

線型加速器クライストロン用
絶縁油密閉型モジュレータ電源の製作
仕様書

1. 目的

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構（以下「QST」という。）が運用する NanoTerasu の 3GeV 線型加速器では、20 台の C バンド加速ユニットを使用している。この加速ユニットは 50 MW 出力のパルスクライストロンを高周波源として使用する。本件は、パルスクライストロン用電源(モジュレータ電源制御ユニット、モジュレータ電源、充電器)を製作するものである。

2. 概要

NanoTerasuの3GeV線型加速器は、電子ビームを加速するために大電力高周波を必要とする。大電力高周波生成のためのクライストロンには、350kVの高電圧パルスが印加される。本件においては、クライストロンの印加電圧を安定に生成できる電源（モジュレータ電源、充電器、および制御装置）を製作する。モジュレータ電源は、電源本体、制御部、ヒーター回路で構成される。

本電源はライン方式のパルス電源で、350kVの高電圧パルスを出力する。コンデンサ充電器(以下、「充電器」という。)により、本電源のライン型PFN回路のコンデンサに最大50kVまで充電した後、サイラトロンでパルス化しピーク値で約25kV、4.5 μ sec以上の幅の高電圧パルスを出力する。このパルスをパルストランス（変圧比1：16）にて約350kVに昇圧し、クライストロン(支給品)のカソードに印加する。

電源本体は、上記の高電圧パルス出力回路に加え、保護回路、ヒーターライン、測定器などを収納したタンクであり、その上面にクライストロンを設置する。タンク内を電気絶縁油(以下、「絶縁油」という。))で満たして、放電を防止する。絶縁油はタンク内部に備えた水冷フィンにより自然対流で冷却する。

制御部は、電圧、電流波形などをモニタし、異常発生時のインターロック処置を行う。また、集束コイル電源やイオンポンプ電源の周辺機器(支給品)を制御する。上位制御機器とはEtherCATにより通信を行い、遠隔制御可能とする。

ヒーター回路は、クライストロンやサイラトロンにヒーター電力を供給し、異常発生時には保護処置をとる。

これらの機器を製作し、クライストロン実負荷を用いた工場試験を行う。

3. 仕様範囲

クライストロン用絶縁油密閉型モジュレータ電源 1 式

(内訳)

- ・ モジュレータ電源の製作 1 ユニット
電源本体、制御部、ヒーター回路、付属するケーブル（高電圧ケーブルを含む）
- ・ 高電圧コンデンサ充電器 1 式
高電圧発生部、制御部、付属するケーブル類
- ・ モジュレータ電源及び充電器の工場試験
- ・ 動作試験（制御通信試験、高電圧運転試験）

必要な材料手配、製作、試験、梱包、輸送を行うこと。

4. 一般事項

(1) 納入場所

宮城県仙台市青葉区荒巻青葉 468-1
NanoTerasu 線型加速器棟

(2) 納期

令和 8 年 3 月 13 日

(3) 提出書類

下記の書類を、指定された時期に提出すること。

書類名	提出時期	部数
納入仕様書 確認図（回路図、構造図、動作シーケンスを含む）	製作前	文書 1 部
工場試験要領書	工場試験前	文書 1 部
工場試験成績書	納入前	文書 1 部
完成図書 上記の書類と、以下の書類をファイルに綴じたもの。 ・取扱説明書	納入時	文書 1 部
・電子データ (完成図書の各書類の PDF ファイルと、図面の DXF ファイル)	納入時	電子メディア (CD や USB メモリなどの電子記録媒体)

(4) 検査条件

- ① 本仕様書に記載した各種試験を実施し、合格すること。試験前に試験検査要領書を作成し QST 職員の確認を得ること。試験結果は試験検査成績書に記載して、提出すること。
- ② 外観検査・員数検査を行い、QST が合格と認めること。
- ③ 試験検査成績書、その他の提出図書の確認を行い、QST が合格と認めること。

(5) 技術打合せ

- ・ 工程進捗の管理者を設け、月 1 回以上の定期報告を行うこと。

(6) 貸与品・支給品

貸与品の物品名、員数を表 5-6 に示す。

貸与場所からの輸送は受注業者が負担して行うものとする。

貸与場所：宮城県仙台市青葉区荒巻青葉 468-1

NanoTerasu 線型加速器棟。

支給日：令和 7 年 5 月以降。詳細は別途協議とする。

(7) 情報開示

機構設計図、回路図、パターン設計図、FPGA 及び PLC などソースコードといった設計情報は、担当者の要求に応じて全て開示するものとする。ただし、開示情報は契約目的以外には使用しないものとする。電気回路図、制御回路図の設計情報は、完成後あるいは製作中に随時、開示し協議を行うこと。特にインターロックの設定条件や設定値について、詳細を明記すること。制御シーケンスについては、ソースコードを開示すること。

(8) 品質管理

本品の製作に係る設計・製作・試験等は、全ての工程において、以下の事項等について十分な品質管理を行うこととする。

- ① 管理体制
- ② 設計管理
- ③ 外注管理
- ④ 現地作業管理
- ⑤ 材料管理
- ⑥ 工程管理
- ⑦ 試験・検査管理
- ⑧ 不適合管理
- ⑨ 記録の保管
- ⑩ 重要度分類
- ⑪ 監査

(9) 適用法規・規格基準

本品は、放射線同位元素等規制法（RI 規制法）の適用を受ける放射線発生装置を構成するものである。従って、設計・製作・試験・据付調整等にあたっては、以下の法令、規格、基準等を適用または準用して行うこと。

- ① 放射性同位元素等規制法（RI 規制法）
- ② 労働安全衛生法
- ③ 日本工業規格（JIS）
- ④ その他受注業務に関し、適用または準用すべき全ての法令・規格・基準等

(10) 機密の保持

受注者は、本品の製作にあたり、QST から知り得た情報を厳重に管理し、本業務遂行以外の目的で、受注者及び下請会社等の作業員を除く第三者への開示、提供を行ってはならない。ただし、予め QST 担当者の承認を得た場合にはこの限りでない。

(11) 契約不適合責任

契約不適合責任については、契約条項のとおりとする。

ただし、サイラトロンについては、カソードヒータ通電時間が 500 時間を超えてからの故障については保証の範囲外とする。

(12) グリーン購入法の推進

(a) 本契約において、グリーン購入法（国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律）に適合する環境部品（事務用品、OA 機器等）が発生する場合は、これを採用する。

(b) 本仕様書に定める提出図書（納入印刷物）については、グリーン購入法の基本方針 に定める「紙類」の基準を満たしたものであること。

(13) 知的財産権

知的財産権については、知的財産権特約条項のとおりとする。

(14) グリーン購入法の推進

本契約において、グリーン購入法（国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律）に適合する環境物品（事務用品、O A 機器等）の採用が可能な場合は、これを採用するものとする。

(15) 協議

本件は仕様書に基づいて行うものとし、これらに疑義が生じた場合は QST 職員の指示に従うこと。部材や製作・施工方法、試験・測定方法、寸法や形状等は原則、仕様書に記載する方法や値を採用すること。機器構成を含む詳細については QST 担当者の指示に従うこと。

(16) その他

- ・ 製品の契約不適合について明らかになった場合、性能が保証できるよう速やかに対応すること。
- ・ 故障発生時には、連絡後、通常 48 時間以内に、緊急の要請があった場合には 24 時間以内に、現地において技術者が復旧作業を行えるアフターサービス・メンテナンス体制を整備すること。
- ・ 契約不適合責任期間内外を問わず、故障・不良等が発生した場合には、速やかな対処が可能であること。また、原因、対処方法を速やかに担当者に報告すること。

5. 仕様

(1) 全体構成

本電源は、パルス電圧を生成するモジュレータ電源と、モジュレータ制御部、またヒーター電力を制御するヒーター回路から構成される。本電源の構成を図5-1に示す。

モジュレータ電源は、PFN回路(Pulse Forming Network Circuit)、パルストランス回路、サイラトロン及びそのヒータ・リザーバ電源、電圧・電流モニタ、保護回路などが含まれる。

モジュレータ制御部とヒーター回路は19インチラック内に設置され、モジュレータ電源間とのトリガ駆動信号やモニタ信号の処理、またヒーター電力の制御などを行う。上位のMTC AモジュールとはEtherCAT通信を行う。

モジュレータ電源のPFN回路コンデンサは、高電圧を発生する充電器により充電される。このコンデンサ充電器は、高電圧発生部と19インチラック内の充電器制御部で制御される。高電圧発生部では、三相AC400Vを受電し、高周波スイッチングにより最大50kVまでの高電圧を発生して、モジュレータ電源のコンデンサを充電する。この約470nFのコンデンサに対し、最大50kVで25ppsの高電圧充電運転を行う。このとき、高効率な充電動作を実現するため、スイッチング周波数を共振周波数に一致させる共振充電方式を用いる。また、コンデンサの充電電圧をフィードバック制御し、設定電圧付近で200ppm (pk-pk)以下の高精度で電圧整定を行う。制御部は、フィードバック制御・動作制御・インターロック処理を行う。動作制御は、PLC-CPUによる制御ラダーで実現される。本充電器はEtherCAT通信により上位制御機器からの遠隔制御とデータ送受信を実現する。

モジュレータ電源の上面には、クライストロンが集束コイルと共に組み込まれる。集束コイルは、19インチラック内の集束コイル電源で励磁される。クライストロンに装着された真空イオンポンプは、19インチラック内のイオンポンプ電源で高電圧印加される。

図5-2に本電源のインターロック線、通信線の配線図を示す。モジュレータ制御部に外部からの安全、機器保護、真空インターロックと、クライストロン・集束コイルの冷却水流量、集束コイルの温度インターロックなどが集約され、動作停止を行う。モジュレータ制御部とクライストロン集束コイル電源はDeviceNet、イオンポンプ電源はピン制御で接続され、動作制御される。充電器は充電器制御部が外部インターロックを受け、動作停止を行う。

モジュレータ電源の使用環境及び各部の具体的な仕様を以下に記す。

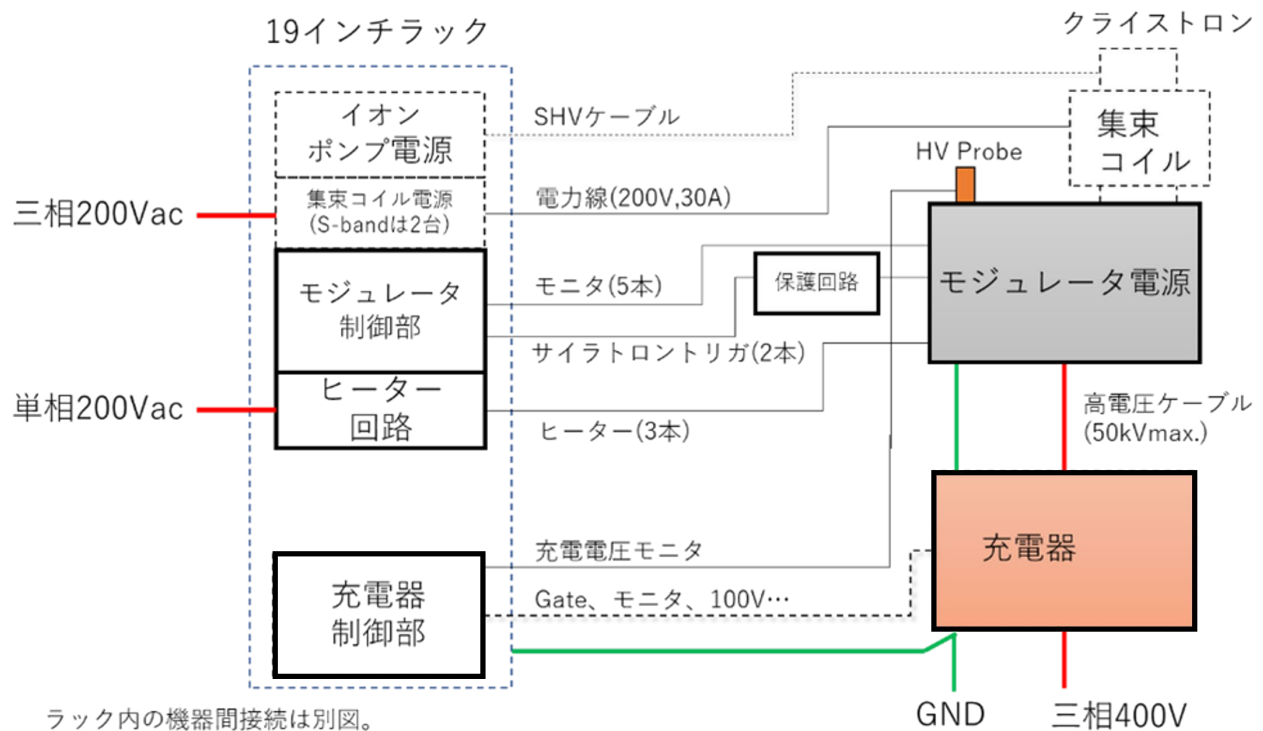


図 5-1： 機器構成及び配線系統参考図。点線は製作範囲外。また、インターロック線、通信線の配線図は図 5-2 に示す。

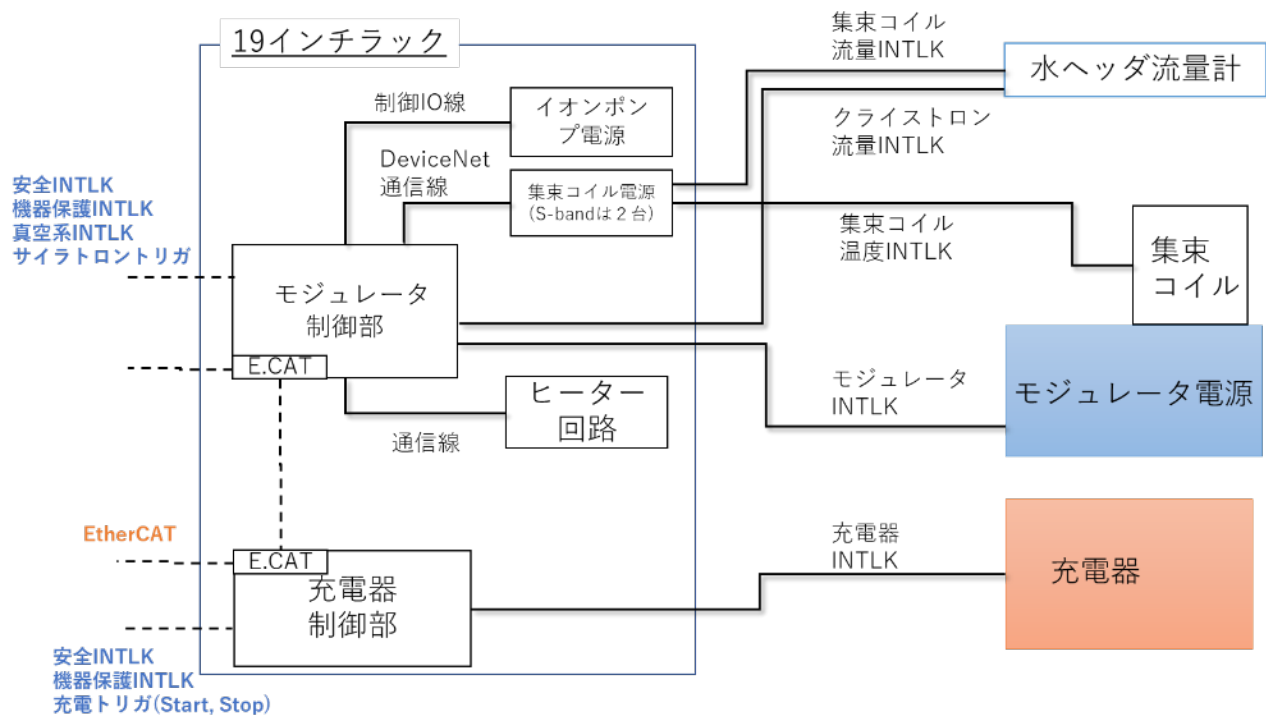


図 5-2： インターロック線及び通信線の配線系統参考図。配線作業は対象外とする。

(2) 本機器の使用条件

(ア) 温度： 20-35 °C

(イ) 湿度： 50±20 %

(ウ) 充電用高電圧： 外部からコンデンサ高電圧充電器にて供給。

最大充電電圧：+50 kV、充電想定容量：470nF、最大繰返し：25pps

(エ) クライストロン及び集束コイル

クライストロン(TOSHIBA E37306、E37202 相当品)

集束コイル(TOSHIBA VT-68943, VT-68926B 相当品)

(オ) 供給 AC 電力：

- ・ 充電器用： 三相 400V±5%、50 Hz
- ・ ヒーター用： 単相 200V±5%、50 Hz
- ・ 集束コイル電源用： 三相 200V±5%、50 Hz
- ・ 制御回路用： 単相 100V±5%、50 Hz

(カ) 冷却水

- ・ 水質： 純水
- ・ 圧力損失： 0.2 MPa 以下（背圧を除く）
- ・ モジュレータ電源及びコンデンサ充電器への供給流量： 10 L/min 程度

(3) 電源機能

- ・ サイラトロン及びクライストロンに、ヒーター電力を供給する。(LV 通電)
- ・ 充電器により PFN コンデンサに高電圧が充電された状態で、トリガ信号によりサイラトロンを高速スイッチングし、クライストロンに高電圧パルス进行加する。(HV 出力)
- ・ 電源の状態や、パルス出力に異常が発生した場合は、これを検知し、インターロックで停止する。

(4) パルス出力特性

負荷としてCバンド・クライストロン（E37202相当）を接続し、表5-1と図5-3に示すパルス高電圧を得られること。

表5-1:モジュレータ電源の出力パルスの主な電気仕様

	項目	定格
①	PFN 充電電圧（正極性）	+50 kV(max.)
②	クライストロンカソード電圧（負極性）	-350 kV(pk)※
③	クライストロンビーム電流	311 A(pk) ※
④	クライストロンカソード逆電圧	+45 kV 以下 ※
⑤	サイラトロン逆電圧	-10 kV 以下
⑥	パルス幅（電圧 50%幅）	4.5 μ sec 程度
⑦	平坦部（電圧がピークの 97%以上）の時間幅	2.5 μ sec 以上
⑧	平坦部の Droop（垂れ）	ピーク電圧の 5%以下 (目標値 3%以下)
⑨	平坦部のリップル	全幅 4%以下 (目標値 2%以下)
⑩	最大繰返し	25 pps

※クライストロンの特性に依存するので、参考値とする。詳細は別途協議とする。

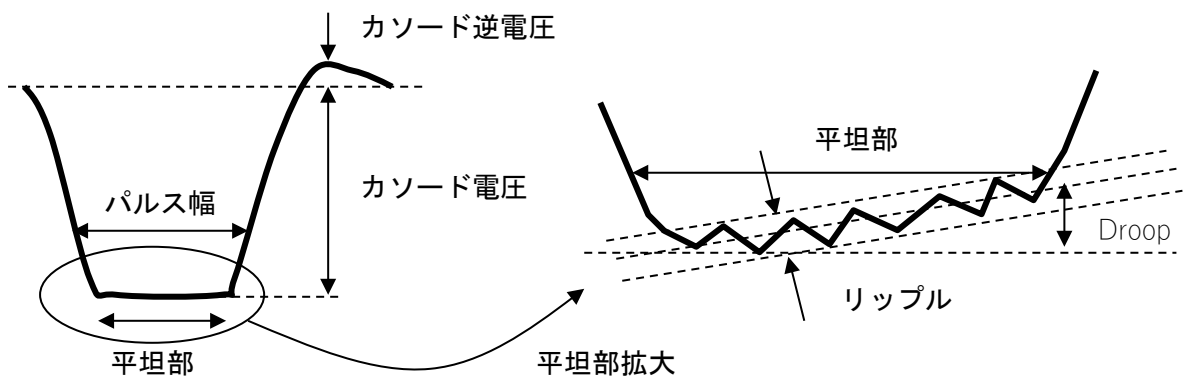


図 5-3. 出力電圧波形の概形

(5) モジュールータ電源本体の詳細仕様

共通特記事項

- ・ 電源本体の内部回路図を図 5-4 に示す。
- ・ 充電器の内部回路図を図 5-5 に示す。
- ・ タンク内部の機器には高電圧が印加されるので、使用する銅板・導線やネジ等には突起やバリがないこと。特に、打ち抜き部品を使用する際は、高電圧側に丸みのある方を使用すること。
- ・ 工場から納入までのトラック輸送に耐える耐震構造とすること。
- ・ 仕様に特に指定しないものの使用材料は、JIS 規格または相当品以上のものを使用すること。
- ・ 油中で使用する機器・部品は油中仕様以外のものは不可。例外が生じた場合は別途協議すること。

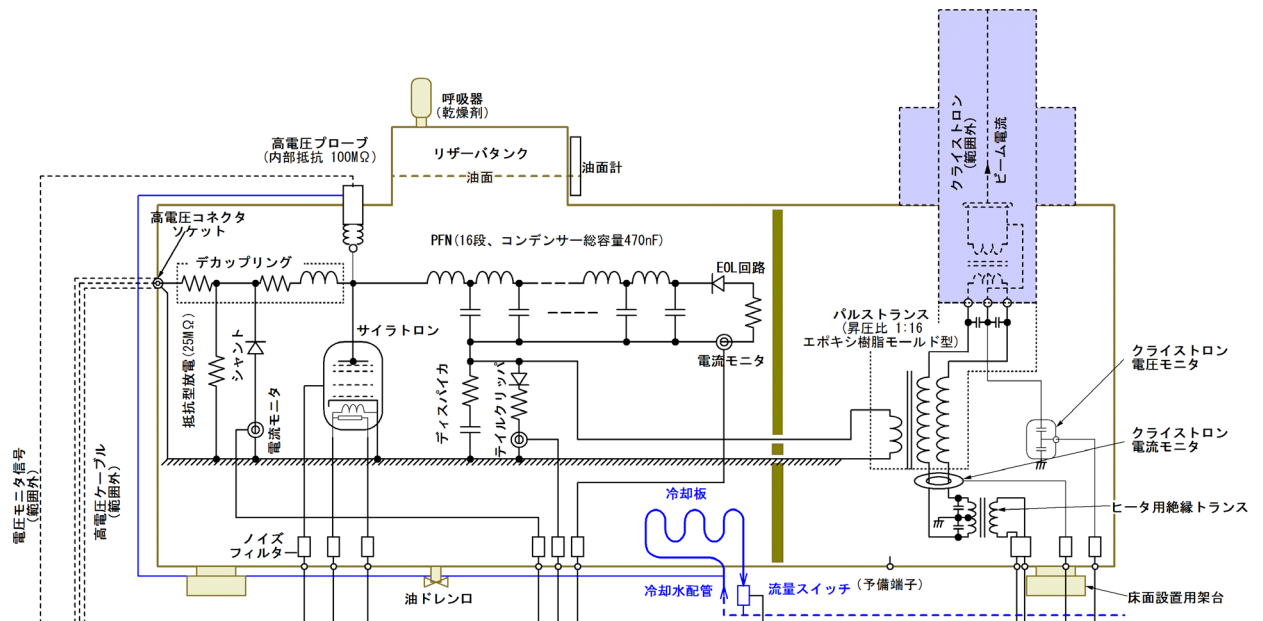


図 5-4：モジュールータ電源本体の構成図（参考）

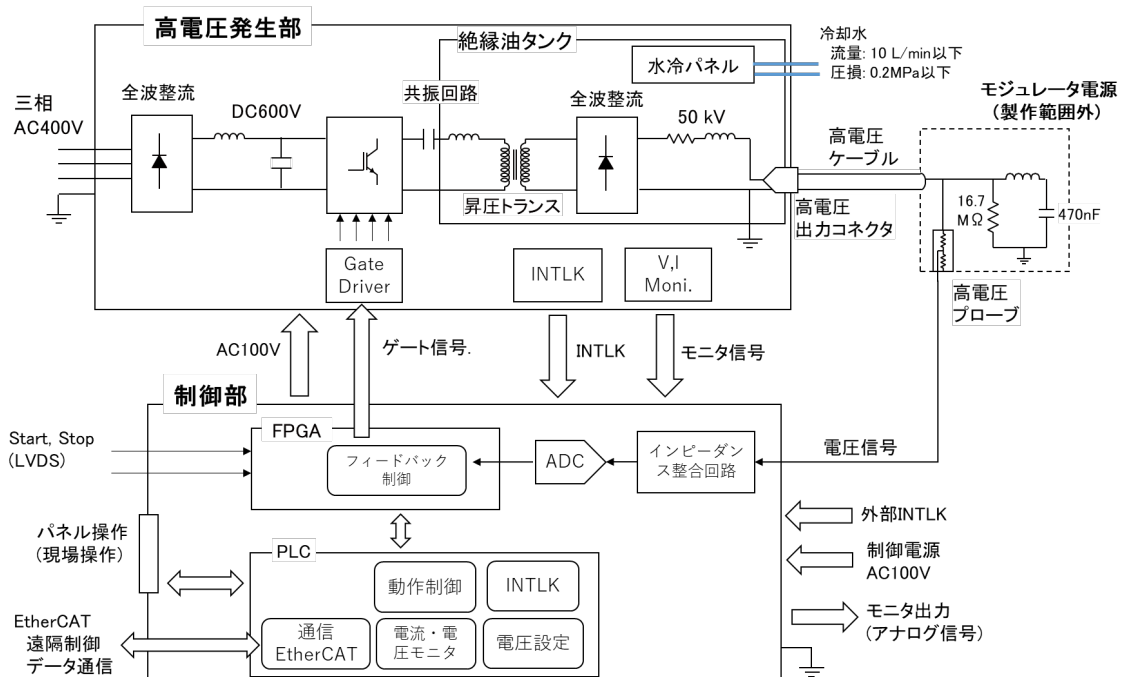


図 5-5：高電圧コンデンサ充電器の構成ブロック図（参考）。

① モジュール電源本体タンク

- ・ 上部にクライストロンなどの重量物を支持し、また、内部に絶縁油を密閉できる構造であること。
- ・ 側面には側板を配し、内部の機器・部品の交換作業などが容易に行える構造であること。ただし、側板は、閉止時に、内部の絶縁油を確実に密閉できるものとする。
- ・ 材質： 本体は鉄製とし、無電解ニッケルメッキとする。蓋板等は SUS。
- ・ 大きさ： 長さ 1.7m×幅 1m×高さ 1.25m(床面からクライストロン接続面)。ただし、冷却水配管等の出っ張りは除く。また、高さは、上部の油バッファタンクの高さは除く。
- ・ クライストロン及び集束コイルを、上面フランジの挿入口に取り付け支持する。
- ・ 油面は上記フランジ面より常に上とする。油の熱膨張を考慮し、油体積の 3%以上の容積を持つバッファタンクを上部に設けること。油面計をつけること。
- ・ バッファタンク上部には通気口を設け、呼吸器（乾燥剤）を取り付け油の吸湿を防止すること。通気口の形状は NW40 のフランジに適合するものとする。
- ・ バッファタンクの天板部は開閉可能とし、後述するサイラトロンユニットの脱着が、この開口部から行えるようにする。
- ・ 覗き窓を、パルストランスとクライストロンの接続口付近に設ける。覗き窓は、アクリル製とし、0.6 気圧以上のタンク内加圧で窓が外れ圧力を逃す防爆構造とする。また、窓外側表面には放電防止用の金網を張り、それを金属フレームで押さえて固定すること。
- ・ 覗き窓のある面の側板には、クライストロン電子銃部からの放射線を遮蔽するため鉛板（厚み 3mm、大きさ 500mm×250mm）を取り付けること。また覗き窓にも、鉛シート 5mm の遮蔽を備えたカバーを製作すること。詳細は別途打合せとする。
- ・ タンク内の内壁には、冷却パイプに吸熱板が付いた冷却ユニットを取り付けること。
- ・ タンク底面に、油ドレイン口を 2 カ所設けること。
- ・ 据付終了後、床面へ耐震固定できる構造とする。耐震強度は、水平方向、垂直方向共に加速度 0.4G にて、転倒、破損しないことを基準とする。

② PFN 回路

- ・ インダクタコイルとコンデンサのライン型。段数は 16 段。コンデンサの総容量 470nF とする。
- ・ コイルのインダクタンスは最大 $1\mu\text{H}$ 、最小 $0.3\mu\text{H}$ 程度を予定している。詳細については打合せの後、決定すること。
- ・ コイルは固定型とし、調整機能は設けない。絶縁油中のコイルは絶縁を十分に保て、絶縁油に対しても安定な材料を用いて製作すること。
- ・ コンデンサは、筐体が軽量の樹脂ケースのものを使用すること。

③ サイラトロン及びサイラトロンユニット

- ・ サイラトロンは、定格動作において安定して長期で動作する実績を持つものを選定すること。
- ・ サイラトロンの適切な使用法に従い、グリッド分圧回路、トリガ用フィルタ回路、カソードヒータライン、リザーバーヒータライン等を設けること。

- ・ これらをユニット化した構造とし、そのユニットは、バッファタンク天板から、タンクの油を抜かずに吊り上げられるものとする。
- ・ ユニット外との配線接続（大電力パルス、トリガ、ヒーター）は差込接触型のコネクタで接続されること。これらのライン及び接地の接続は、上部からの挿入のみで十分な電気接触が確保されること。
- ・ ユニットのクレーンなどで吊り上げた時に、ユニットが傾かないように、重心バランスを調整すること。
- ・ サイラトロンのグリッド間には、グリッド分圧回路を設置し、各グリッドの印加電圧が適切となるものとする。
- ・ トリガ用フィルタ回路を、トリガグリッドへの接続部直下に設置する。このフィルタ回路は、制御部のトリガパルス回路からのトリガパルスをグリッドに印加するが、サイラトロンからの高電圧サージは吸収し、外部への漏洩を抑制するものであること。なお、フィルタに使用する部品は、油中使用可能かつ耐サージ用とする。
- ・ トリガラインは、タンク外側にサージ抑制用の TVS ダイオードを組み込んだ保護回路を挿入し、高電圧サージを吸収する。保護回路は金属筐体に収め、筐体はダイオード不具合時に即時交換できる構造とする。
- ・ カソードヒータライン、リザーバーヒータラインは、絶縁トランスを用いて、サイラトロンからヒーター回路へのサージ漏洩を抑止すること。

④ デカップリング回路

- ・ パルス高電圧発生時に充電器へのパルス電流の逆流を防止するため、高電圧入力側に適切な保護抵抗とインダクタを直列に並べること。

⑤ 抵抗型放電回路

- ・ 上記の保護抵抗とインダクタ間に、25 M Ω の抵抗を対接地間に入れ、PFN コンデンサの電圧を、時定数 10 秒程度で放電できること。

⑥ シャント回路

- ・ ダイオードにてサイラトロンの逆電圧を短絡する。
- ・ 電流検出用 CT を備える。

⑦ EOL 回路

- ・ ダイオード及びマッチング抵抗にて逆電圧パルスを短絡、消費する。
- ・ 電流検出用 CT を備える。

⑧ テイルクリップ回路

- ・ パルストランスの逆電圧をダイオード及び抵抗にて短絡する。
- ・ 電流検出用 CT を備える。

⑨ ディスパイカ回路

- ・ コンデンサ及び抵抗のスナバ回路にて高周波リップルを短絡する。

⑩ 高電圧プローブ

- ・ 内部抵抗は 100 M Ω とする。抵抗値の温度係数は、10ppm/K 以下であること。
- ・ プローブ内部は、フロリナート充填にて絶縁耐圧を持たせること。耐電圧は 60kV 以上とする。
- ・ プローブ本体部に冷却配管を配し、温度安定化を図ること。
- ・ 出力端子は、N 型レセプタクルとする。

⑪ パルストランス回路

- ・ パルストランスは、高電圧パルス（最大 400kV, 315A, 5 μ s）が生成可能であること。
- ・ 巻き数比は 7 巻：112 巻とする。1 次巻線、2 次巻線ともに絶縁樹脂によるモールド型であること。
- ・ 2 次巻線は、高電圧側の最初の 10 巻部分は、巻線間の耐電圧が 50kV 以上であること。
- ・ 出力パルスの立ち上がり時間、立ち下がり時間は、1 μ s 以下であること。
- ・ トランス 2 次側の電流を測定するため CT を設けること。
- ・ トランス 2 次側の電圧を測定するため CVD を設けること。

⑫ 高電圧充電用ソケット

- ・ ソケット 1 個をタンク下部に付ける。
- ・ 同軸型の構造とし、芯線と接地間の耐電圧は 50kV とする。
- ・ ソケットの形状は図 5-6 を参考とし、詳細は別途指示する。

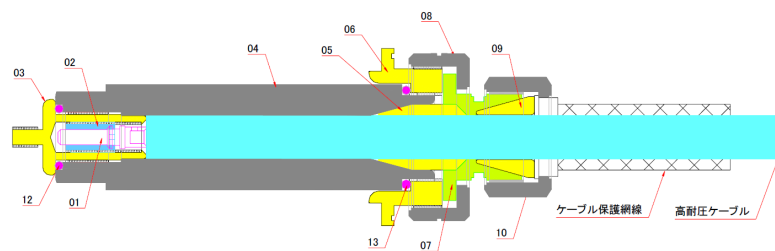


図 5-6: 高電圧ソケット及びコネクタ（参考図）

⑬ コネクタケース

- ・ コネクタケースはタンク下部に設置すること。
- ・ 同軸線コネクタはフィードスルー型を用い、ノイズ漏洩の防止に努めること。
- ・ 各ヒーターラインには密閉型同軸ベア型ノイズフィルターを挿入し、タンク内で発生した電磁ノイズを遮断すること。

⑭ 冷却板、冷却水配管

- ・ 油中に冷却水を通した冷却板を設け、自然対流にて絶縁油を冷却すること。
- ・ 油の冷却能力は、上部の油温度が定格運転時において 50°C 以下となるように設計すること。
- ・ 流量スイッチを設置すること。規定流量以下の時に接点開となり、高電圧、ヒーター等を停止するよう、インターロック機構を設けること。
- ・ タンク内部の冷却配管は一本の銅管で製作し、継ぎ目は厳禁とする。
- ・ タンク外部の配管継手は、かしめ型継ぎ手を使用すること。

⑮ 絶縁油

- ・ 絶縁油は、電気絶縁油 1 種四号(JIS C 2320)に適合するものを使用すること。
- ・ 使用する油量は、1 台あたり 1800L 以下とする。
- ・ 内部機器を組み込み後に、タンク内部を絶縁油でフラッシング洗浄すること。

⑯ エアーパッド及び固定足

- ・ 機器の支持足として、エアーパッド 3 カ所（クライストロン側 2 カ所、PFN 回路側 1 カ所）を用いること。
- ・ エアーパッドに圧縮空気(圧力 5kg/cm²)を供給することで、電源全体を僅かに浮かせ、電源の細かい移動を容易とすること。なお、使用される床面は平坦化されているものとする。
- ・ PFN 回路側には、エアーパッドを挟む形で固定足を取り付けること。

(6) モジュール電源制御部

- ・ 制御部は、表示・操作、外部通信、インターロック処理機能、モニタ信号処理を行う。
- ・ EIA 規格の 19 インチラック内に収納できること。ラックは本件範囲外とする。
- ・ 奥行きは 700mm 以内とし、高さは、後に述べるヒーター回路と合わせて 10U 以内とする。

① 操作・表示部

- ・ 前面に、タッチパネル(10 インチ以上、カラー)を備え、機器の状態表示と操作、また周辺機器の状態表示と操作を行えること。
- ・ 前面に、AC100V の ON/OFF スイッチを備えること。
- ・ 非常停止スイッチを設けること。スイッチには、誤動作防止カバーを備えること。

② シーケンスコントローラ (PLC)

- ・ 横河電機製 FA-M3 シリーズもしくは相当品を用いること。
- ・ モジュール電源制御部内に CPU モジュールを備え、ラダープログラムにて動作処理を行う。
- ・ 上位制御系(MTCA.4)とは、EtherCAT を用いて通信を行い、遠隔操作により動作制御を行えること。また、EtherCAT を通じて、上位制御系に、動作状態、モニタ値、インターロック状態などの情報を出力できること。

③ トリガパルス回路

- ・ 上位トリガシステムからのトリガー信号(LVDS 信号、100 Ω 差動平衡)を受け、サイラトロンの動作に必要なトリガパルスを出力すること。
- ・ 上位からのトリガ線との接続は、M12 コネクタを想定すること。ピンアサインなどは別途指示する。
- ・ トリガパルス発生器は、使用するサイラトロンを長期に渡り安定的に運用できるパルス条件を満たすものを選定すること。
- ・ トリガ出力ラインには、インピーダンス整合回路、モニタ用分圧回路を備え、トリガ波形をオシロスコープなどで直接測定できるようにすること。

④ 電流、電圧モニタ回路

- ・ 下記 7 点の電圧、電流を測定する。
 - クライストロン 電圧モニタ
 - クライストロン 電流モニタ
 - EOL 回路電流
 - シャント回路電流
 - テイルクリップ回路電流
 - サイラトロン G1 トリガ電圧モニタ(波形のみ)
 - サイラトロン G2 トリガ電圧モニタ(波形のみ)
- ・ 各信号をバッファし、モニタ出力端子を前面パネルに備えること。クライストロン電圧・電流モニタは、背面にも出力端子を設けること。信号形式は別途指示する。
- ・ 各信号(G1 トリガ,G2 トリガを除く)のピークホールドあるいはサンプルホールドを AD 変換し、各信号のピーク値を上位に伝送すること。また、制御部内にてインターロック判定を行い、過電圧、過電流などの異常発生時から 15ms 以内に停止処理を行えるようにすること。

⑤ インターロック処置

- ・ 異常発生時には、インターロックに応じて HV 出力停止、LV 通電の停止処置を行うこと。
- ・ HV 出力停止は、インターロック発生時から 15ms 以内に行えること。
- ・ 非常停止ボタンが押された場合は、HV 出力、LV 通電を停止すること。
- ・ 外部から、下記のインターロック入力を想定すること。入力は、24Vdc による無電圧接点とする。また正常時閉の B 接点とする。
 - 安全インターロック: HV 出力停止
 - 機器保護インターロック: HV 出力停止、LV 通電停止
 - 真空インターロック: HV 出力停止
- ・ 外部へ、下記のインターロック出力ができること。出力は無電圧接点とし、印加電圧は 24Vdc に対応すること。また正常時閉の B 接点とする。
 - HV 出力停止
 - LV 通電停止

(7) ヒーター回路

- ・ 本回路は、200Vac(単相 3 線式)を受け、本体へ下記のヒーター電力を供給する。電圧電流値は参考値とし、使用する機器に応じて変更すること。
 - サイラトロン・カソードヒータ: $6.3V \pm 5\%$ 、80-100A
 - サイラトロン・リザーバヒータ: $6.3V \pm 5\%$ 、6-8A (出力電圧調整機能付き)
 - クライストロン・カソードヒータ: 110V 以下、5.5A 以下 (出力電圧調整機能付き)
- ・ クライストロン・カソードヒータ及びサイラトロン・リザーバヒータの系統には、スライダックなどを用いて、出力電圧を調節可能とすること。ただし、スライダックの出力側には、1:1 巻の絶縁トランスを入れ、出力の midpoint を接地すること。
- ・ クライストロン・カソードヒータの電力系統では、ヒーター投入時の過大電流を防止するため、投入後 15 分はヒーター電力を段階的に上昇するなどの機能を持つこと。また、ヒーター電力を半減する待機モードへの切替機能を有すること。

- ・ 各々の電流値、電圧値及びインターロック情報を、制御部に送信すること。また、過電圧や過電流などの異常時には、高電圧出力やヒーター出力が停止できるようにすること。
- ・ 本回路は、19 インチラックに設置できるものとする。奥行きは 700mm 以内、高さは制御部と合わせて 10U 以内とする。
- ・ 前面パネルには、200V のスイッチ及び受電状態及び出力状態が分かる LED などの表示を備えることと。

(8) コンデンサ充電器高電圧発生部

① 高電圧発生部

- ・ 外寸の大きさは、幅 1m×奥行き 1m×高さ 1m を外形の上限とする。ただし、性能を損なわない範囲での小型化を検討すること。吊り耳などの突起状の部位の詳細は、担当者の承認を得ること。
- ・ 絶縁油を満たした高電圧タンクを備え、高電圧が印加される機器、部品を収納すること。
- ・ 総重量は 2 トン以内とする。
- ・ 床面にアンカー固定可能なものとする。なお、固定の耐震強度は 0.5G 以上に耐えられること。
- ・ ハンドリフターによる運搬が可能な底面構造であること。
- ・ 筐体下部に接地用端子を備えること。
- ・ 使用場所にて、高圧部内部を開放し、また再組立が可能なこと。
- ・ 高電圧出力コネクタは、図 5-5 を参照の事。詳細は、別途指示するものとする。高電圧発生部は、三相 AC400V を整流し、この直流電圧をスイッチングにより 20kHz 以上に高周波化する。この高周波を昇圧トランスにより高電圧化し、再び整流することで、50kV の直流高電圧を出力すること。
- ・ 放電を防止するため絶縁油を満たした油タンク内に収められること。
- ・ 半導体素子や絶縁油は水冷機構により冷却できること。水冷配管の継ぎは、筐体内で行うことは極力避け、必要な場合は飛散防止対策を施すこと。

② 出力定格

- ・ 前面出力定格は表 5-2 の通りとする。

表 5-2： コンデンサ充電器の出力定格

項目	仕様値	備考
想定負荷	コンデンサ容量:470 nF 抵抗:16.7 MΩ	並列接続
充電電圧（最大）	50 kV	
電圧安定度	200 ppm(pk-pk)以下	ショット毎
繰り返し(最大)	25 pps	外部トリガ信号にて制御される。
効率	80%以上	
スイッチング周波数	20kHz 以上	可聴周波数以上とする。

③ 充電動作

- 外部からのトリガ信号により、コンデンサ負荷への充電動作を開始すること。35ms 以内に充電電圧 50kV、かつ電圧安定度 200ppm (pk-pk)で充電できること。充電動作は、次の2段階を想定する。なお、トリガ信号およびフィードバック制御については、制御部の次項を参照のこと。
- 急速充電：
共振充電動作により、負荷コンデンサを 1.5 kV/ms 以上の速度で充電する。
- 電圧整定：
設定電圧の約 95%にまで近づいたら、充電動作を共振動作から、出力可変モードに変更し、充電電圧をフィードバック制御し、電圧偏差を 200ppm(pk-pk)以下に整定する。

④ 安全保護

- 本装置の異常に対しては電源ラインに遮断装置またはヒューズを挿入すること。(漏電検知は無し)
- 筐体背面には、筐体電位及び周辺機器を確実に接地できる接地用端子を設けること。

(9) コンデンサ充電器制御部

① 充電制御

- 充電開始及び停止は、外部からの Start, Stop トリガ信号により制御される。トリガ信号は、LVDS 信号とする。ただし、充電開始から一定時間、Stop 信号が得られない場合は、インターロックにより停止すること。
- フィードバック制御回路 (FPGA) により、充電電圧に応じて、充電動作変更(急速充電→電圧整定)や、PWM 制御による電圧整定がなされること。
- 充電制御に用いる充電電圧は、モジュレータ電源に備わっている水冷付きの抵抗分圧型高電圧プローブのモニタ出力を用いること。ただし、インピーダンス整合回路を制御部に備えること。参考回路図を、図 5-7 に示す。

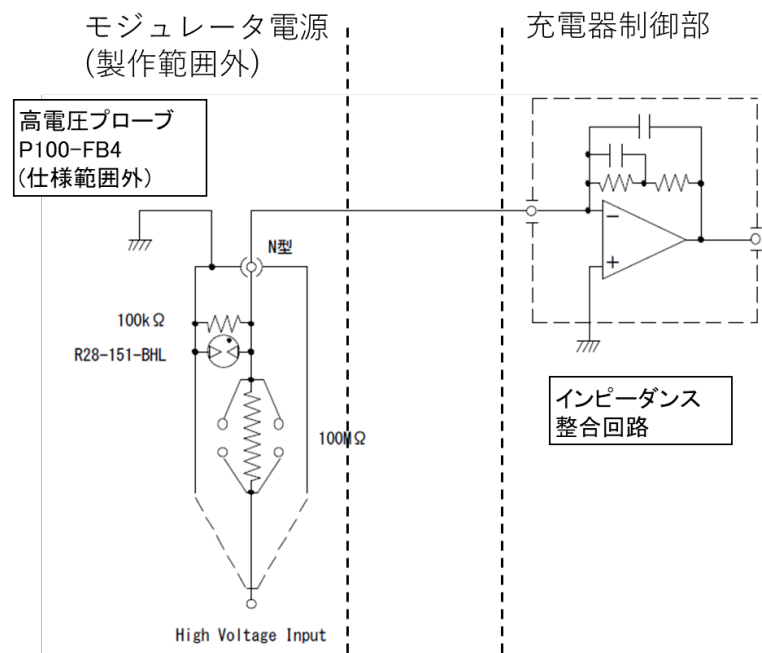


図 5-7：充電電圧モニタ回路（参考図）

② インターロック

- 表 5-3 のインターロックを備え、各異常に対しては適切な停止処置をとること。
機器保護や安全面から必要な追加インターロック項目がある場合は、打合せにて決定する。

表 5-3: インターロック項目

インターロック項目	処置	異常内容
POWER LINE	出力停止 ブレーカーOFF	受電回路の異常
OVER VOLTAGE	出力停止	充電電圧の過大
OVER CURRENT	出力停止	出力電流の過大
FAN	出力停止 ブレーカーOFF	ファンの停止
TEMP	出力停止 ブレーカーOFF	内部部品の過熱
ABNORMAL CHARGING	出力継続 警報のみ	充電完了時（CHARGE GATE 終了時）の充電電圧が、設定電圧から±3%以上の差異がある場合。
CHARGING FAULT	出力停止	ABNORMAL CHARGING が 1 分間に 1-4 回、起こった場合。
TRACKING	出力継続 警報のみ	充電完了時の充電電圧が、設定電圧から±0.2%の差異がある場合。
WATER FLOW	出力停止 ブレーカーOFF	冷却水の流量低下
EXT. INTLK	出力停止 ブレーカーOFF	外部からインターロック信号の入力（接点入力）
INTLK SUM.	接点出力	出力停止の INTLK が発報時に、外部へ信号出力(接点出力)

③ 操作

- 制御部のパネル面におけるスイッチ操作により、以下の操作が可能なこと。ただし、リモート/ローカルの切替と緊急停止スイッチ以外は、現場制御時のみ操作可能とする。
遠隔操作時には、上位制御機器と EtherCAT 通信により、データの送受信と遠隔制御が実現する。
- 現場(ローカル)操作
 - 制御電源の ON/OFF
 - 400V 受電の ON/OFF
 - 高電圧運転許可の ON/OFF
 - 充電電圧の設定
 - Abnormal Interlock 無効回数の設定
 - インターロックホールド状態のリセット
 - リモート・ローカル切り替え（ハードスイッチ）

- 緊急停止スイッチ（誤操作対策を施すこと）
- ・ 遠隔(リモート)操作
 - “AC INPUT ON/OFF 信号”による AC400V 電力の ON/OFF
 - “HV ON/OFF 信号”による高電圧運転の許可
 - “PFN VOLTAGE 信号”による充電電圧の設定
 - “RESET 信号”によるインターロックホールド状態のリセット

④ 通信

- ・ 電源から上位制御へは、動作状態・インターロック状態・モニタ値などを送信する。
- ・ 工場試験前までにアドレスマップを作成し、QST 担当者の承諾を得ること。

⑤ 構造

- ・ 19 インチラック(EIA 規格)に設置できる構造とする。
- ・ 前面パネルのみ塗装すること。塗装色は別途指示する。
- ・ 高さは 8U 以内とし、奥行きは 700mm 以内とする。
- ・ 前面パネルには、表 5-4 の表示および入出力を備えること。

表 5-4. 正面パネルの表示、入出力端子

項目	表示方法	備考
充電電圧	メータ表示	尖頭値電圧表示
平均充電電流	メータ表示	平均電流表示
充電電圧波形モニタ出力	同軸コネクタ (QLA タイプ)	正極出力 感度 10 V / 50 kV 出力インピーダンス 1 kΩ
充電電流波形モニタ出力	同軸コネクタ (QLA タイプ)	正極出力 出力インピーダンス 1 kΩ
CHARGE GATE 信号モニタ出力	同軸コネクタ (QLA タイプ)	出力インピーダンス 1 kΩ
状態表示 POWER ON READY CHARGE GATE E.O.C REMOTE LOCAL	緑色 LED 緑色 LED 緑色 LED 緑色 LED 緑色 LED 緑色 LED	電源受電時に点灯 高圧準備完了で点灯 信号に同期して点灯 電圧整定時に点灯 REMOTE 選択時点灯 LOCAL 選択時点灯
インターロック表示	Alarm: 赤色 LED Warning: 橙色 LED	表示項目は表 2 による
Abnormal Interlock 無効回数		別途打ち合わせによる

- ・ 背面パネルには、表 5-5 の入出力端子を備えること。

表 5-5. 背面パネルの入出力端子一覧

項目	端子	備考
充電電圧モニタ	同軸コネクタ	尖頭値出力 感度 10 V/50 kV 出力インピーダンス 1 kΩ
充電電流モニタ	同軸コネクタ	尖頭値出力 感度 1V/1 A 出力インピーダンス 1 kΩ
EtherCAT 通信 ポート		
外部インターロック	端子台	ピン配置などは別途指示する
電源入力 AC100V		
CHARGE GATE 入力	M12 コネクタ	LVDS 信号。 Start, Stop の 2 信号。 コネクタ詳細は別途指示する。
高電圧プローブ入力端子	N 型レセプタクル	

(10) 工場試験

以下の試験・検査を行い、試験結果を試験成績書としてまとめて提出すること。各試験は、必要に応じて QST 職員立会いのもとで行うこと。

① 寸法試験、目視試験及び員数検査

- ・ 各部の寸法を測定し、設計値との差異が許容範囲であることを確認する。
- ・ 使用する部品の突起、バリ等の有無を目視確認する。

② タンクの気密試験

タンク製作後、気密検査を行い漏れの無いことを確認すること。詳細は別途協議にて決定する。

③ 冷却水配管の耐圧試験

配管接続後、0.5 MPa 程度まで加圧し、8 時間経過で、水圧の減少、あるいは水漏れが無いことを確認すること。

④ 制御・通信試験

- ・ タッチパネルからの操作通りに、各機能が正常動作することを確認すること。
- ・ 各モニタ値を較正し、表示値とデータ送信値が一致していること。

⑤ インターロック試験

- ・ インターロック機構を作動させ、正常に停止処置がなされることを確認すること。
- ・ 発報したインターロックが、タッチパネルへの表示に正しく反映されていることを確認すること。

⑥ 高電圧試験

- ・ クライストロン(貸与品)を装着し、ヒーター動作の確認及び高電圧パルス発生を行うこと。
- ・ パルス波形を測定し、仕様を満たしていること及び各モニタ値が正常な値を表示していることを確認すること。

- ・ 8時間以上の定格運転を行い、タンク内の放電や、その他の動作異常が発生しないこと。
- ⑦ 充電器受電測定試験
- ・ 定格出力時に、回路の発熱部品及びおよび主要な部位の温度を測定し、既定値以下に収まることを確認すること。
- ⑧ 充電器内部部品温度測定
- ・ 定格出力時に、回路の発熱部品及びおよび主要な部位の温度を測定し、既定値以下に収まることを確認すること。

工場試験時の貸与品について

本装置の動作試験をするために、表 5-6 の物品を貸与可能なものとする。

表 5-6. 貸与品の物品名、員数

物品名	員数	備考
C バンドクライストロン	1	
C バンド集束コイル	1	
C バンド X 線遮蔽シールド	1	
イオンポンプ電源	1	SHV ケーブルを含む
ヘリウムリークディテクタ	1	
大電力高周波ダミーロード	1	

(要求者)

部課(室)名：NanoTerasu センター

高輝度放射光研究開発部 加速器グループ

氏 名：安積 隆夫

選定理由書

1. 件名	線型加速器クライストロン用絶縁油密閉型モジュレータ電源の製作
2. 選定事業者名	ニチコン株式会社
3. 目的・概要等	NanoTerasu の線型加速器で生成される高品質電子ビームは、安定に 3GeV まで加速されることで蓄積リングへのビーム供給が実現し、高効率の高輝度放射光利用実験を可能としている。線型加速器の 3GeV ビームエネルギーを常時、安定に維持するためには、20 台の C バンドクライストロンの大電力高周波出力を極めて高い水準で安定化することが求められる。これを実現するには、クライストロン動作のためにパルス化された高電圧を高精度に制御可能なことに加えて、長期間の運転においても放電などが生じないモジュレータ電源を調達する必要がある。
4. 希望する適用条項	政府調達に関する協定その他の国際約束に係る物品等又は特定役務の調達手続について 第 25 条第 1 項第 3 号②（その他既調達物品等に接続して使用し又は提供させる物品等又は特定役務）
5. 選定理由	本件で製作するクライストロン用絶縁油密閉型モジュレータ電源では、大電力クライストロンへパルス化された高電圧を高精度で制御・印加する必要がある。本電源の製作において、NanoTerasu に備わる 20 台の C バンドクライストロン用絶縁油密閉型モジュレータの電氣的性能、機械的特性を熟知していることに加えて、接続対象機器との整合性を得ることが求められる。 既設のクライストロン用絶縁油密閉型モジュレータは、ニチコン株式会社によって製作・設置が行われたが、機器の電機的性能ならびに接続先となる対象機器との取り合いの観点から、既存機器との電氣的な互換性、機械的寸法や形状等の構造的な完全互換性が不可欠であり、その設計の詳細は非公開である。 以上のことから、本件調達が可能な専門的技術的能力を有する唯一の者としてニチコン株式会社を選定事業者としたい。