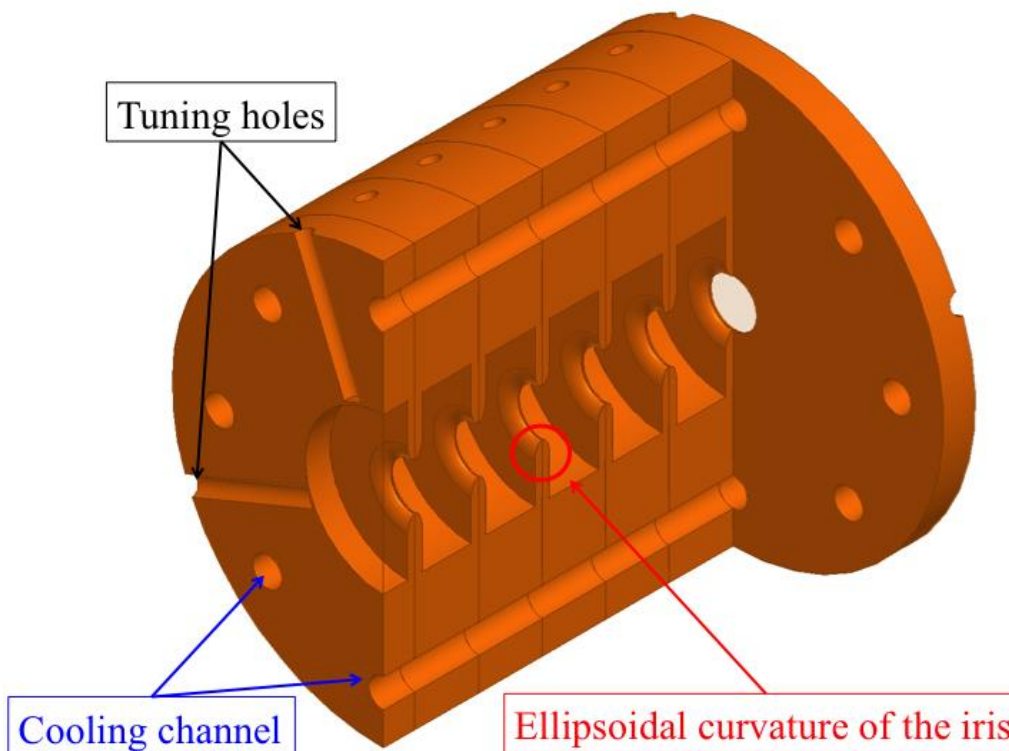
高繰り返し用C-band加速管の開発

120pps運転かつ高電界加速が可能なC-band加速管として、ディスクロード型加速管を新規に設計、開発

主なパラメーター

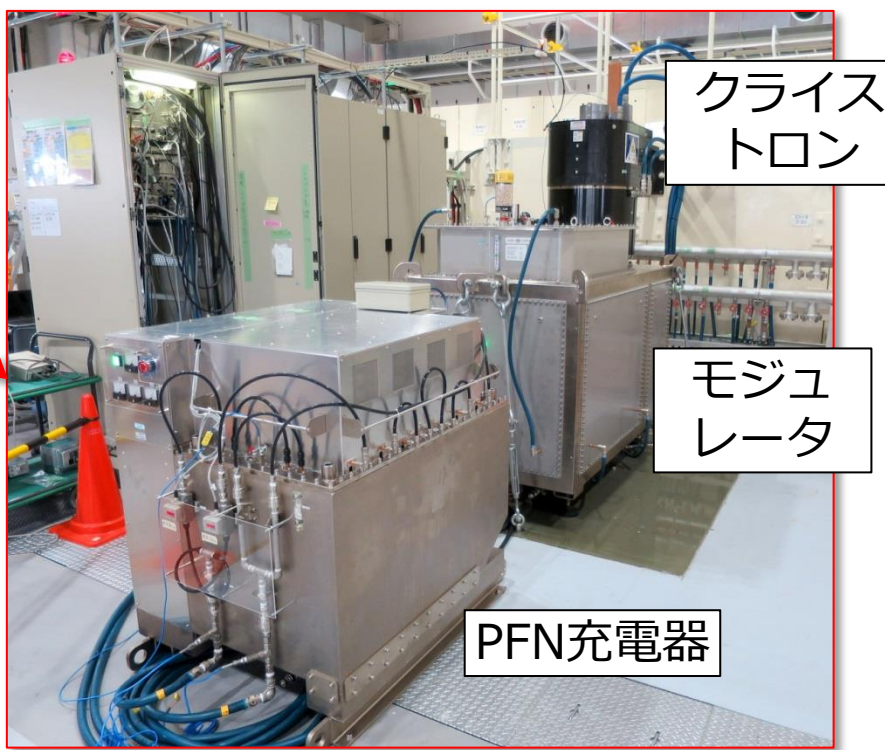
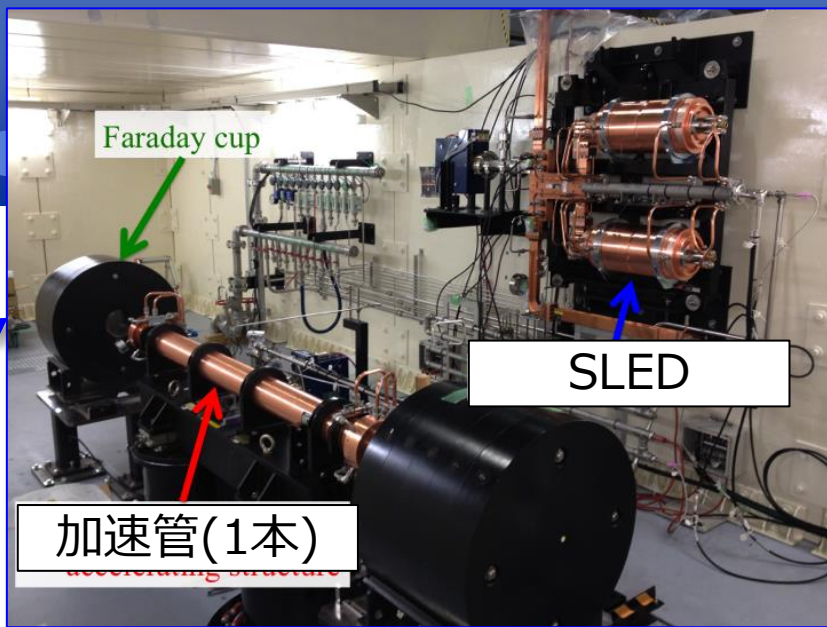
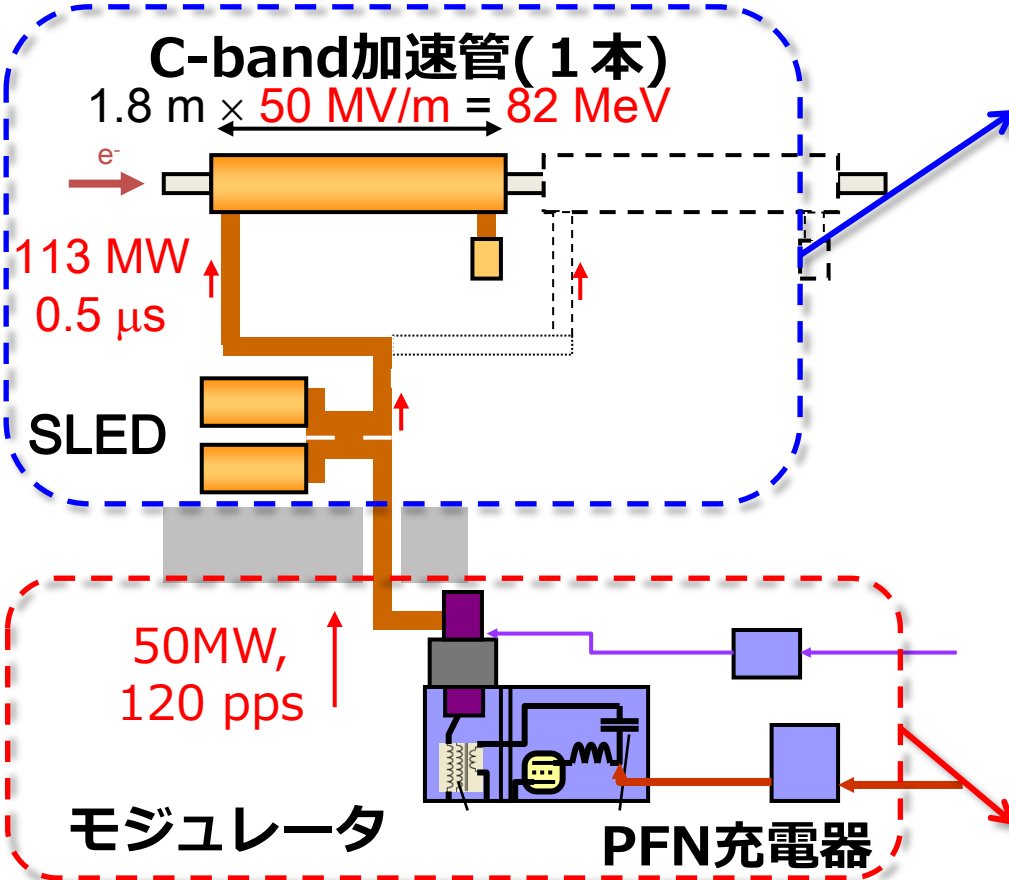
Frequency	5712MHz
Structure	Quasi-constant Gradient
Acc. Mode	TM ₀₁ -2 π /3
Shunt impedance	64 M Ω /m
Length	1.86 m
Unloaded Q	8800
Group Velocity	0.023c
Filling time	270 ns
Iris shape (Cross-section)	Ellipsoidal Curvature

加速管の内部構造



SUP036, 櫻井 et.al., “Cバンドディスクロード型加速管の大電力RF試験”
SUP035, 鈴木 et.al., “Cバンドディスクロード型加速管の製造”

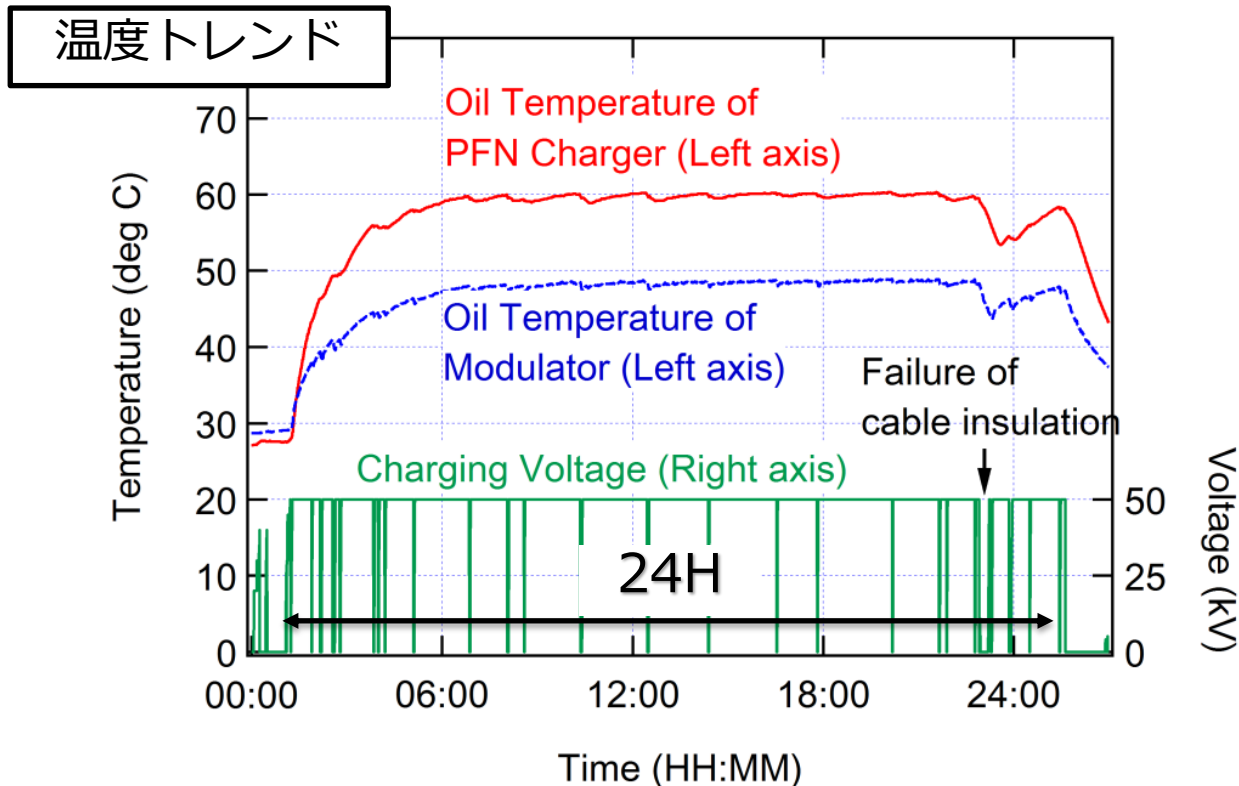
試験セットアップ



- ✓ 電源試験 : 24H連続試験
- ✓ RF試験 (加速管は1本構成)
高電界RF試験、連続試験
コンディショニング運転(~400H)

電源試験 (24時間運転)

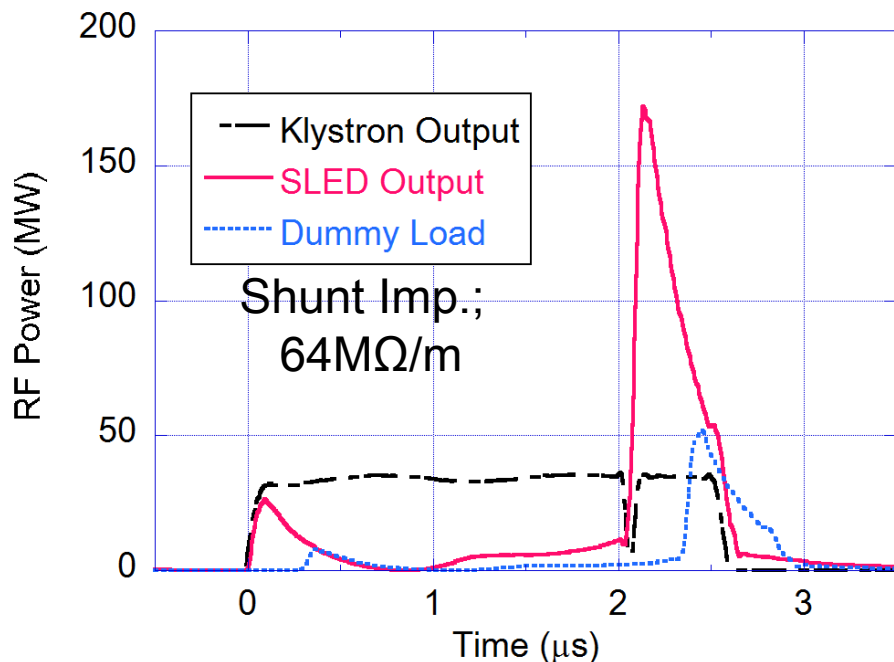
- 充電器 + モジュレータ + クライストロンの動作試験
 - 120pps, 24時間連続運転に成功。
 - 機器内部の絶縁油温度：
 - 充電器： 約 60℃ (既存機：~60℃@60pps)
 - モジュレータ： 約 48℃ (既存機：~47℃@60pps)



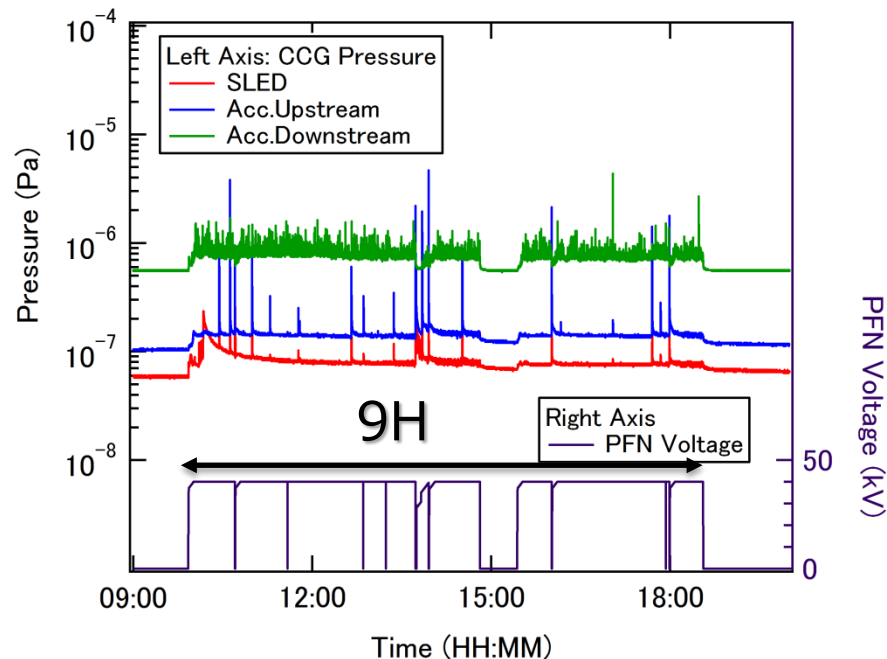
RF試験の結果

- 加速管(1本)+電源
- 高電界試験にて、**50MV/mの加速電界**を達成。
- 繰り返し120ppsの長時間運転では、**安定した動作**を確認
- **計400時間のコンディショニング**を実施済み。

50MV/m達成時のRF波形



120pps長時間運転の真空度トレンド



まとめ

- 120pps運転が可能なC-band大電力RFシステムを開発した。
- PFN充電器
 - 主充電の並列運転、デジタル動作制御、PWM制御による高速充電、高速整定を実現
 - 電圧安定度は、20ppm(p-p)@50kVを達成
 - 内部の絶縁油温度は、60°C程度と許容範囲内であった。
- モジュレータ電源
 - 熱設計の再検討し、抵抗の本数を増やす、大型水冷フィンの開発。
 - 絶縁油の温度は、約48°Cと許容範囲内であった。
- ディスクロード型加速管
 - 120pps運転、および50MV/mの高電界加速を実現した。
- 運転試験
 - 繰り返し120ppsにて、長時間運転を行い、動作に問題ないことを確認した。

協力企業、関連発表

協力企業：

- PFN充電器：日本高周波
- モジュレータ電源：日本高周波
- クライストロン：東芝電子管デバイス
- 加速管：三菱重工

関連発表

SAP059 田中 et.al., “高精度充電器の開発”

SUP036 櫻井 et.al.,

“Cバンドディスクロード型加速管の大電力RF試験”

SUP035 鈴木 et.al.,

“Cバンドディスクロード型加速管の製造”