

Development of 30 MW L-band pulse klystron for XFEL

Satoshi Fujii^{#,A)}, Setsuo Miyake^{A)}, Yoshihisa Okubo^{A)}, Takahiro Inagaki^{C)}, Takao Asaka^{B)}, Toshiaki Kobayashi^{B)}, Hirofumi Hanaki^{B)}, Tsumoru Shintake^{C)}

^{A)} Toshiba Electron Tubes & Devices co., Ltd.

1385, Shimoishigami, Otawara-Shi, Tochigi, 324-8550

^{B)} JASRI/SPring-8

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148

^{C)} RIKEN/SPring-8

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148

Abstract

An L-band pulse klystron E37612 was developed as a high power RF source for the L-band standing wave type accelerating structure in the X-ray Free Electron Laser (XFEL) under construction at SPring-8. The klystron E37612 can output 30 MW peak power with frequency of 1428 MHz. We designed the klystron based on the design of the 50 MW C-band klystron and the 50 MW S-band klystron by using the simulation code FCI^[1]. The first tube was manufactured and tested at Toshiba Electron Tubes & Devices co., Ltd. in January, 2010. The klystron shows good characteristics up to the ratings operation. Since some instability phenomena were seen in the area of the low beam voltage, we optimized the current of the focusing magnet to suppress the instability.

1. はじめに

SPring-8 で建設中の X 線自由電子レーザー(XFEL)^[2]における入射部 L バンド(1428 MHz)定在波型加速管では、約 1 MeV の電子ビームをバンチ幅 50 ps から 20 ps までバンチングしつつ 40 MeV 程度にまで加速する。この L バンド定在波型加速管へ RF 電力を供給する高周波源として、L バンドパルスクライストロン E37612 を開発した。

L バンドクライストロンの主要性能値を表 1 に示す。動作周波数は 1428 MHz であり、S バンド 2856MHz のちょうど 1/2 である。この周波数でピーク出力電力が 30 MW 級の大電力パルスクライストロンは既製品としては存在しない。このクライストロンを実現するために、XFEL 加速器の後段で使用される C バンド 50 MW クライストロン E37202^[3]及び S バンド 50 MW クライストロン E37306 の電気設計を基にして、シミュレーションコード FCI^[1]を用いて安定に動作するよう設計を行った。また、オイルタンクとの取り合いが上記の他バンドクライストロンと共通となるよう構造設計を行った。

初号機実機の製作と動作確認試験は東芝電子管デバイス株式会社 (TETD) 本社工場にて行われた。試験では、低ビーム電圧の領域で不安定現象が見られたが、集束磁界の設定により発生を抑えることができ、定格動作領域と実使用の運転領域では良好な特性が得られた。

次項より、この新開発 L バンドクライストロンの電気設計及び構造設計、そして製作した初号機の動作確認試験の結果について述べる。

表 1 : L バンドクライストロン主要性能

項目	性能値	単位
動作周波数	1428	MHz
ピークビーム電圧	295	kV
ピークビーム電流	258	A
ピーク出力電力	31	MW
平均出力電力	11	kW
ピーク入力電力	500	W
最大ビームパルス幅	8.0	μsec
最大 RF パルス幅	6.0	μsec
繰り返し周波数	60	pps
ヒータ電力	370	W
最大コレクタ損失	38	kW
効率	40.3	%
利得	47.9	dB
全長	2.0	m
重量	435	kg
電子銃陰極	ディスペンサカソード	
イオンポンプ	8	ℓ/sec
出力フランジ	DESY 型	

[#] satoshi2.fujii@toshiba.co.jp

2. 設計

2.1 電気設計

電子銃はシミュレーションコード DGUN を使用して設計した。カソード径は、C バンドクライストロン E37202 と同じとし、曲率のみ変更した。図 1 に DGUN による電子ビーム軌道の計算結果を示す。バックアップコイルで発生させた逆磁界によりカソード付近の磁力線を理想的な形状に近づけている。図 1 (b)にあるように、クライストロン側に微小なポールピースを設けて、電子銃に軸方向のずれが生じても影響が小さくなるようにしている。電子ビームが良好に通過する設計が得られた。

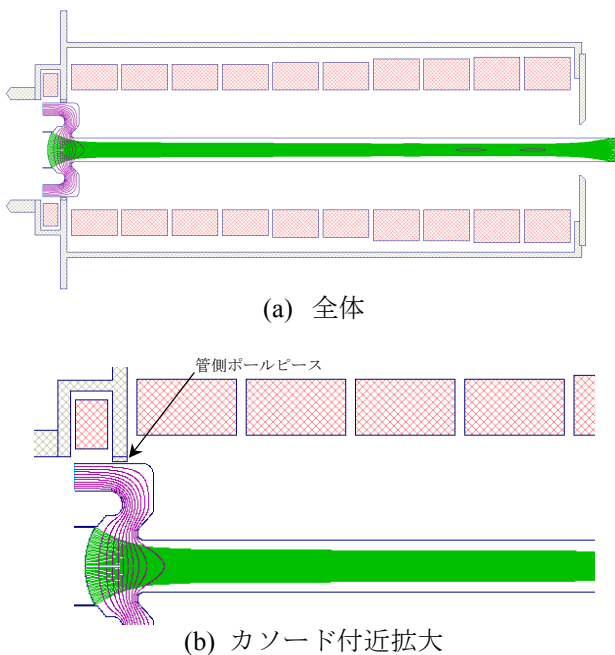


図 1 : DGUN による電子軌道の計算結果

高周波相互作用部は、TETD のクライストロン既製品、特に C バンドクライストロン E37202 と S バンドクライストロン E37306 の設計を参考にスケールリングし、FCI を用いて高周波増幅特性を計算し、いくらか補正を施して設計した。図 2 に最終設計形状での FCI の計算結果（ビームプロファイル及びエネルギープロファイル）を示す。図 2 (b)最下段にあるように、出力空洞付近にて一部の電子のエネルギーが一時マイナスになるが、これらはその後再加速されコレクタへ進み逆行電子とはならないので、問題ないと考えている。

図 3 に入出力特性の計算結果を示す。計算の結果、入力電力 150~175 W 程度で飽和し、出力変換効率は約 50%となった。これまでの経験から、FCI の計算結果と実際の製品とでは、効率に 5~10%程度の差が生じることが分かっている。よって実機では、40~45%程度の効率が期待される。このときピーク出力電力は 31~35 MW となり、30 MW 以上のピーク出力が達成できると予想される。

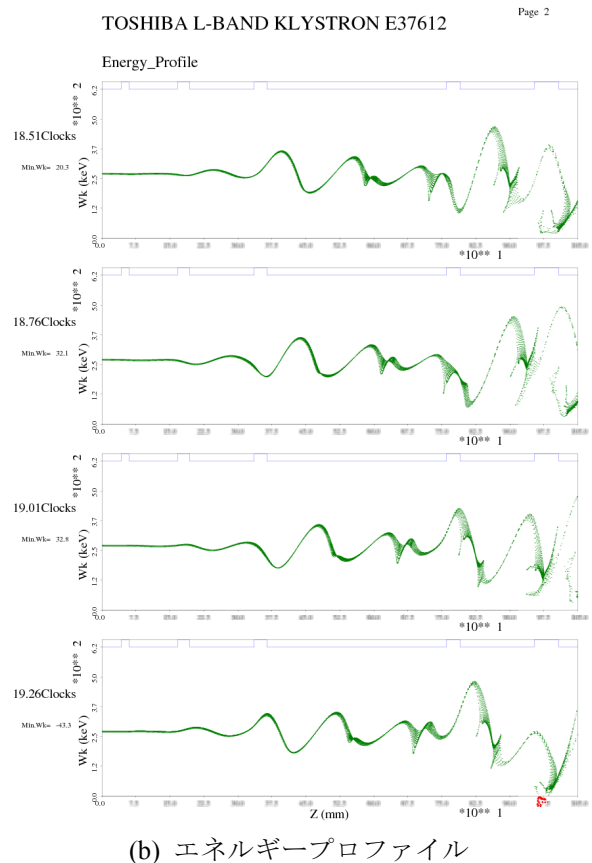
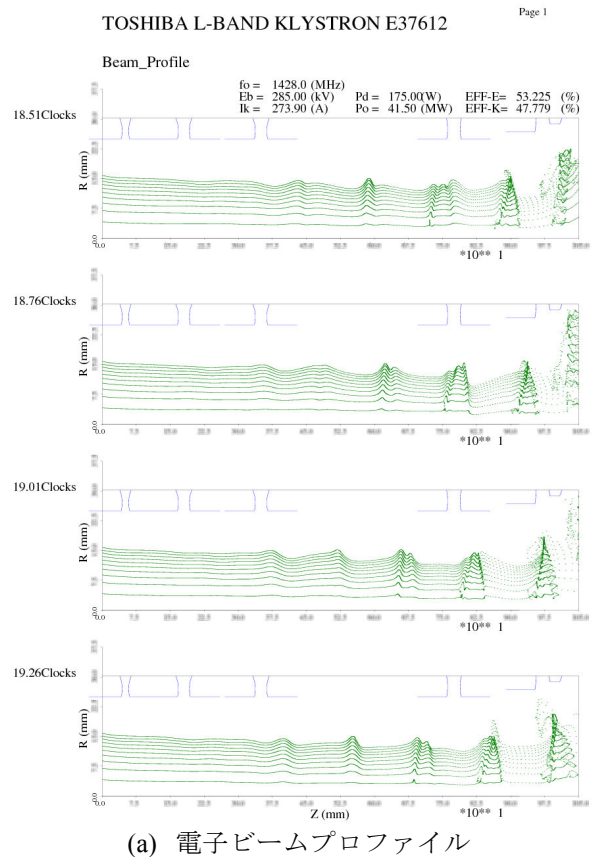


図 2 : FCI 計算結果

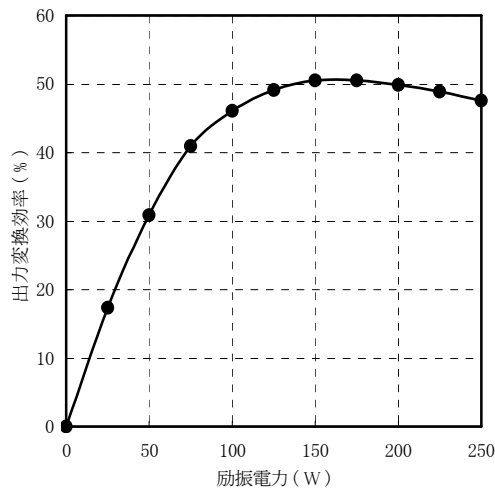


図3：入出力特性計算結果

出力空洞での高周波電力の取り出しには、出力空洞上面にカップリング窓を設けポールピース上面の導波管に結合して取り出す方法を採用した。この取り出し方式では、集束コイルに導波管を引き出すためのニゲを設ける必要がないという利点がある。Lバンドの規格導波管 WR-650 では、幅長が 165.1 mm と幅広のため、この利点の効果は大きい。図4に電磁界解析ソフト HFSS での出力空洞及び導波管部のカットモデルを示す。HFSS による電界強度の計算の結果、カップリング窓部での最大電界強度は約 8.5 kV/mm となり、問題ない大きさであることが分かった。

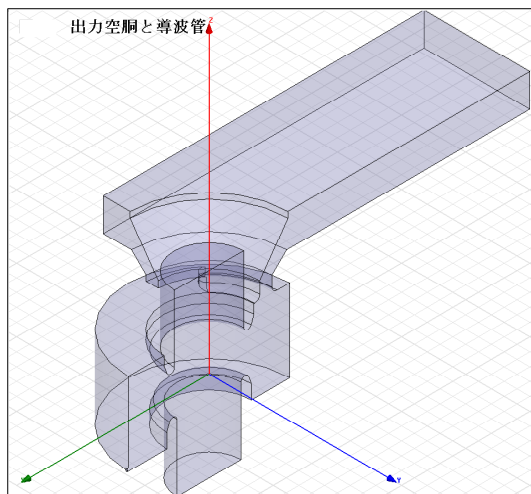


図4：HFSS のカットモデル

2.2 構造設計

クライストロンと集束コイルの、オイルタンクに対する取り合いは、Cバンドクライストロン E37202 と同じとなるよう設計した。

クライストロンボディ部は、インストール作業時に電子銃下部のコロナリング等が引っ掛かり、管の重量がかかっても変形しないように、ボディ下部に

はステンレス支柱を補強として追加し、ボディ上部は径を増加させて対策を施した。Lバンドクライストロン E37612 の外形図を図5に示す。

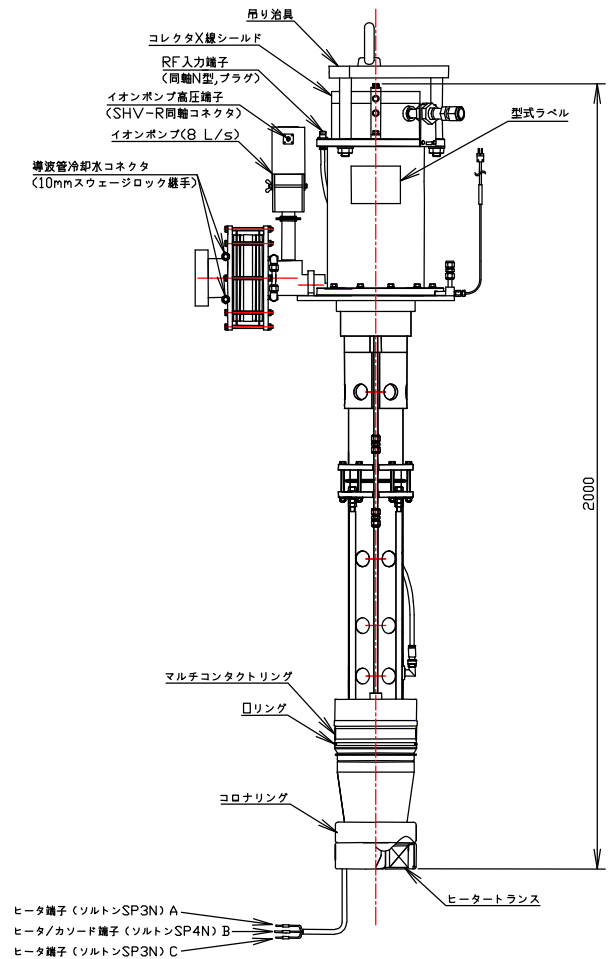


図5：Lバンドクライストロン外形図

3. 動作確認試験結果

3.1 定格動作及び実使用動作

実機初号機は TETD 本社工場にて製作された。製作した Lバンドクライストロン E37612 の外観写真を図6に示す。

製作した初号機の動作確認試験は、2010年1月に TETD 本社工場で行われた。試験では、実使用よりも低い電子ビーム電圧領域において不安定現象がみられたが、集束磁界の調整により不安定は大幅に減らすことができた。この不安定現象の詳細は 3.2 項に記述する。定格動作及び実使用動作（ピーク出力電力 20MW）では、良好な特性を得ることができた。クライストロンの入出力特性を図7、出力特性を図8に示す。電子ビーム電圧 295 kV で定格出力電力 30.7 MW、電子ビーム電圧 270 kV で実使用出力の 21.8 MW を達成することができた。また、図9に定格出力時の測定波形を示す。



図 6 : Lバンドクライストロン外観写真

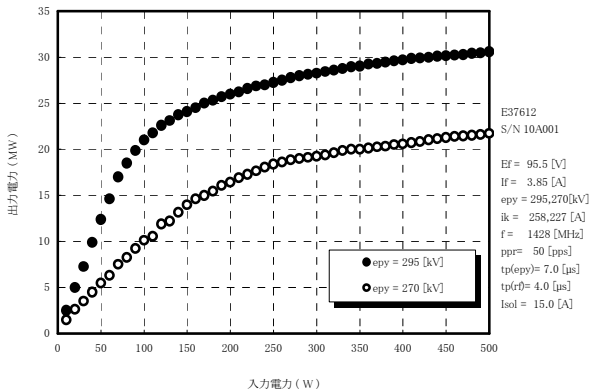


図 7 : 入出力特性測定結果

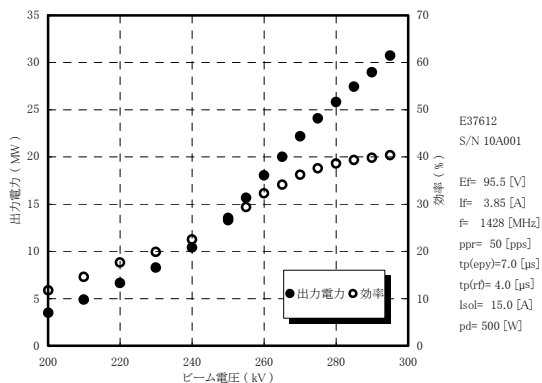
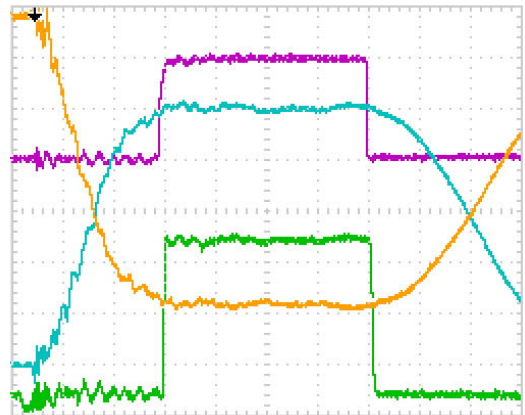


図 8 : 出力特性測定結果

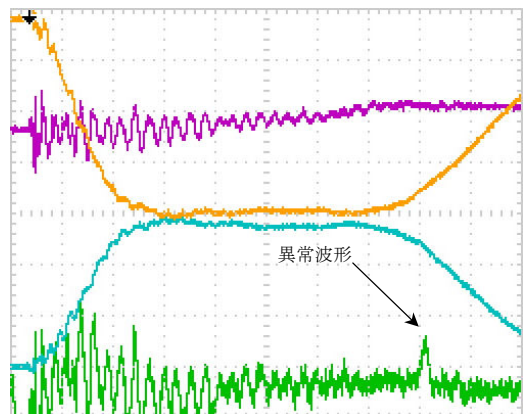


Ch.1 (黄) : ビーム電圧 295 kV 1.0μs/div
Ch.2 (水) : ビーム電流 258 A
Ch.3 (紫) : 入力電力の検波波形 500 W
Ch.4 (緑) : 出力電力の検波波形 30.7 MW

図 9 : 定格運転時の測定波形

3.2 不安定現象

初号機では、電子ビーム電圧が実使用よりも低い領域で不安定現象が見られた。集束コイルの設定を設計と同じとした場合、電子ビーム電圧が 210 kV 付近において、入力電力をゼロとしておいてもパルス後部の立下り付近で出力電力検波波形にスパイク状の異常波形が現れた。この異常波形は、パルスによりピーク値や出現有無が異なる。出力の検波波形に現れる異常波形の例を図 10 に示す。入力空胴から入力コネクタを通して入力ラインに戻ってくる電力の検波波形を測定したところ、ビーム電圧 170~250 kV においてパルス後部に波形が現れ、210 kV 付近で最も大きくなるのが分かった。これら異常出力と戻り電力の周波数をスペクトラムアナライザで測定したところ、異常出力は 1428 MHz、戻り電力は 3440 MHz であることが分かった。



Ch.1 (黄) : ビーム電圧 200 kV 1.0μs/div
Ch.2 (水) : ビーム電流 149 A
Ch.3 (紫) : 入力電力の検波波形
Ch.4 (緑) : 出力電力の検波波形

図 10 : 不安定現象の測定波形の例

集束コイルの設定を調整することで、不安定現象を大幅に減らすことができた。バックリングコイルはタップを設けており、巻数を 10%弱ずつ数段階増減させることができる。調整の結果、最適の設定はタップを 1 段階変更し (タップ番号 No.5 → No.4)、バックリングコイルの巻数を 10%弱ほど増加させ、かつ集束コイル電流を設計値の 14 A から 15 A に増加させたものとなった。バックリングコイルの巻数増加と電流値増は、逆磁界強度を増加させてカソード磁界を減少させるので、クライストロンのドリフト管に入射する電子ビームの径は細くなる。また集束コイルの電流値増により、メインコイルの集束磁界が強くなりドリフト管内での電子ビーム径も細くなる。一般に、電子ビーム径が細くなるとクライストロンの利得は低下する。

この集束コイル設定では、出力の検波波形に異常は現れなくなった。入力ラインへの戻り電力の検波波形は、大幅に減少するものの、ビーム電圧 210 kV のときにわずかに現れる。集束コイル電流を更に増加させて 16 A にすると、戻り電力の検波波形は更に減少するものの、この設定では利得が下がり過ぎて仕様を満たすことができなくなる。そこで、タップが No.4 で電流値 15 A を推奨設定とした。

集束コイルの各設定において、入力ラインへの戻り電力をパワーメータ (アベレージ) にて測定した結果を図 1 1 に示す。

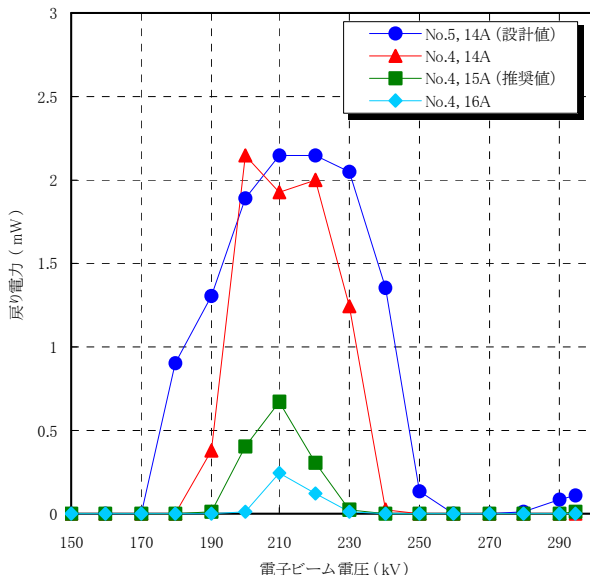


図 1 1 : 戻り電力の測定結果

戻り電力の測定値は、検波波形と同様の傾向となった。集束コイルが設計値設定の時に比べ、推奨設定では戻り電力の現れるビーム電圧の範囲が減少し、戻り電力の大きさもビーム電圧 210 kV において約 1/3 に減少する。コイル電流 16 A では更に 1/2 程度に減少させることができるが、前述のとおり利得が下がり過ぎてしまうので、推奨設定とすること

ができない。なお、前項 3.1 でのクライストロンの特性測定結果は全て集束コイルの設定を本項の推奨設定として測定したものである。

4. まとめ

XFEL の入射部 L バンド定在波型加速管の高周波源として、30 MW 級の L バンドパルスクライストロンの設計と開発を行った。設計は、シミュレーションコード FCI 等を用いて、既存品を基に安定に動作するよう行った。初号機の動作確認試験では、低ビーム電圧の領域で不安定現象が発生したが、集束コイル磁界の設定を変更することで発生を抑えることができた。設定の変更は、ビーム径を絞り利得を減少させる方向であったが、定格動作と実使用動作では仕様を満たす良好な特性を得ることができた。

5. 謝辞

本クライストロンの開発にあたりましては、理化学研究所播磨研究所及び高輝度光科学研究センターの関係各位には種々の多大なるご支援ご協力をいただきました。深く感謝いたします。

参考文献

- [1] T.Shintake, "Klystron simulation and design the Field Charge Interaction (FCI) code", Nuclear Instrument and Methods in Physics Research, A 363 (1995) 83-89".
- [2] <http://www.riken.jp/XFEL/jpn/index.html>
- [3] T.Shintake, et. al., "Development of C-Band 50MW Pulse Klystron for e⁺e⁻ Linear Collider", PAC97, Vancouver, BC, Canada, 1997.