

# Xバンドリニアックを用いた小型硬X線源の 50MW クライストロン用パルス電源

明本 光生<sup>1,A)</sup>、浦川 順治<sup>A)</sup>、早野 仁司<sup>A)</sup>、肥後 寿康<sup>A)</sup>、土橋 克広<sup>B)</sup>、飯島 北斗<sup>B)</sup>、  
上坂 充<sup>C)</sup>、深沢 篤<sup>C)</sup>、今井 貴之<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

<sup>B)</sup> 放射線医学総合研究所

〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1

<sup>C)</sup> 東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設

〒319-1188 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-22

## 概要

静脈注射による冠状動脈動的血管造影(IVCAG)のための、Xバンドリニアックを用いたレーザー電子ビーム衝突による小型硬X線源を開発中である。この装置で使用される小型・軽量で高性能な50MW Xバンドクライストロン用パルス電源を開発したのでその報告を行う。

### 1. はじめに

文部科学省先進小型加速器開発プロジェクト(取りまとめ放射線医学総合研究所)に参画し、静脈注射による冠状動脈動的血管造影(IVCAG)のための、Xバンドリニアックを用いたレーザー電子ビーム衝突による小型硬X線源<sup>1)</sup>を開発中である。本研究の最終目標は、従来の血管造影(CAG)装置に代わるレーザー電子ビーム衝突によるIVCAG用硬X線源である。Xバンド加速器とレーザーを大型のアームに収め、患者のいろいろな角度からX線を照射できるようにする。電源を含めた装置全体で5mx5mx3mに収まる一体型の装置にする。特に、クライストロン電源は出力パルス電圧が500kVと高電圧でしかもピーク電力が142MWと大電力であるが、小型・軽量化と共に高性能化が強く要求される。

### 2. クライストロン

KEKでリニアコライダーのRF源用として開発された、周期永久磁石(PPM)集束を用いた75MW級Xバンドクライストロン<sup>2)</sup>(東芝製E3768A)を使用する。表1にクライストロンの主な仕様を示す。

### 3. 設計の指針

パルス電源の方式は、信頼性の高いラインタイプパルス電源方式を採用した。この方式のパルス電源は充電部、放電部、パルストランスから構成される。パルストランスの1次側の電圧で放電部のスイッチ、コンデンサ等の構成部品が決定されるために1次側

の電圧は、低圧化することが部品の実装密度を高め、小型・軽量化に対して有利である。また充電部は、高周波化することによって、トランス、平滑コンデンサなどの主要部品が大幅に小型・軽量化することが可能で、インバータ電源を採用する。

この方針から、従来のパルストランスの昇圧比に比べて、かなり大きな昇圧比1:32を選定した。これによって、1次側の電圧は16kVに低圧化した。これに伴い、(1)低インピーダンスのパルス成形回路(PFN)、(2)パルストランスと接続するための低インピーダンス伝送ライン、(3)立ち上がり特性の優れたパルストランスが技術課題となる。(1)については、4並列のPFNにすることによって実現し、(2)については3重平行平板線路を使用することによって低インピーダンス化を実現した。また、(3)については1次側1ターン巻きによる低漏れインダクタンスのパルストランスを開発した。またこの低電圧化によって、安価な低電圧部品を使用することが可能となりパルス電源の低価格化も期待できる。表2にパルス電源の主な仕様を示す。

表1: 50MW Xバンドクライストロンの主な仕様

周波数	11.424 MHz
RFパルス幅	1.0 $\mu$ s
ピーク出力電力	50 MW
ビーム電圧	450 kV
ビーム電流	241 A
パービアン	0.8 $\mu$
繰り返し	50 Hz
効率	47 %

<sup>1)</sup> E-mail: mitsuo.akemoto@kek.jp

表 2 : クライストロン電源の主な仕様

最大ピーク出力電力	142 MW
パルストランス昇圧比	1:32
最大 1 次側出力パルス電圧	16 kV
最大 1 次側出力パルス電流	8.9 kA
PFN 総容量	0.864 $\mu$ F
パルス立ち上がり時間(10-90%)	0.8 $\mu$ s
パルス平坦度(ピークからピーク)	0.2%
パルス半値幅	3.0 $\mu$ s
最大サイラトロンアノード電圧	32 kV
最大サイラトロンアノード電流 / 本	4.5 kA
パルス繰り返し	50 Hz
重量 ( 電源本体 )	1200 kg

## 4 . 回路構成と特徴

### 4.1 回路構成

図 1 にパルス電源の回路構成を示す。420V 3 相 50Hz を受電し、32KV まで 4 並列の PFN を充電するインバータ電源、PFN を放電するための 2 本のサイラトロン、500kV に昇圧する 1:32 のパルストランス (油中使用) から構成される。

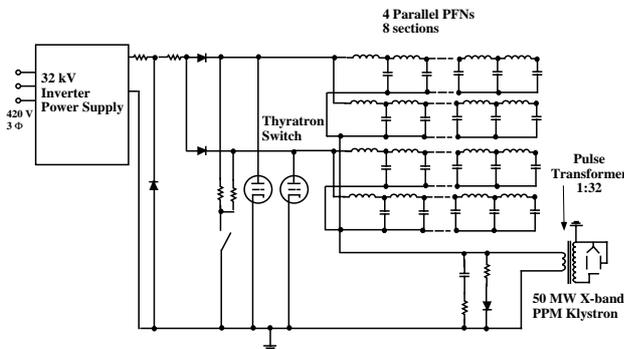


図 1 : パルス電源の回路構成

図 2 に外観写真を示す。パルス電源本体とパルストランスのタンクは共通のベースプレート上に置かれ、クライストロンはタンクの上に装着される一体型となっている。電源本体の筐体は操作性を考慮して、上部前面はコントロールパネル、インバータ電源、クライストロン及びパルストランス関連の電源ユニットが取り付けられており、運転に必要な制御、モニターが全てできるようになっている。また下部には PFN、サイラトロン等の高圧関係が収納されている。パルス電源本体を幅 1.6m、奥行 1.0m、高さ 2.0m と小型である。

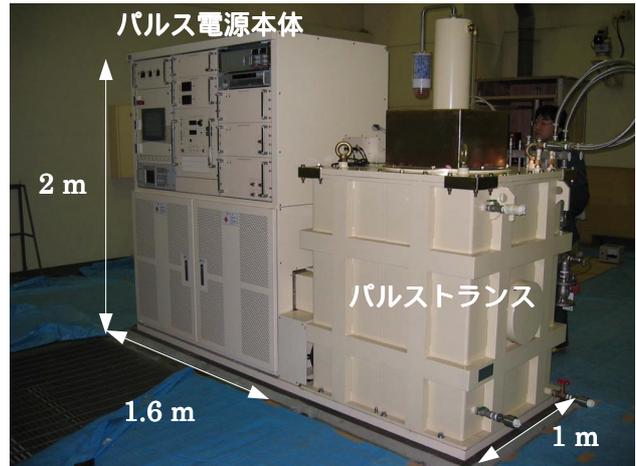


図 2 : パルス電源の外観写真

### 4.2 インバータ電源<sup>[3]</sup>

主スイッチ素子に IGBT を使用したフルブリッジインバータ方式で、約 33 KHz のスイッチング周波数で効率 85%、安定度  $\pm 0.15\%$  を実現している。50 Hz の低線返しの負荷条件においても 85% 以上の高力率が維持できるよう力率改善回路を設けている。19 インチラック装着構造で、奥行 630mm、高さ 450mm と小型である。

### 4.3 PFN 回路

特性インピーダンス 1.8  $\Omega$  の低インピーダン PFN 回路を実現するために 4 並列 8 段とした。各列の特性インピーダンスは 6.9  $\Omega$  で、各段のインダクタンス及びコンデンサの容量は 1.3  $\mu$ H、27 nF である。各段のインダクタンスの値は十分波形調整が可能な値になっている。PFN コンデンサの残留インダクタンスは出力波形の特性に大きく影響するので極力低減しなければならない。そのためブッシングを持たないプラスチックケースの NH 型フィルムコンデンサを採用した。また PFN の構造、配置も波形の特性に大きな影響を与えるので、接続ラインは幅の広い板を多用し、低インピーダン化に努め、PFN とパルストランス間が最小の距離で接続される配置にした。PFN とパルストランス間の伝送ラインは、パルス波形を変えずに伝送する線路として、特性インピーダンス 1.8  $\Omega$  の 3 重平行平板線路を使用した。

### 4.4 サイラトロン

サイラトロンの性能から、PFN 回路の各 2 並列分を 1 本のサイラトロンでスイッチする。サイラトロンは E2V 社製の 1 ギャップの CX1174C を採用した。定格ピークアノード電圧、電流は 40 kV、6 kA、定格平均電流は、4 A である。空冷で使用し、ドライバーは E2V 社製の MA2709A を使用した。

## 4.5 パルストランス

出力パルス幅が  $3\mu\text{s}$  と短いため、立ち上がり特性の優れたパルストランスが要求される。立ち上がり時間はパルストランスの漏れインダクタンスと分布容量の時定数で決まる。このため、漏れインダクタンスと分布容量を低減する設計が必要である。この時定数は2次側の巻線数に比例していることに着目して、それを最小にする、1次側を1ターン巻きにする手法で設計した。ただし、この手法はコアの断面積とパルス平坦部の垂れが大きくなるが後者についてはPFNの波形調整で補正する。

## 4.6 制御システム

クライストロン含めた電源の制御はプログラマブルコントローラ(PLC)で行い、操作はタッチパネルによるグラフィカルな画面ですべての制御ができるようになっている。リモートコントロールはCAMAC経由で行われる。

## 5. 性能試験

パルストランスの2次側に  $1766\Omega$ の抵抗負荷をつけて、PFN調整後出力パルス波形の特性を測定した。図3に充電電圧  $32.4\text{kV}$ でのPFN充電電圧・電流波形を示す。図4にその時測定されたピーク電圧  $453\text{kV}$ の出力パルス波形を示す。立ち上がり時間(10-90%)は  $0.75\mu\text{s}$ 、パルス幅  $3\mu\text{s}$ の良好な波形が得られた。また図5はパルス平坦部を拡大したもので、要求される平坦度及び平坦幅が得られていることが確認できた。

## 6. まとめ

小型・軽量かつ高性能なパルス電源を開発することができた。今後、サイラトロンの半導体化、パルストランスの立ち上がり特性の更なる改善等を行い、より高性能なパルス電源に仕上げたい。またこれから、実運転がはじまるので、設計上及び製作上問題がないかを調査する。

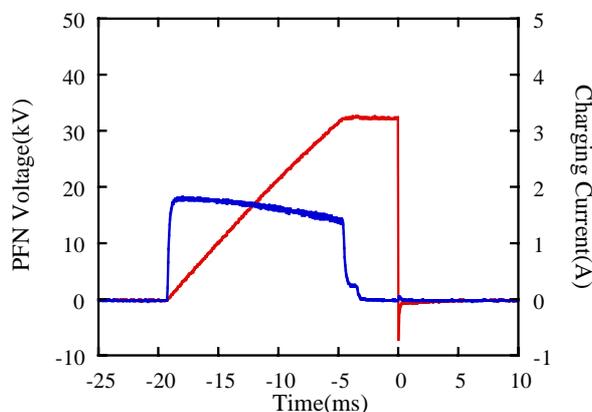


図3：PFN充電電圧・電流波形

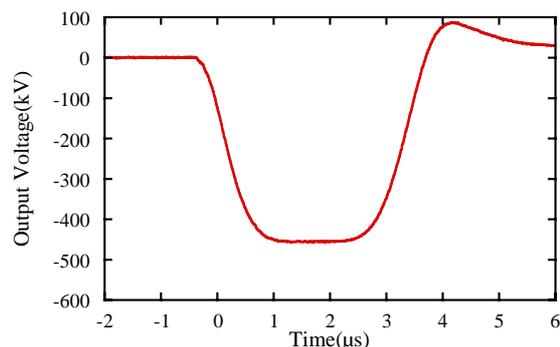


図4：パルス出力波形

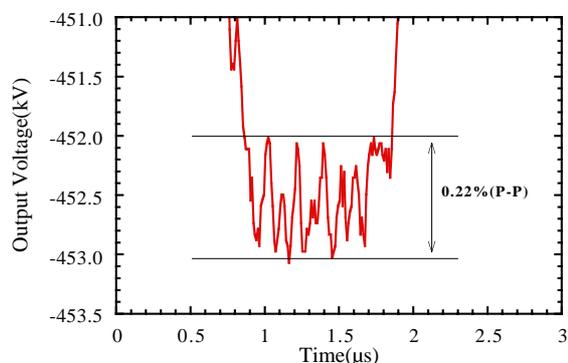


図5：パルス出力波形平坦部拡大

## 謝辞

この電源の設計、製作には東芝電波特機(株)の方々に御協力を得ました。この場を借りてお礼を申し上げます。また、この研究は、文部科学省から放射線医学総合研究所が依頼された医療用先進小型加速器開発プロジェクトによって進められているもので、本推進委員会の御理解に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 土橋克宏、他、“X-band リニアックを用いた小形硬 X線源 ビームライン全体の設計、開発の現状”，in these proceedings.
- [2] 徳本修一、他、“Xバンド PPM クライストロンの開発”，in these proceedings.
- [3] 飯田謙二 他，“コンデンサ充電用インバータ電源”，Proceedings of the 27<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, (2002)252-254.