

20 MWおよび高効率8 MW Xバンド クライストロンの設計と試験結果

キヤノン電子管デバイス株式会社
電力管技術部
阿武 俊郎

発表内容

- はじめに

- 20MWクライストロン

 - 設計と試験結果（11.4GHz管と12GHz管）

- 高効率8MWクライストロン

 - 1号機的设计と試験結果

 - 2号機的设计と試験結果

- まとめ

はじめに

1. 近年ハイパワーXバンドクライストロンの需要が高まっている (主に11.4GHzと12GHz)
 - Xバンド加速器に関連する技術が発展
 - コンパクトかつ高勾配な加速器を実現可能
2. 加速器の省エネ化やアップグレードにおいてクライストロン高効率化が求められる

当社は複数のXバンド管を開発

2019～2022年

20MWクライストロン
(11.4GHz & 12GHz)



各周波数での
新たな需要に対応

2018～2022年

高効率8MWクライストロン
(12GHz, CERNとの共同開発)

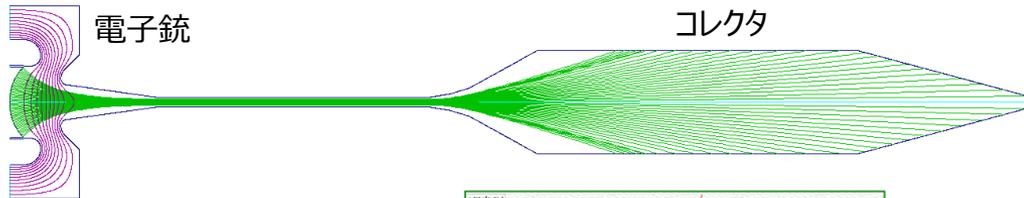


既存6MW管(43%)を高効率化し
CERN Xbox-3をハイパワー化

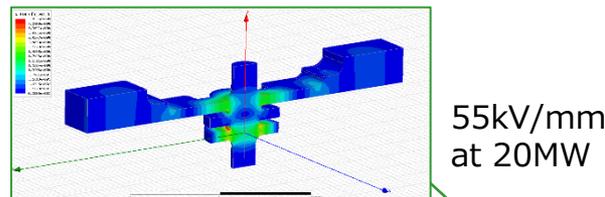
20MWクライストロン 設計

設計

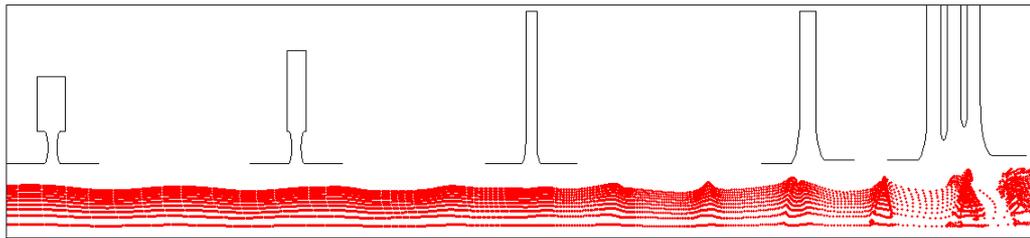
- 市販モジュレータの仕様に合わせた電子銃
- 空洞部は既存の6MW管からスケールアップ
- 11.4 GHz管と12GHz管それぞれを設計
- 5空洞, 出力空洞は3セル $\pi/2$ モード進行波
- 繰り返し数最大400ppsに対応する冷却



DCビーム軌道
(DGUN, 集束磁界あり)



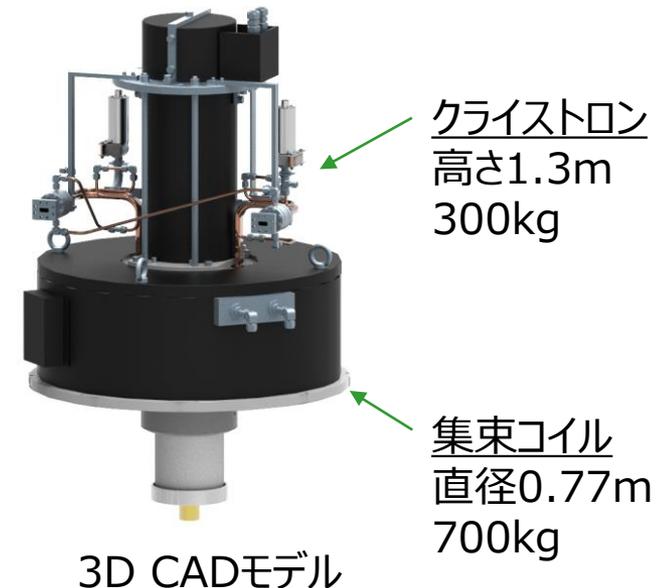
3セル $\pi/2$ モード(HFSS)



RF動作時ビーム軌道(FCI)

主な仕様と設計

Parameter	Unit	Spec.	Design
Beam voltage	kV	290 max.	265
Beam current	A	195 max.	170
RF pulse width	μ s	1.5 max.	1.5
Pulse rep. rate	pps	400 max.	400
Output power	MW	20 min.	20
Efficiency	%	-	44
Drive power	W	400 max.	120



3D CADモデル

20MWクライストロン 試験結果

- 11.4GHz管は2021年5月に試験
- 12GHz管は2022年2月に試験
- いずれも20MW安定動作を確認

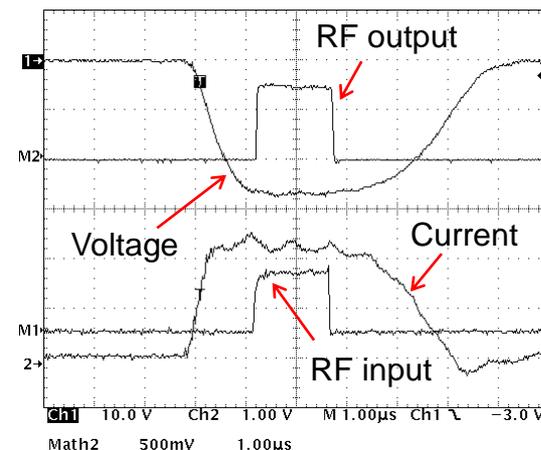
 Xバンドクライストロンの新たな選択肢

試験結果

Parameter	Unit	Spec.	E37116	E37118
Frequency	MHz	-	11424	11988.889 **
Beam voltage	kV	290 max.	270	270
Beam current	A	195 max.	183	181
RF pulse width	μs	1.5 max.	1.5	1.5
Repetition rate	pps	400 max.	30 *	10 **
Output power	MW	20 min.	20.0	20.0
Efficiency	%	-	40.6	40.9
Drive power	W	400 max.	120	156

* 試験時モジュレータの制約による値

** お客様仕様による指定値



20MW動作時波形
(11.4 GHz管E37116の例)



クライストロン外観

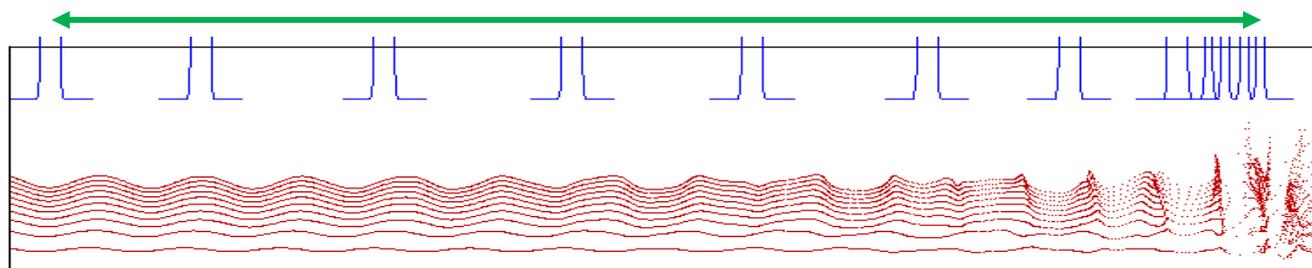
高効率8MWクライストロン 設計



電気設計はCERNで実施し当社でも確認。当初は全長の長い設計だったが、第二高調波空胴を用いて全長を短くし既存の集束コイルに取り合う設計とした。

設計 1

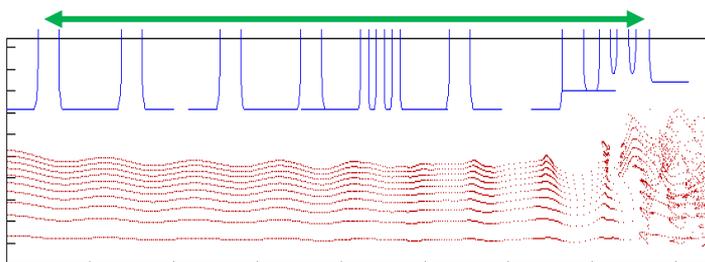
- 全長が長い
- 新規集束コイル



効率 : 58.6%

設計 2

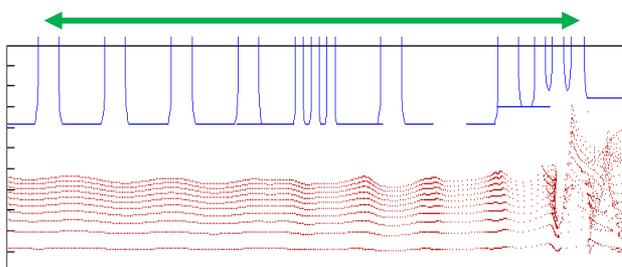
- 第二高調波空胴
- 設計1より短い
- 新規集束コイル



効率 : 56.4%

設計 3

- 第二高調波空胴
- 従来製品と同じ長さ
- 既存の集束コイル



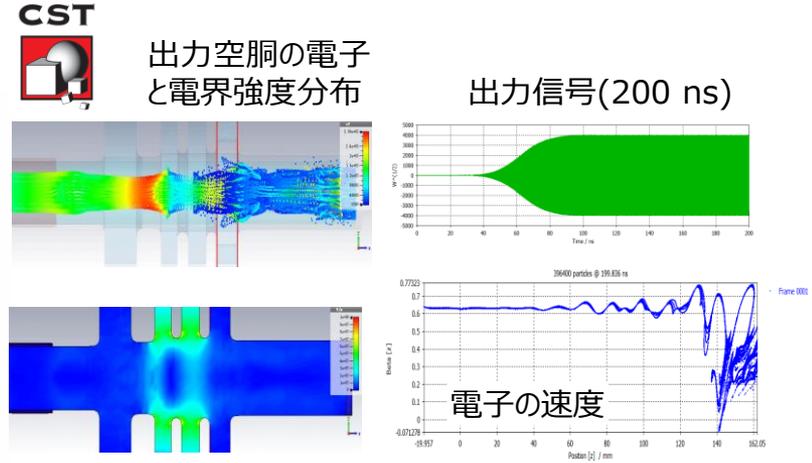
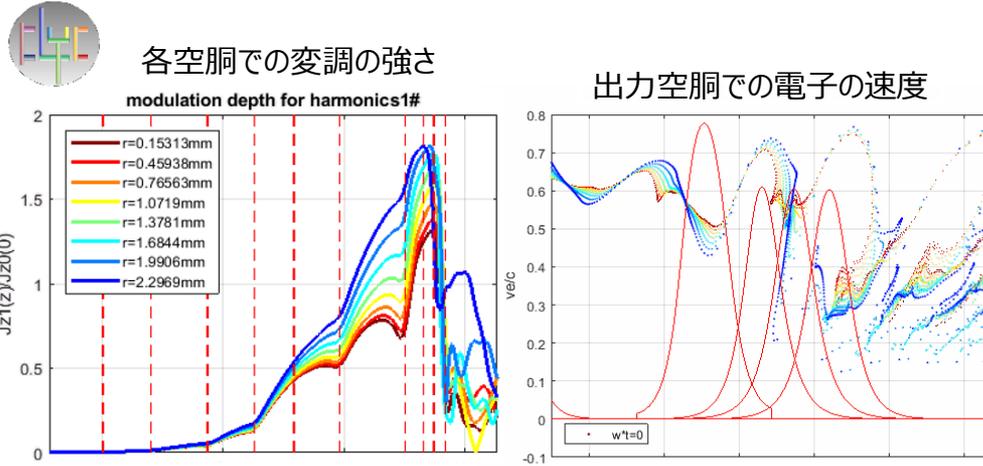
効率 : 56.4%

この設計に決定

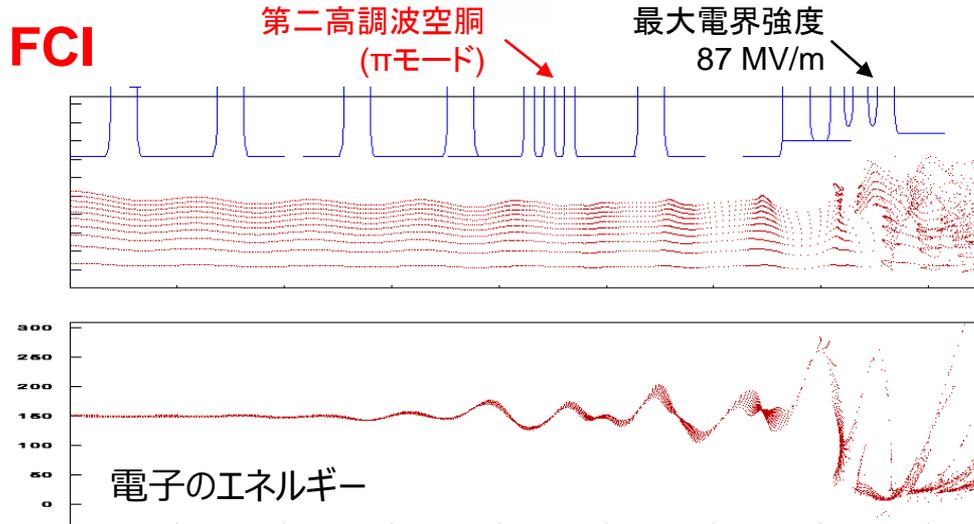
高効率8MWクライストロン 設計



第二高調波空洞は電子との結合を高めるため3セルπモード。各シミュレーションコードは近い結果を示した。



KlyC and CST simulation by J. Cai and I. Syratcev



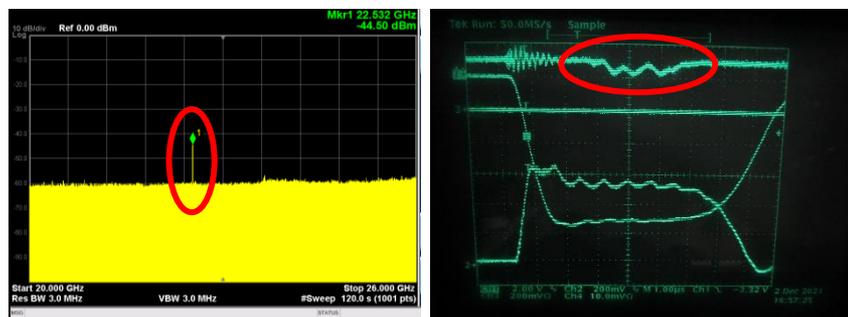
Parameter	KlyC	CST	FCI
Beam voltage [kV]	154	154	154
Beam current [A]	94	94	94
Drive power [W]	80	80	80
Output power [MW]	8.31	8.16	8.16
Efficiency [%]	57.4	56.4	56.4

高効率8MWクライストロン #1試験結果



2021年12月に初号機の試験を実施。低い電圧からダイオード運転(RF励振なし)で発振が起こった。

Voltage [kV]	Frequency [GHz]
85 - 125	22.5

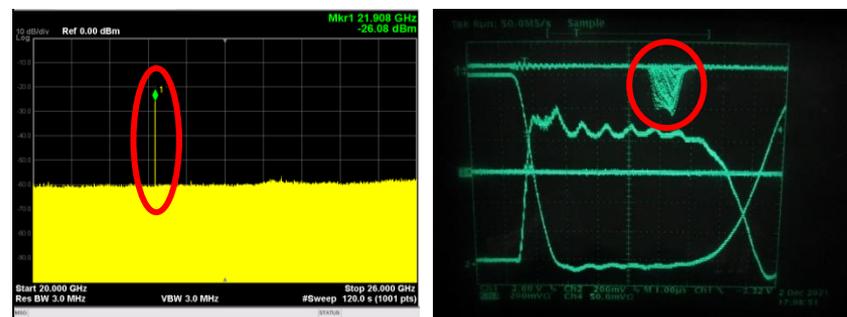


92 kVでの22.5 GHz発振の例



第二高調波空胴のTM01 $\pi/2$ モード (22.5 GHz)が疑われた。

Voltage [kV]	Frequency [GHz]
107 - 125	21.9 - 22.0



125 kVでの21.9 GHz発振の例



固有モード解析から複数の空胴で結合したTEモードが疑われた。

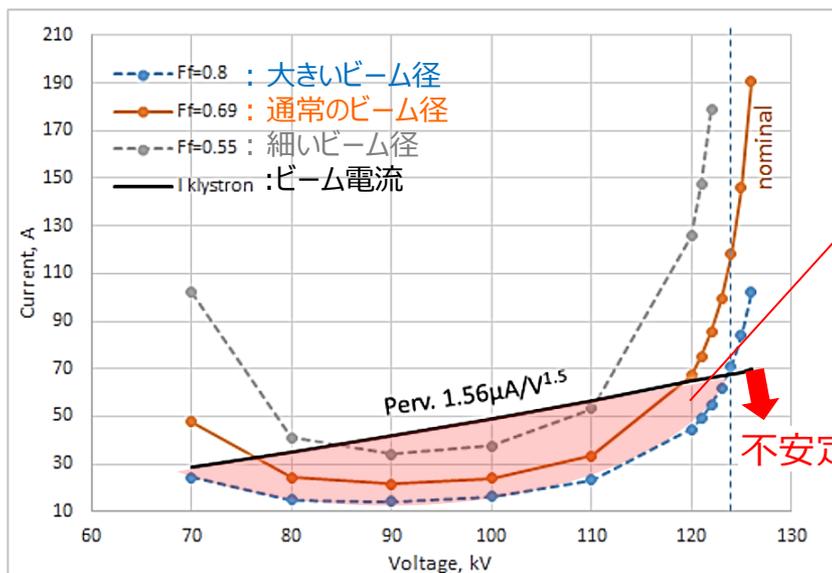
不安定が無い70kVでは電子はほとんど集群しないためRF出力は数kW。



高効率8MWクライストロン 発振対策

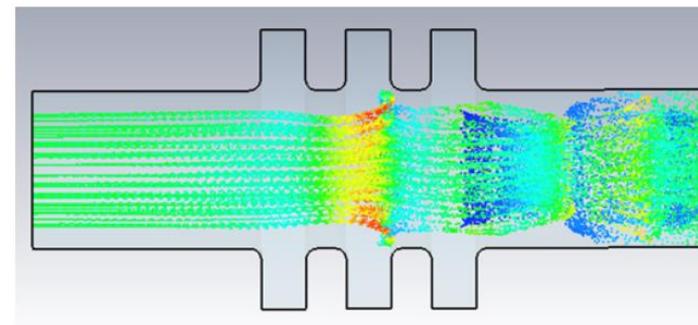


シミュレーションによる発振の解析をCERNでスタートした。KlyCとCSTのシミュレーションにより第二高調波空洞のTM01 $\pi/2$ モードの発振電圧の範囲は測定結果とよく一致した。



発振範囲70~125 kV (Ff=0.8)
実測に近い結果

不安定領域



KlyCでの発振開始電流シミュレーション結果
(黒線より下が不安定領域)

CSTシミュレーションによる発振による電子ビームの軌道(92kV)

※KlyCシミュレーション手法は下記による

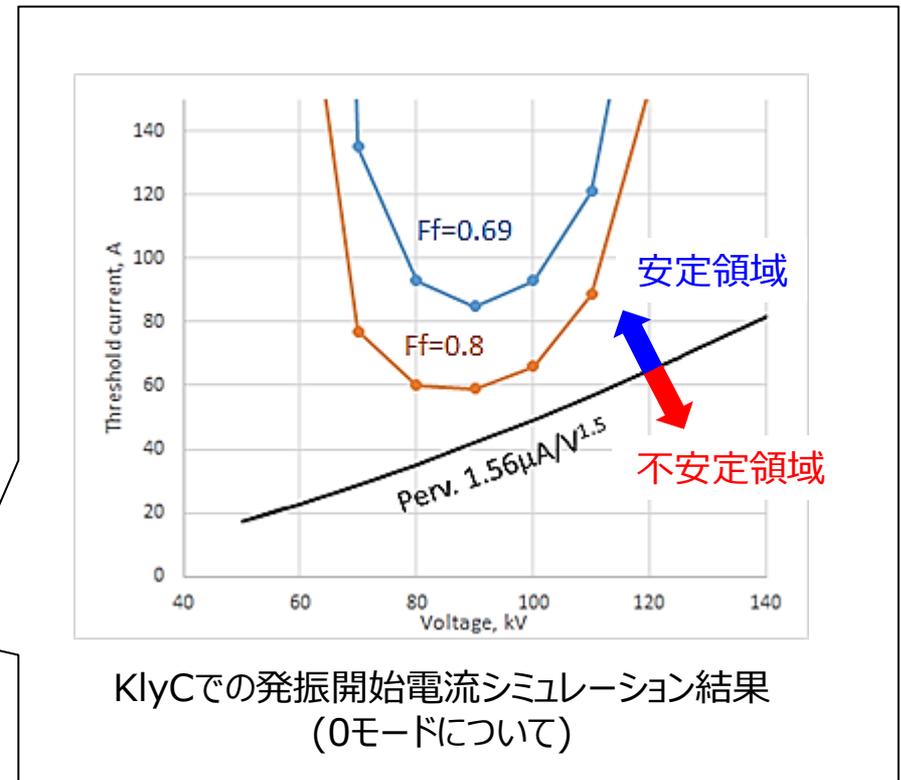
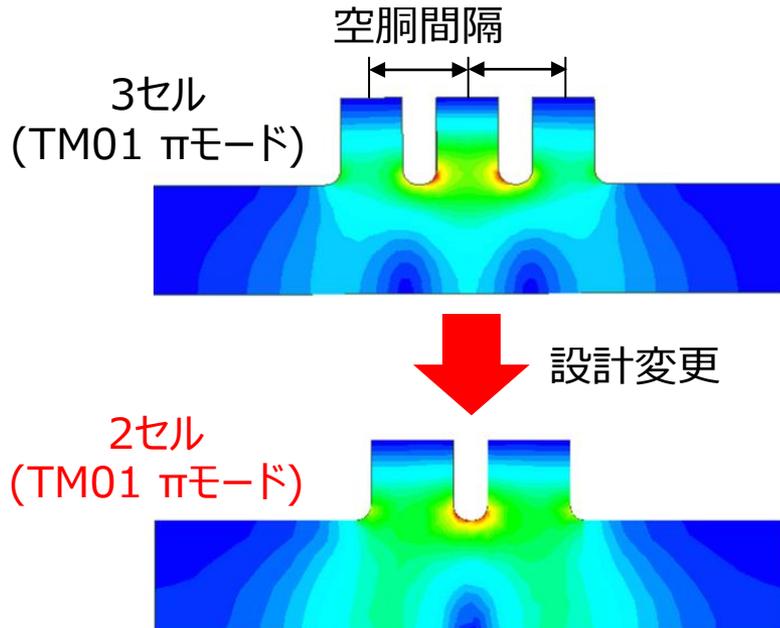
J.C. Cai, I. Syratchev and G. Burt, 'Accurate Modelling of Monotron Oscillations in Small- and Large-Signal Regimes'
IEEE Trans. on Electron Devices, vol.67, issue.4, pp. 1797 - 1803, April 2020.

高効率8MWクライストロン 発振対策



対策設計

3セルの空洞間隔を短くすることで発振を回避できることが分かった。しかしこの場合はより発振リスクの低い2セルとしても電子の集群効果が変わらず、3セルのメリットがないため2セルに変更した。

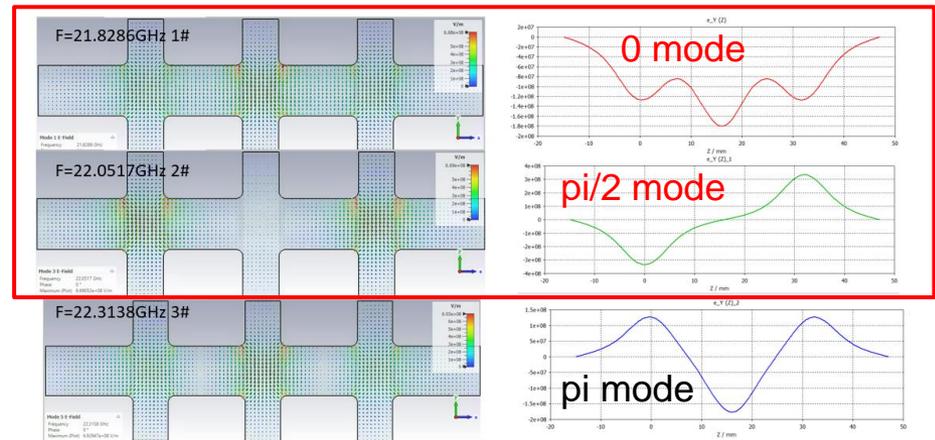


KlyCでの発振開始電流シミュレーション結果 (0モードについて)

高効率8MWクライストロン 発振対策



107kV以上の発振では複数の周波数があり、固有モード解析から第2～第4空胴で結合したTE11 0、 $\pi/2$ モードと推定。
各モードの安定性を以下の手法で計算し実測とよく一致。



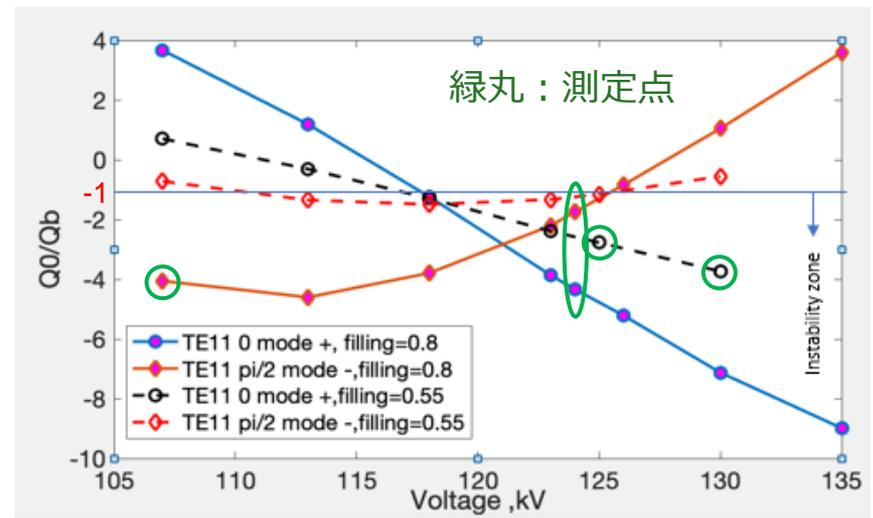
不安定条件： $Q_0/Q_{beam} < -1$

Q_0 : モードのQ値

Q_{beam} : ビームローディングQ値

Q_0 は固有モード解析から求める。 Q_{beam} はそのモードの電磁界分布がある時と無い時でビームパワーをそれぞれ計算し求める。

$$Q_{beam} = \frac{\omega W}{\Delta P} = \frac{2\pi f W}{P_{end,rf} - P_{end,dc}}$$



J.C. Cai, I. Syratchev and G. Burt, 'Numerical Analysis of Resonant Multipolar Instabilities in High Power Klystrons', IEEE Trans. on Electron Devices, vol.68, issue.7, pp. 3617 - 3621, June 2021.

高効率8MWクライストロン 発振対策

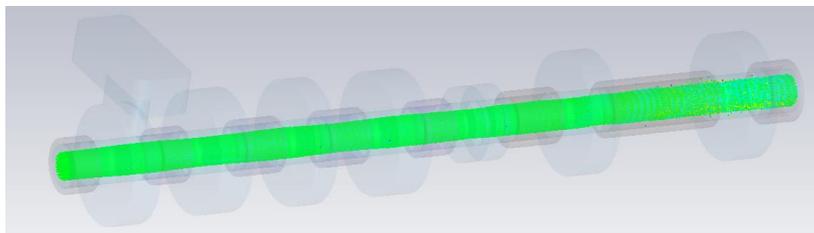


対策設計

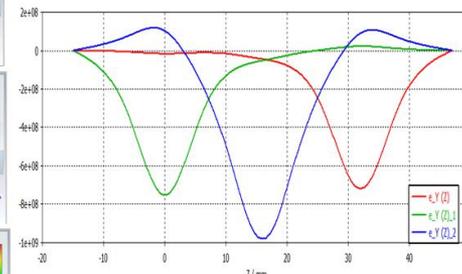
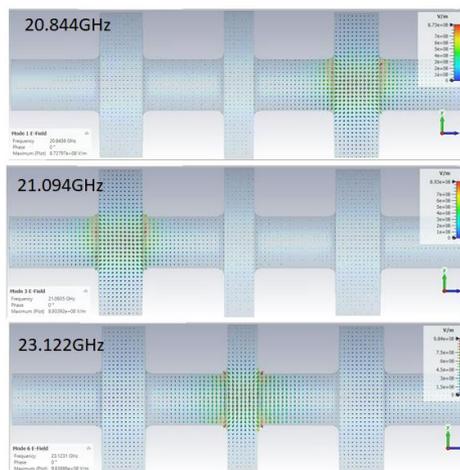
同じであった空洞のギャップの長さを±20%程度互いに变化させることでTE11モードはほとんど結合せず。

Q_0/Q_{beam} 解析では155kVまで安定。安定領域を広げるためステンレスドリフトを導入(高次モード減衰)。

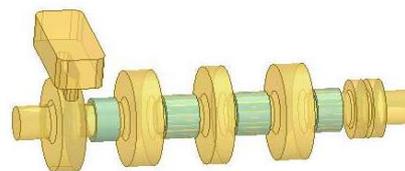
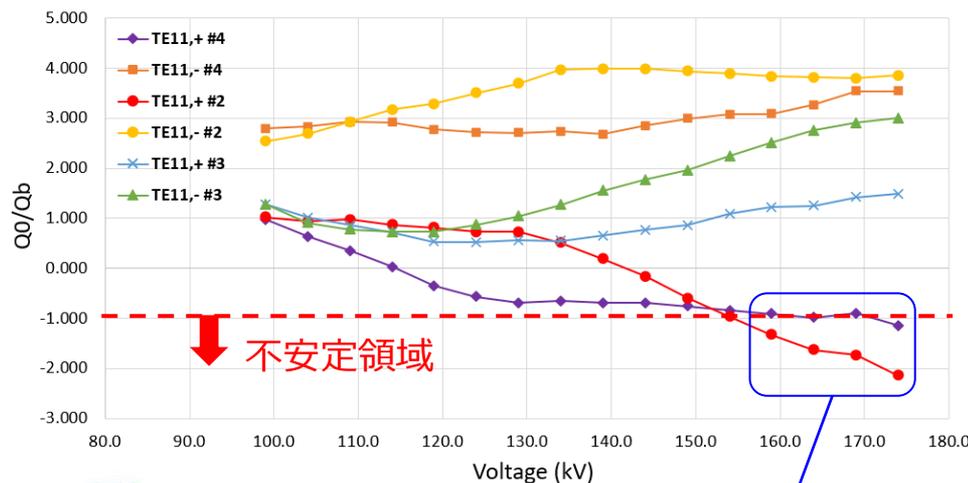
CSTシミュレーションで174kVでも安定となることを確認。



DC, V=174 kV, Ff=0.69, Bz=0.42 T
(Simulation time = 4000 ns)



対策後のTE11モードの電界分布



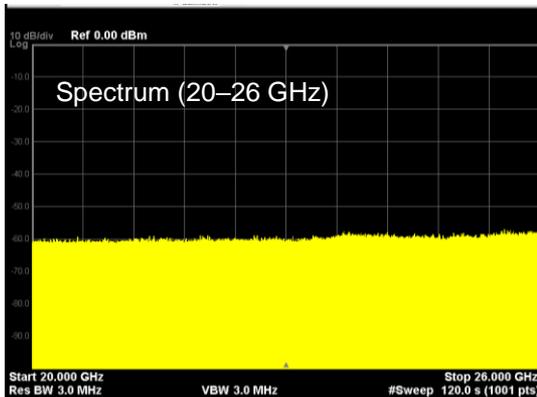
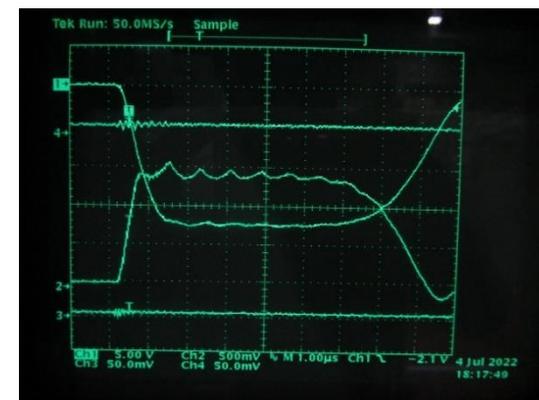
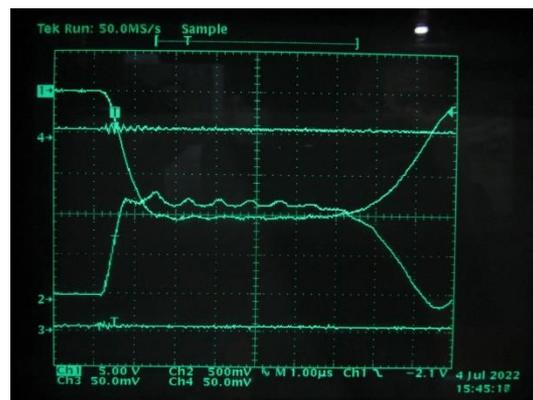
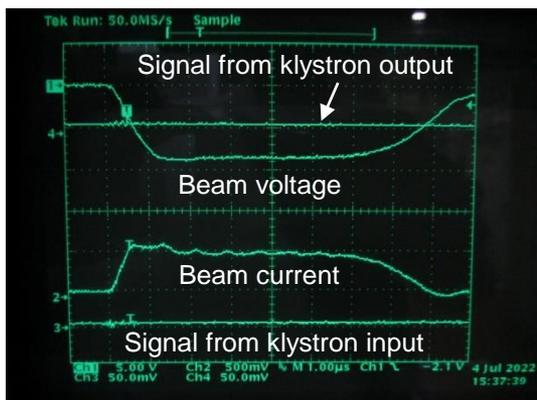
対策：1~5空洞の間にステンレスドリフトを導入

高効率8MWクライストロン #2試験結果

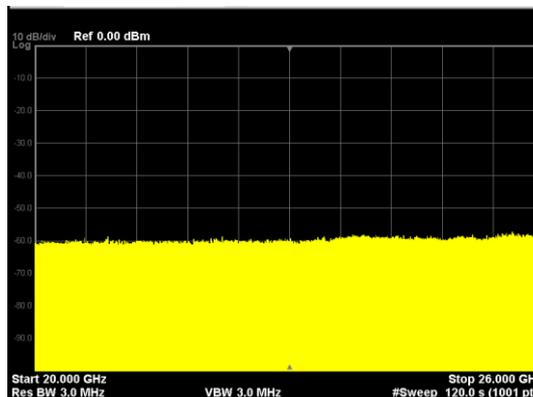


対策設計を導入した二号機を当社で製作し2022年7月に試験。まずダイオード
運転で発振の有無を調査。電圧を上げてても発振は見られなかった。

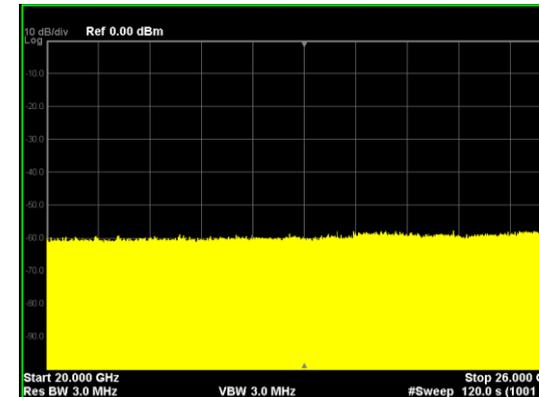
➡ 発振対策は有効



85 kV, 39 A



154 kV, 94 A



174 kV, 114 A

高効率8MWクライストロン #2試験結果



RF試験結果

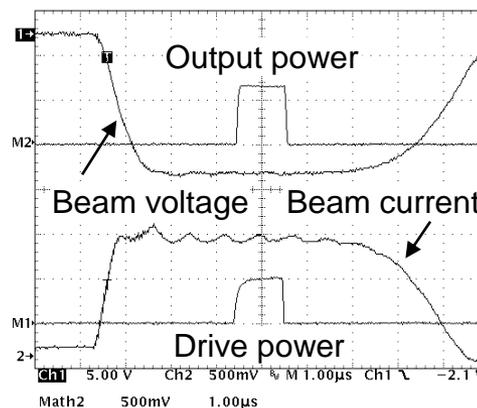
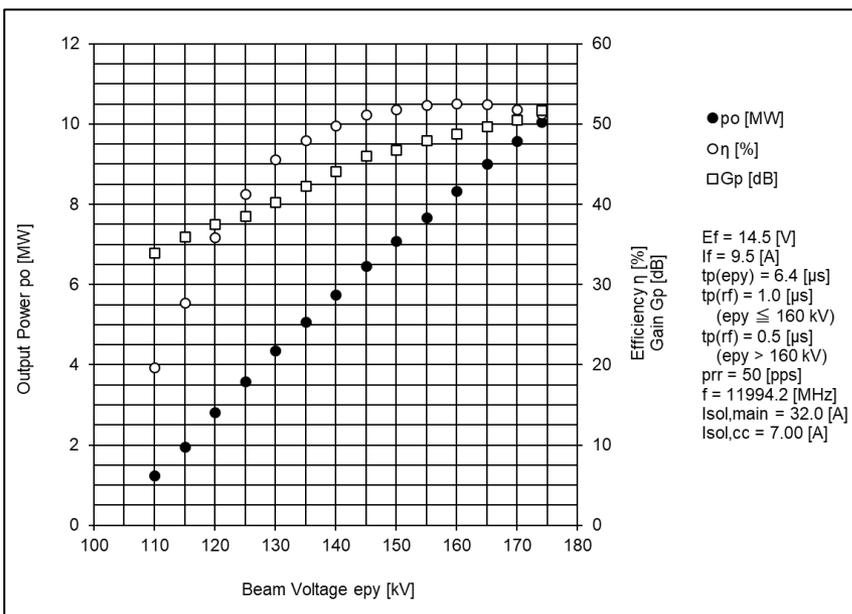
出力8.1MW(効率53.3%)

出力10.1MW(効率51.2%)

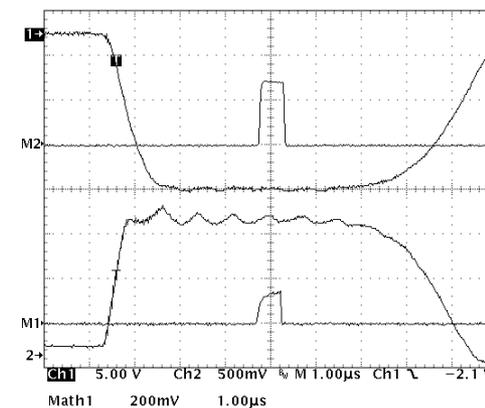


従来品より約10%高効率化

Parameter	Unit	Specification	Result 1	Result 2
Frequency	MHz	11994.2	11994.2	11994.2
Beam Voltage	kV	≤ 175	157	174
Beam Current	A	≤ 115	96.8	112.8
RF Pulse Width	μs	(Target 4.0)	1.0	0.5
Repetition rate	pps	(Target 200)	50	50
Drive Power	W	≤ 400	121	68
Output Power	MW	(Target 8.0)	8.1	10.1
Efficiency	%	(Target 56)	53.3	51.2



8.1 MW operation
(157 kV, 1 μs)



10.1 MW operation
(174 kV, 0.5 μs)

まとめ

- 11.4GHzと12GHzの20MWクライストロンを開発した
- 8MWクライストロンはシミュレーションによる発振対策が成功し効率は従来品より10%アップした

高効率管の共同開発者であるIgor Syrathev, Jinchi Cai, Zaib Un Nisa, Graeme Burt各氏に感謝いたします。

Canon

キヤノン電子管デバイス株式会社