

## 解 説

## 一体型クライストロン・モジュレータ電源

新竹 積\*<sup>1</sup>

## Single Tank Klystron Modulator Development

Tsumoru SHINTAKE\*<sup>1</sup>

## Abstract

XFEL/SPRING-8 employs 72 units of the modulator power supplies for the pulse power klystrons and the electron gun. We took following guide line for our design work: use common component for all klystron power supplies at different frequency ranging from L-band, S-band and C-band, minimize EM radiation from switching thyatron, keep steady operation against environmental temperature and moisture change, compact design, easy handling and suitable for mass-production. To meet all requests, we decided to house all the PFN circuitry and high voltage pulse transformer into a single tank, and filled with insulation oil. Currently, the mass production, and installation are in progress. We expect beam operation before April 2011.

## 1. 概 要

X線自由電子レーザー計画（以下XFEL/SPRING-8）では、72台のクライストロン・パルスモジュレータ電源を使用する。その設計方針は、

- ①出来るだけ共通部品を使用すること。
- ②ノイズシールド性能を極力高めた設計とする。
- ③環境温度や湿度変動に対して動作安定。
- ④小型でクレーン吊り上げ可能。

⑤量産性の高い設計であること。

これらを満足すべくPFN回路とパルストランス昇圧部をひとつの金属製タンクに収めた一体型モジュレータを開発し、現在、量産と設置が進行中である。その技術開発の詳細を解説する。このモジュレータ電源は図1にならんだ研究スタッフと、佐藤和行氏を始めとする日本高周波機の方々、六山弘一氏を始めとする株式会社ニチコンの方々、そして関連メーカーの数多くの方々の努力によって開発されたものである。まず始めに謝辞を申し上げたい。

## 2. 開発の意義

2006年の6月にSCSS試験加速器にて、波長49nmのSASE-FELの増幅に成功した。これは世界で初めての熱電子銃による低エミッタンス電子ビームを用いた短波長SASE-FELの成功として、国内外のFEL関係者から大変に歓迎された。短波長FELに新たな方式を示したためである。すでにその年の1月には、我々が提案していた8GeVのXFEL/SPRING-8が国家基幹技術として予算が認められ、4月からプロジェクトが5年計画で開始されていた。これにはCバンド・クライストロン64本とSバンド・クライストロン4本



図1 一体型モジュレータ試作機と研究スタッフ（後方左から）桜井、白澤、近藤、（前列）中嶋、新竹、印道、稲垣

\*<sup>1</sup> 理化学研究所、放射光科学総合研究センター RIKEN/SPRING-8 Center  
(E-mail: shintake@spring8.or.jp)

を使用する必要があり、全体のシステムを安定に動作させるには、それぞれの機器に高い信頼性が求められる。しかし SCSS 試験加速器の機器はまだ性能不足であると感じていた。

周知の事実であるが電子リニアックの構成要素の中で、パルスクライストロン電源、いわゆるモジュレータ電源がいちばん問題が多く運転の障害となっている事が多い。

2006年6月にFEL運転に成功したのを見届けて、すぐにクライストロン電源の見直しを開始した。その中で行ったのが、一体型化モジュレータとインバータ高電圧電源の高精度化である。本稿では一体型モジュレータの開発について述べ、インバータ高電圧電源については改めて説明する事としたい。

### 3. ロードマップ

図2のロードマップに示すように、1996年にCバンド加速器の開発をKEKにて開始してから今日まで、モジュレータ電源の開発を段階的に進めてきた。まず1997年前後に“Smart Modulator”と銘打って小型モジュレータの開発に取り掛かった。これは、1990年代前半に韓国の浦項加速器研究所（PAL:

Postech Accelerator Laboratory)のProf. M. H. Cho, Dr. J. S. OhそしてKEKのDr. H. Matsumotoが提案したアイデアであり、PFN (Pulse Forming Network) コンデンサに数十kVを充電する高電圧電源として、ソリッドステートスイッチを用いた高速インバータ電源を使用する。これにより装置を従来の方式に比べ大幅に小型にでき、さらに制御性を高くできるというものである。従来は三相400Vまたは600Vの商用交流を大型の昇圧トランスにて15kV~20kVに昇圧整流して大型のコンデンサに充電し、つぎに共振充電のためのインダクタンスを通して負荷であるPFNコンデンサに充電する方式であった。この回路が商用周波数で動作するために、全ての部品が大型であり、モジュレータ電源の半分近いスペースを占めていた。また電圧制御も受電トランスの一部をスライダックとしてモータ駆動により機械的に回転していたため故障が多発していた。また昇圧トランスから下流側がすべて高電圧であり、長年の運転でスス汚れが付き、梅雨時にはリーク電流が発生するなど、とても先端的な研究を目的とする加速器にはそぐわない代物であった。

ここにIGBTなどの大電力高速スイッチを導入して動作周波数を50~60Hzの商用周波数から一気に

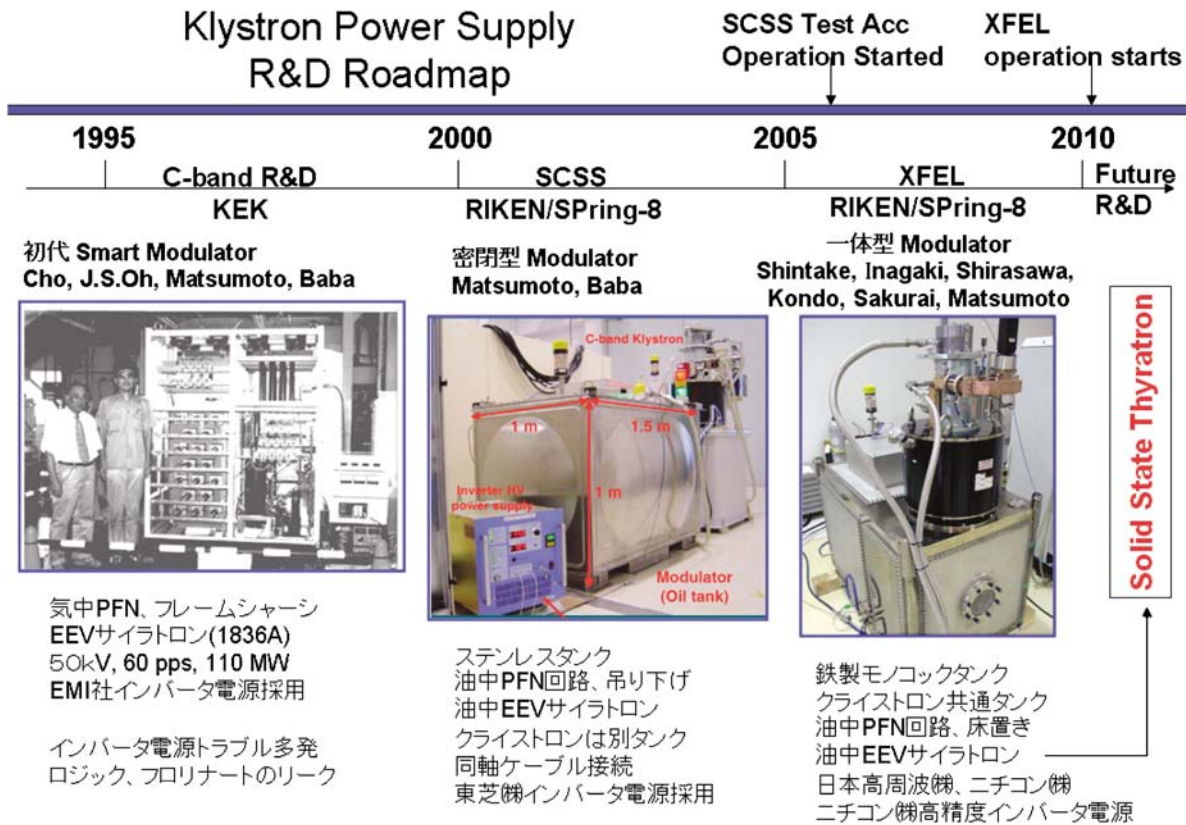


図2 クライストロン電源の開発ロードマップ

20 kHz 以上へと高くすると、トランスの容積が周波数に逆比例して小さくなり小型となる。すなわち、インダクタに関する式

$$\text{Core Volume} \propto V \cdot t \propto f^{-1}$$

に従って、トランスやチョークインダクタの体積が小さくできる。50 Hz を 20 kHz とするとサイズは約 400 分の 1 となり、コストも大幅に削減できる。このことは家庭用電化製品にも現われていて、最近では受電部に変圧トランスを使用しているものはゼロと言ってもよく、全てインバータ方式となっている。

さて図 2 左の初代 Smart Modulator は安定に動作し、種々の開発実験に使用された。しかし当時使用していた米国 EMI 社製のインバータ電源は、制御回路が頻繁に故障したり、高電圧部の冷却媒体（フッリナート）がリークするなど、故障が頻発したため、後に国内メーカーにて開発することとなった。一方モジュレータの方は、図 1 の写真にあるように、鉄フレームにパネルを取り付けた筐体であり、ノイズの放射が大きいこと、空冷ファンの吸気フィルターが目詰まりしやすく定期的なメンテナンスを要すること、梅雨時にインバータ充電器からの 50 kV 給電部にコロナ放電が発生し、これが引き金となって同軸ブッシングが放電、貫通孔が開いてしまうというトラブルなどがあり、何らかの抜本的な改善が必要と感じられた。

2001 年から開始した X 線自由電子レーザーの開発研究プロジェクト SCSS にて、松本浩、馬場斉が中心となって開発したのが密閉型モジュレータである。ステンレス製のタンクに絶縁油を入れ、その蓋から懸垂状態で PFN 回路、サイラトロン、保護回路等をタンク内に納めた設計である。ノイズ放射は以前に比べ格段に小さくなった。

しかしながら、サイラトロンのヒーター線などからピーク電圧 500 V 以上のスパイク電流が逆流。またパルストランスのバイアス供給線からもキロボルトに近いパルス電圧が逆流し直流電源の制御が不安定となるトラブルもあった。またモジュレータから出力されるピーク電流 5000 A、ピーク電圧 25 kV のパルス電流を複数の並列した同軸ケーブルを用いてパルストランスの 1 次側へ伝送する設計となっており、同軸ケーブル、特にコネクタ部の長期信頼性に不安が残った。これは従来の S バンド加速器にて使用されてきた 3 重同軸高電圧ケーブルが、数年間の使用後に放電パンクするトラブルを複数の研究所から聞いていたためである。さすがに XFEL/SPring-8 にてモジュレータ 70 台、高圧ケーブル 700 本を使用するとなる

と、慎重な判断が必要と感じた。

この問題を一掃するのが一体型モジュレータである。つまりクライストロンのパルストランス・タンクとモジュレータ部を一つのタンクに収めればノイズの漏洩はほとんどなく、パルス出力を運ぶ高電圧ケーブル破損の心配もない。もし小型になれば、工場からトラックで容易に運搬でき、設置も楽であろう。

このアイデアは、C バンド R & D の開発当初から馬場、松本、J. S. Oh, Peter Pierce (CERN), そこに著者を交えて議論が繰り返されて来た長年の夢であった。

しかし実際には、その開発に取り組むことはなく、問題を先延ばしにしてきた。机上の空論十有余年。

さらに常に頭を悩ます一つの隠れた問題があった。「導波管のクライストロンへのつなぎ込み」である。導波管のフランジに銅ガasketを入れて、静かにクライストロンを近づけてボルトを締めこむ。重量物の一体型モジュレータをクライストロンと共に、どうやって移動させるか？ さぞ送りねじ機構も大掛かりで複雑なものとなるであろう、そう予想された。

しかし XFEL/SPring-8 ではリニアックの信頼性が最も重要である。リニアックの電子ビームを直接アンジュレータに通すので、僅かの変動も発生する X 線の特性に影響する。従ってリニアックは従来よりもはるかに安定で信頼性が高くなければならない。

思案のあげく一体型モジュレータの開発に取り組む決断をした。2006 年夏のことである。

#### 4. 概念設計と各部の詳細

図 3 に C バンドシステムの 1 ユニットの示す。50 MW クライストロン 1 本で長さ 1.8 m の C バンド加速管 2 本を駆動する。軸上平均加速電界 35~40 MV/m が得られる。従来の S バンドに比べハードウェアの密度が高いので、モジュレータは小型でなくてはならない。

図 4 に一体型モジュレータのスケッチを示す。2006 年秋から 2007 年春に掛けて、数々の項目を検討しながら概念設計を行った。順に解説する。

##### 4.1 重量物の位置決め、フランジ接続の方法

一体型モジュレータの開発に取り組む決断を下したとき、一つの助けとなったのが「重量物の位置決め用エアパッド」の存在だった。SCSS 計画の初期から、電子銃のタンクやモジュレータ電源等の位置を微調整する機構として、空気圧で浮上するエアパッドを開発していた。これは、通常見られるようなゴムスカートを用いたものではなく、図 5 に示すようにステ

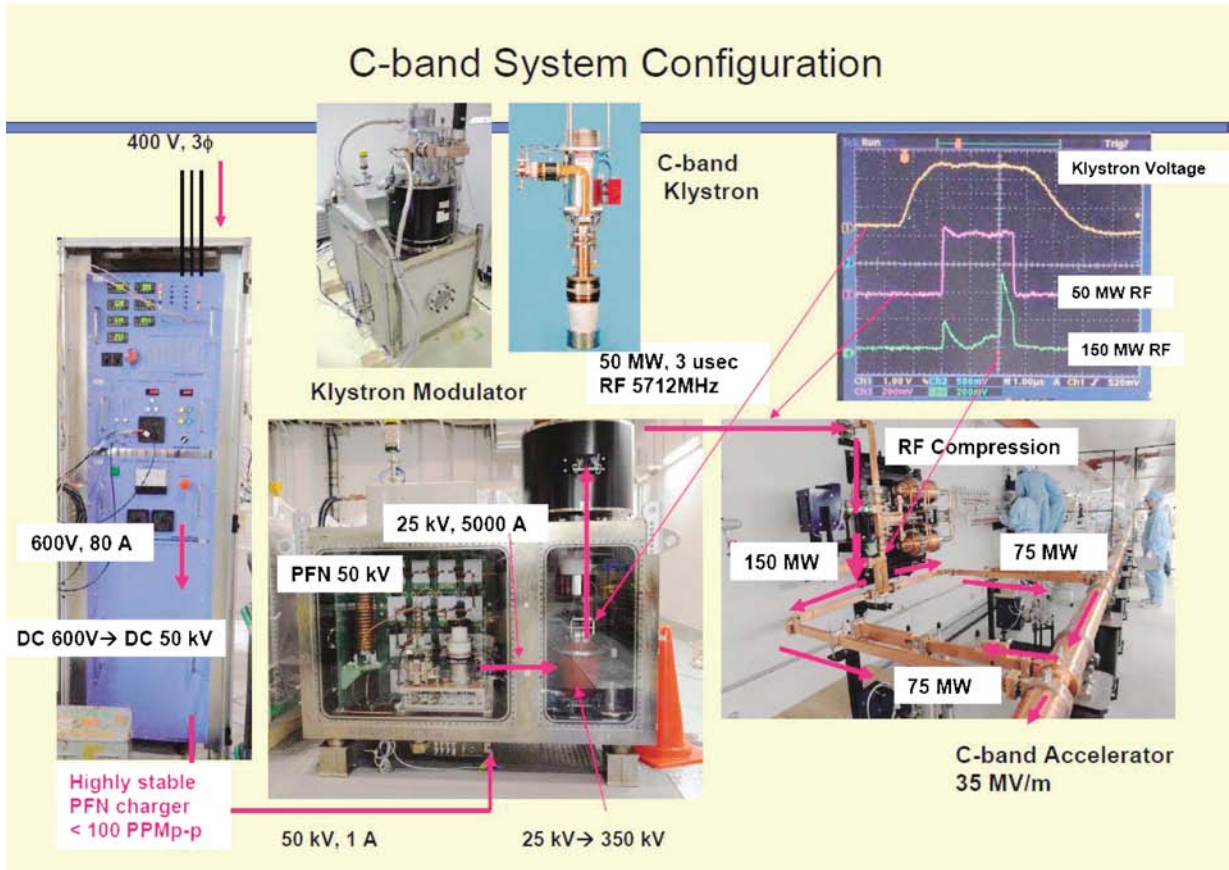


図3 Cバンド高周波加速システムの構成

ンレス製のフランジの下面に空けた孔から空気を噴出して、数十ミクロンだけ浮上させるものである。もちろんコンクリートの床面が平坦でなくては浮上しない。そこで我々は「ゆかとけんさく」と呼んでいる床研削装置を開発していた。これによってコンクリート床面を凹凸<30  $\mu\text{m}$ .rms に研削する。現在、一体型モジュレータでは3個のエアパッドを使って、約5トンの重量を持ち上げ、フランジの接続を行っている。浮上高さは10  $\mu\text{m}$  程度と極めて小さいことが大変に重要で、フランジ接続中にエアを止めても2枚のフランジ間の位置がまったく上下しない。フランジの接続は驚くほどスムーズである。この一連の開発には多くの方々に努力していただいた。「ゆかとけんさく」の開発では榊原マシナリーの原親子、その利用技術は旭工業所の平田氏、エアパッドの開発では、旭工業所の井上氏と当所スタッフの稲垣隆宏、最終的には櫻井辰幸が熱心に改良を積み重ね完成度の高い量産機に到達した。みなさん本当にご苦労さまでした。

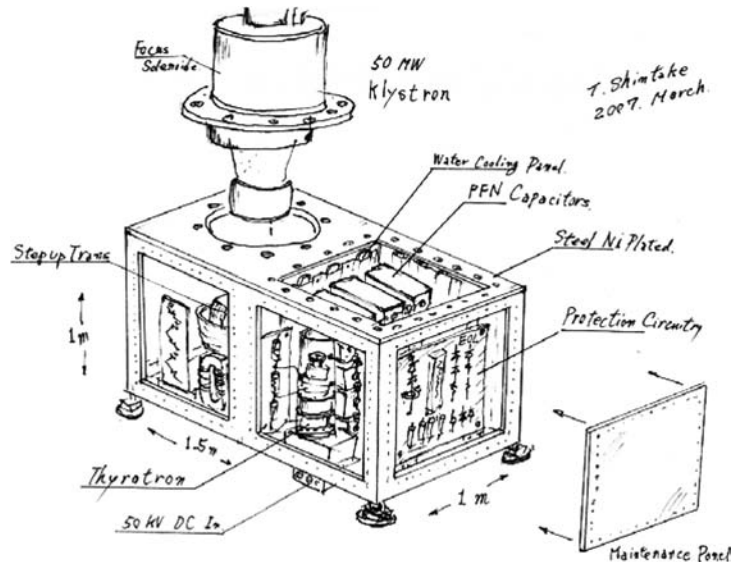


図4 一体型モジュレータを検討したスケッチ

#### 4.2 隔壁のこと

話が前後したが、一体型モジュレータの形状を考えると、昇圧パルストランスの入った部屋と、PFN回路の入ったモジュレータ部を隔壁で分離するかどうか



図5 (左) ゆかとけんさく(床研削装置)と(右) 研削したコンクリート面とエアーパーッド

かを最初に決めなくてはならない. というのは PFN 部の最高電圧は 50 kV, パルストランス部は 350 kV, 圧倒的にパルストランス部の電圧が高いので, 放電の危険性が高く絶縁油の純度に注意しなくてはならない. 分離すればパルストランス部のみを絶縁油充填後に真空脱気すればよい. しかし問題は, PFN からパルス電流を送る伝送ラインに真空脱気時の大気圧に耐えるブッシングが必要となることである. そのようなブッシングをエポキシ含浸の手法で作ることは可能だが, 信頼性の評価をどうするか. XFEL/SPring-8 向けの量産を開始するまでの時間が 1 年半以内と限られていたので, その危険性が残るだろうと判断し, ブッシングなし, すなわちパルストランスタンクとモジュレータ部は共通の部屋とし, 絶縁油が行き来できる構造とした.

#### 4.3 電気絶縁油

最近, 電気絶縁油として難燃性シリコンオイルや環境に優しい植物性オイルが使用可能だが, その特性と価格を見比べると, やはり鉱物油に軍配が上がる. 防火対策を適宜取りながら, 70 台あまりのモジュレータに鉱物油(電気絶縁油 1 種)を使用することとした. 可燃物のため少量危険物取り扱い基準に準拠しなければならない.

当初, 真空脱気は必要かどうかを検討した. もし真空脱気が必要となれば, タンク全体を大気圧に耐える構造にしなくてはならなくなり, コストがさらにかさむ. そこで 2006 年 8 月, 出光製油所(関電エンジニアリング)を訪問し, トランスフォーマーオイルの製造工程を見学させていただいた. トランスフォーマーオイルはエンジンオイルを精製して製造するが, その最終工程にて 80°C 前後にて真空脱気して揮発性のガスや水分を除去しており, そのままでも十分に耐電圧



図6 絶縁油の注入. 200 L ドラム缶 8 本を真空浄油器(後方中央)にて脱気しながら注油する

性能が高い. 我々が受け取った絶縁油を脱気するときに観測する泡は, ドラム缶内に残った空気と水分が, 工場からドラム缶にて輸送するさいの振動で攪拌混入したものだとのこと.

そこで加藤電機株式会社 (<http://www.katofl.com/>) の真空浄油器を購入し, 絶縁油を連続的に真空脱気しながらタンクに注入することとした(図 6 参照). なお電気絶縁油 1 種は引火点 130°C 以上の第 4 類第 3 石油類である.

#### 4.4 オイルの密封方法

図 4 のスケッチを携えてモジュレータ開発に経験のある複数のメーカーに相談に行った. すると皆口々に言った. 「側面にパネルですか. 後で絶対に油が漏れますよ. じわじわ漏れ出してくるのが目に浮かぶようだ. 新竹さん, 悪いことたあ言わないから, 側面パネルはやめなさいよ」聞くと, 以前そのメーカーでも似たようなタンクを作ったそうだが, ネジ止めしたパ

ネルから油がじわじわともれ出て、どうしようもなかったのだそうだ。これは困った。油が漏れると念を押され、失敗を保障された。

ところで昔の車は良く油漏れして、駐車場に油の後が良くあったものだが、最近ほとんど見かけない。自動車のエンジンはモジュレータより遥かに過酷な環境だ。運転時には100°C近くにもなり、そして雨天には容赦なく道路からの水しぶきがかかる。毎日の運転ごとに常温から高温までのヒートサイクルを繰り返す、10年近くたっても最近の車では油が漏れることはほとんどない。あれもアルミダイキャストの部品どうしをガスケットを挟んでボルト締めして組み立てている。また回転シャフトにはゴム製のオイルシールが使われており、回転するシャフトに接触しながらもオイルは漏れない。絶縁油は、エンジンオイルを精製して作っており、組成は基本的に同じである。だからエンジンに絶縁油を入れても油は漏れないはずである。よし、なんとかできると確信した。

油密封シールには、ガスケットとパッキン（Oリング）の2種類がある。

①ガスケットは平板であり、シート材料をパンチングにより任意形状に加工でき量産性が高い、また接続するフランジも平面のため切削加工が容易であり、Oリングのような溝加工を要しない、これがガスケット方式が自動車エンジン等に良く用いられている理由である。

②一方、Oリングはフランジに凹形状の溝加工を要する。旋盤加工にて円形フランジに凹溝を加工するのは比較的容易であるため、Oリングは円形フランジで広く採用される。また開放締め付けを繰り返しても、Oリングが凹溝内部に閉じ込められているため、形状が安定しており信頼性が高い。しかし、これを非円形のフランジに適用する場合には、凹溝加工をフライス盤にて行う必要があり、加工に長時間を要するため製造コストに跳ね返る。モジュレータ電源のパネルは1辺が1m近くにもなり、溝加工はボトルネックとなるだろう。生産性を考えれば、ガスケットを使いたい。

そこで冷却方法の検討の項で述べるように試験タンクを製造して試験した結果、以下の事がわかった。

- (i) 大きなガスケットはコストが高い。
- (ii) ゴムガスケットは、自立性が低く取り回しが難しい。
- (iii) 繰り返し使用では、ゴムガスケットではしわがより、油漏れを引き起こす。
- (iv) Oリングは、繰り返し使用しても油漏れはな

く、安定である。

以上により、図7のようにゴムOリング、フライス凹溝加工と決定した。ボルト締め付けによりパネル面と筐体が密着し、電気接触抵抗が極めて小さくなり、パネル接続部からのパルス動作に伴うノイズリークは完全に遮断されている。

#### 4.5 筐体の構造について

一体型モジュレータに求められる構造上の性能は、

- ①クライストロンと集束ソレノイド磁石を載せるだけの構造強度があること。
- ②クレーン吊り上げ可能。トラック輸送可能。
- ④サイトロンスイッチ時にノイズの放射が小さいよう電磁シールドが完全であること。
- ⑤重量は小さい方が望ましいであろうが、航空機を作るわけではなく、設置してしまえば移動しないので、重量軽減は優先課題ではない。
- ⑥耐震構造であること。クライストロンを乗せても重心が低い方が望ましく、この点からタンクの重量は大きい方が良い。
- ⑦容積の利用率が高いこと。容積の利用率が低いと、余分の絶縁油を必要としコスト高となるばかりでなく、消防安全上も好ましくない。できるだけ容積を小さくする必要がある。
- ⑧しかしモジュレータでは高電圧回路を内臓するので、十分な絶縁距離が必要となる。JIS規格の電気絶縁油（鉱油）を使用すれば絶縁耐力は30 kV/2.5 mm以上が保障されており、50 kVを充電するモジュレータでは安全を見ても2~3 cmの絶縁距離があれば十分であり、あえて大きな絶縁距離を確保する必要はない。もちろん部品の角に鋭利な突起がないよう気をつける必要がある。
- ⑨むしろ部品の出し入れ、組み立てのため外部からのアクセスするスペースが必要であり、おいおいタンクは大型となってしまふ。

以上の考察によって、次の方針を決定した。

- ①PFN回路をユニット化して、タンク内部に少ない工数で設置する。
- ②タンクはモノコック構造として支柱をなくし容積率を改善する。
- ③パネルに絶縁油の冷却パネルを設置し、パネルを取り外すと全面が開放される方式とする。これにより、部品の設置、チェックが容易になる。

#### 4.6 筐体の製造方法

図8にモノコック構造の筐体の製造方法を示す。28 mm厚の鉄板をプラズマ溶断器にてフレーム形状に切り出し、溶接開先をフライス加工し、隅を溶接し

て箱型に組み上げる。床面や隔壁のタップ孔加工を事前にすましておく。溶接後、大型のフライス盤にて、全面を平坦に切削加工し、溶接に伴う歪みを吸収する。Oリング溝を加工し、パネル取り付け用のタップ孔を加工する。実際に製造してみると、やはり凹溝加工が最も時間を要するようである。

その後、全面にニッケルメッキを施す。これほど大型の鉄製タンクのニッケルメッキはコストが高いが、電磁シールドに必要な電気接触性能が良いこと、また長年にわたって錆びが出る心配がない事から投資する価値があると判断した。

担当メーカーの方々には大変に苦勞していただいたが、完成したタンクは美しい仕上がりとなっている(図8)。

なお、すべてをステンレスで作るという方法もあり得るが、ステンレスは溶接やフライス加工時の大きな

熱入力のために変形しやすく、大型のチェンバでは精度を得にくいという問題がある。今回採用したように、鉄をベースにした方が製造が安定すると考えられる。パネルはある程度曲がりやすい方がよく5mm厚のステンレス板を使っている。

#### 4.7 絶縁油の冷却方式

サイクロトロンヒータ、水素リザーバ、クライストロンヒータ、サイクロトロン動作時のアノードロス電力、パルストランスの渦電流損失の合計約2.5kWを絶縁油を介して冷却する必要がある。クライストロン・ギャラリーの空調への負荷をできるだけ小さくするために、最大定格運転時のタンク外面の最高温度を45°C程度に抑えるという目標を設定した。

絶縁油の冷却上の最大の問題はその大きな粘性である。また粘性の温度依存性にある。低温では粘性が大きく温度が上昇すると急速に粘性が低くなる。このために高温の物体の近傍でしか対流ができず、その対流が遠方まで届かない。冷却板の近くは温度が低く粘性が高いため絶縁油が固まって動かないのである。

ひとつの解決策は、モータ駆動によって攪拌、強制対流させることである。しかしモータの寿命管理など長期にメンテナンスの必要な部品を極力減らすために、自然対流による冷却方式とした。

次に冷却水との熱交換の方法として、いくつかの方法が考えられる。そこで、冷却能率を実測するために、図9に示すように試験タンクを製作して熱伝達を実測した。油密封テストも兼ねて行った。近藤力君と稲垣隆宏君の両名が大変に苦心してくれた。ここに感謝したい。試験の結果、Cの内部冷却パネル方式が最も効率が良いことが判明した。熱伝達効率は~40W/

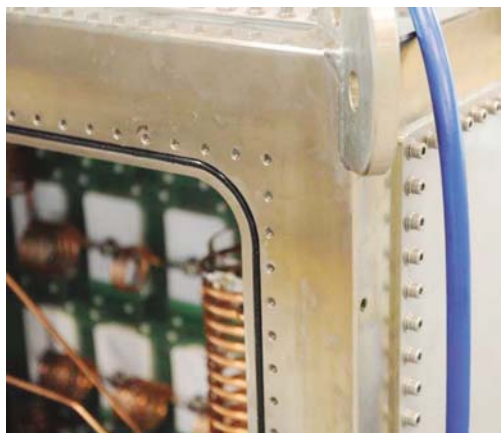


図7 オイル密封にはOリングを採用した

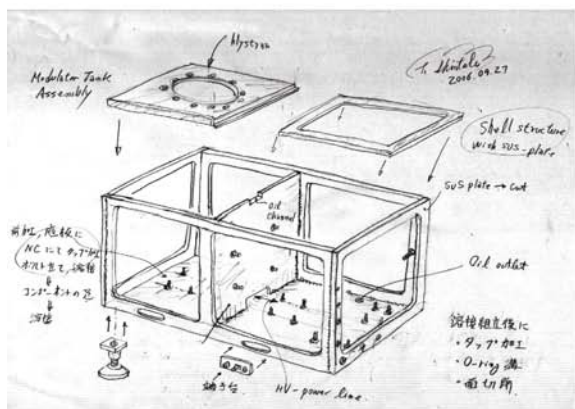


図8 モノコック構造のタンクは、鉄板窓枠フレームを溶接して製造。床面には部品を取り付けるためのタップ孔を加工。右はニッケルメッキ終了後のタンク。写真は城南製作所の松村氏。担当メーカーの方々、大変にご苦勞さまでした

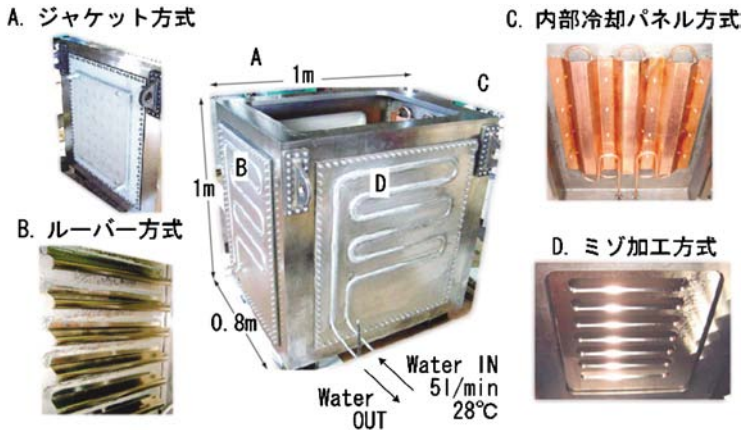


図9 冷却試験タンクと自然対流冷却のための4種類の冷却パネル。Cが最も効率が良い（近藤，2008年加速器学会より）



図10 量産機に実装された冷却パネル

m<sup>2</sup>Kであり，十分に要求性能を満足することがわかった。

#### 4.8 サイラトロン

近年ハイパワー電源のソリッドステート化が進み，医療用加速器の数 MW クライストロン向けのモジュレータは，そのほとんどが IGBT スイッチを使用するまでになっている。しかし 50 MW クライストロンを駆動するには，いまだに IGBT の許容電力が不足であり，多数の IGBT を直並列接続する必要がありサイズが大きくなるばかりでなくコスト高となってしまう。SC 社に問い合わせると，Cバンドモジュレータ相当が1台1億円近くとの回答。コストが全く合わず今回の XFEL/SPring-8 では採用を見送った。今後，SiC や GaN ベースの IGBT が安価に市場に出回るようになれば，加速器のアップグレードに合わせて，ソリッドステート化することが可能であろう。

これまでサイラトロンの寿命がばらつく問題が，国際会議等で議論されてきた。それによると，サイラトロンの信頼性を確保するには，①適切なサイラトロンを選定すること，②適切な使用法（ON 電圧を低く抑えるために，必要十分なプラズマ密度の確保），③サイラトロン製造工場とのスムーズな情報のフィードバック，④必要な投資（含浸型カソードは高価だが信頼性が高い）そして場合によっては 10 年近くも安定に動作しているサイラトロンが存在していることである。

このような事情から XFEL/SPring-8 はすべてサイラトロン管を使用することとした。そのサイラトロンであるが，1996 年に C バンド開発を開始するに当たり，CERN - PS の Dr. Peter Pearce に 50 MW C-band klystron 向けに最適なサイラトロンを推薦していただき，EEV 社（現在 E2V）の CX1836 を選定し

表1 CX1836 の最大定格と動作パラメータ

Parameter	Max Rating	Present Use
Anode Voltage	70 kV	50 kV
Anode Current	10 kA	5 kA
Average Current	10 A	~1 A
Operating Frequency	10 kHz	60 Hz

た。これは，

- ①含浸型カソードを採用しており長寿命であり，かつ輸送に伴う酸化物の落下がない。
- ②リザーバにバレッタを採用し，リザーバ電圧の調整をしなくてもリザーバ温度が一定となり安定に水素ガスが供給される。
- ③プレトリガーとメイントリガーを用いる Twin-trigger 方式を採用することで，放電時のプラズマが安定となりアノードをスパッタすることがなく，自己放電のトラブルが少ない。我々は E2V から供給されているトリガーユニットを採用している。

表1にCX1836の最大定格と動作パラメータを示す。いずれもかなり余裕のある安全な動作条件である事がわかる。ただしサイラトロンは電子管であり，いまだに出来不出来がある。まるで農産物のようなものと覚悟すべきであり，今回のプロジェクトでは70本程度のサイラトロンを同時使用するので，リスク管理が重要である。年間10%程度，時期がくれば20%以上の交換が必要となる可能性があり，予備品的確な確保と寿命判定が重要であろう。これについては加速器制御システムにクライストロン波形の高速AD，





図11 サイラトロン E2V CX1836 の実装. 交換時にはユニットで取り外し可能. トランスはヒータトリザーバ用でありノイズ遮断用の絶縁トランスともなっている. 右は E2V 社カタログより転載

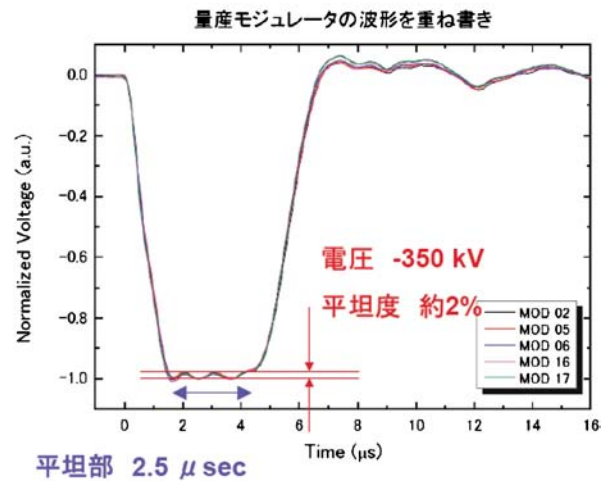
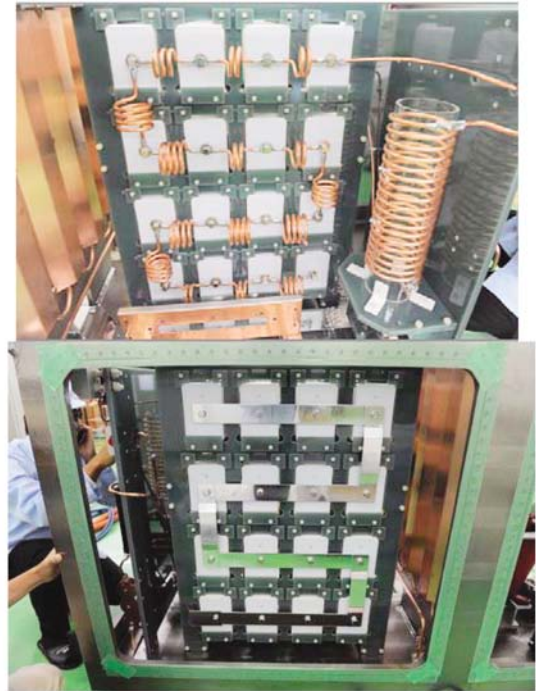


図12 PFN回路は16段, インダクタンスは固定. PFNユニットは天井開口より搬入

異常検出機能ソフトウェアが実装される予定であり, 異常のあるサイラトロンの交換がスムーズに行われるようになることを期待している.

XFEL/SPring-8 向けのサイラトロン 70 本の製造の前に, イギリスはロンドン近郊の E2V 社に出向きセールスエンジニアである Ron Sheldrake に面会し, トラブルの際の保障とトラブルシューティング, 今後の製造見通しにつき議論した. その中でヒータ電圧トリザーバ電圧をメーカー指定の値となるように固定し, サイラトロンの状況により変更しない事が望ましいとの申し出があった. これらの値を変更して運転すると, 故障品を送り返して調査したさいにデータが解析できないこと. また異常があった場合には, ただちに知らせたいとのこと. これによって製造ラインにフィードバックがかかりやすく, 場合によっては製造ラインを停止して対応でき, 不具合品を出荷しないで済むとのことであった. XFEL/SPring-8 では, いっさいリザーバの電圧調整をしないつもりだが, どこまで徹底できるかは, 今後の努力如何による.

図 11 にサイラトロンを実装したユニットを示す. サイラトロン交換時にはユニットを引き出して行うため, 作業性が良い. カソードフランジは厚さ 3 mm の銅板ベースに乗っており, 放熱の役目をしている. アノードのコイルはパルス立ち上がり時のアノード電流制限用.

#### 4.9 PFN 回路

図 12 に示すように, PFN 回路は 16 段, L は固定 (調整インダクタ無し) とした. これは, C バンド加速システムがクライストロンの後にパルスコンプレッ



図13 エポキシ含浸型のパルストランス

サーを持っており、もともと平坦な RF 波形を要求しないためである。ただし、サイラトロン立ち上がり時間ジッタがあると、PFN 波形が前後して、リップルが大きい波形であれば、電圧変動に変換される危険性がある。そこで、PFN 波形の平坦度を $\sim 2\%$  p-p と設定した。

次にパルストランスの特性を入れた PFN 波形のコンピュータシミュレーションを行い、波形の平坦度が条件を満足するインダクタンスを決定した。こうやって決定したインダクタンスをコイル（銅パイプを巻いたもの）につくり込み実装し、高電圧試験により波形を確認した。図 12 下に 5 台の波形を示すが、共通のコイルを使っても再現性は大変によく、個々の調整の必要がないことがわかる。詳細は白澤克年が報告しているのを参考にさせていただきたい（2009 年加速器学会）。

なおコンデンサは、General Atomics 社のパルス動作の高電圧フィルムコンデンサであり、 $>10^9$  ショット以上の寿命を保証している (<http://www.ga-esi.com/EP/catalogs/series-pd-capacitors.pdf>) これは、60 pps 連続動作で 5 年間に相当する。プラスチックケースを採用しており、ショートモードの故障で絶縁油がガス化しても、ケースが膨れ圧力が抜けるため爆発には至らない。

#### 4.10 パルストランス

図 13 にパルストランスを示す。これは今回のプロジェクトを目標に頼利昌と共同で開発したものである。

1 次、2 次コイルの巻き線をエポキシモールドすることにより、

- ①コイルの構造強度が高くなる。
- ②パルス動作時の衝撃力によって巻き線が従来設計でのエポキシ基板から脱落することがない。
- ③通常、固体内部の耐電圧は沿面よりはるかに高いので、コイルをエポキシ内部に納めることにより、耐電圧が向上する。
- ④量産性が高い。

なお、バイアス回路は削除した。つまりコアにバイアス磁場は掛けていない。その代わりに残留磁場が小さくなるために必要なカットコアのギャップを余裕を持って確保した。バイアス回路を削除したため、チョークコア、バイアス電流導入端子、直流電源が不要となり大幅なコストダウンとなったばかりでなく、バイアス回路を逆流してくるノイズを心配する必要がなくなった。

コア材には 100  $\mu\text{m}$  厚の NKK の Super-E Core を使用し、衝撃音と渦電流の低減を図ったが、PFN か

らのパルス音が支配的となって、それほど騒音は減少していない。この PFN の騒音については詳しい解析は出来ていないが、PFN インダクタがパルス電流で圧縮伸張をしてコンデンサを振動させている可能性がある。コンデンサの寿命に悪影響がないことを願っている。若干の不安が残る。

なお Super-E Core の絶縁被覆は耐熱性がなく、巻きコアに成型するさいの焼鈍処理で被覆が燃焼して、渦電流ロスが増えてしまうというトラブルがあった。これは Super-E Core の作り方そのものに関する問題である。もともと金型パンチで打ち抜いて積層する積みコアを対象としていて、この場合、鋼板に曲げストレスが発生しないため焼鈍処理は想定されていない。臨時的対策として巻き込みテンションを弱くして、焼鈍後にエポキシ含浸して層間絶縁を回復させた。将来、Super-E Core を使用する場合、積みコアを検討する方が良いであろう。

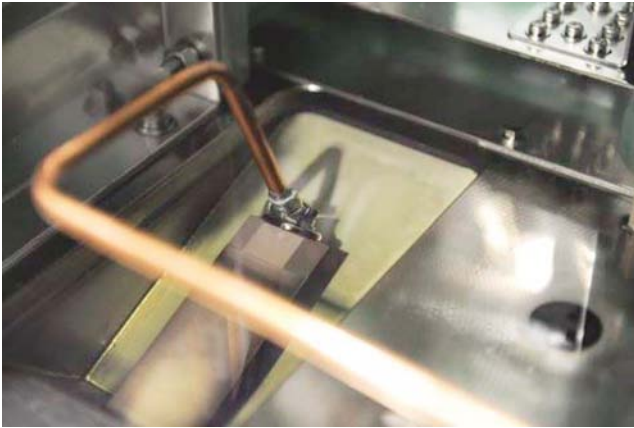
#### 4.11 コネクタボックス

高電圧入力、ヒータ電力、トリガ BNC、モニタ BNC を床下の一箇所に集中させた。これは次の理由による。サイラトロンのアノードは、パルス動作にてケースグラウンドに対して +50 kV から瞬時 ( $\sim 100$  nsec) にしてケースグラウンド電圧に落下する。大変に大きな電圧変化であり周辺にパルス性の誘導電流を発生する。最も強い電流は、サイラトン正面に立っている冷却パネルに流れるので、誘導パルス電流を安全にケースに流すよう、しっかりネジ止めされている（図 9 参照）。筐体内面は常にグラウンド電位を保っており、サイラトロンの頭を中心に大きな電位変動があるため、外部に通じている配線は出来るだけサイラトロンの頭から遠い方がよい。この理由から、コネクタボックスを床下に配置し、タンク内部での配線経路を床面の隅となるよう考慮した。

### 5. ノイズ対策

#### 5.1 ファラデーケージ

ノイズは目に見えない、だから対策が難しい。イメージーションと電磁気的基本的な理解とが大切である。図 15 (左) にノイズ対策の議論でよく引き合いに出されるファラデーケージを示す。理想的な良導体で取り囲まれた閉じた空間の中にある電荷は、そのイメージ電荷を壁の内側に誘起する。外部から見ると、真の電荷をイメージ電荷が電界をキャンセルしあうので、まったく外部に電界が漏れない。このことは、内部の電荷が運動する場合にも成り立って外部から観測できない。すなわち、ノイズが漏れ出る事はない。一



インバータ電源からくる 50 kV 充電のソケット



コネクタをサイラトロンの床下に位置させた



図14 左から冷却水インターロック，ヒータ電力，トリガ，電圧電流の波形モニター，右に 50 kV 充電口

体型モジュレータはこのファラデーケージを目指すものである。

しかし図 15 (右) に示すように、現実のモジュレータには、内部で使用する電力、例えばサイラトロンのヒータ電力を運び込む電力線が必要であるし、何かインターロックの接点があれば、それを運び出す必要もある。これが、ファラデーケージの破れ目となってノイズが外部へ漏れ出す。

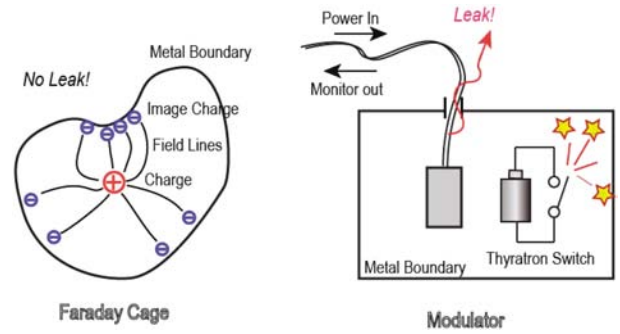


図15 (左) 理想的なファラデーケージ, (右) 現実のモジュレータ電源

## 5.2 ペア線用の同軸ノイズフィルター

そこで、電力線がファラデーケージを通過するところに、何らかのフィルターを設けて、ノイズを内部に反射するか、減衰させればよいわけだ。市販のフィルターとして、例えば TDK から同軸貫通型フィルターが販売されているが、電力を運ぶ線にこれを用いると内部のフェライトコアが飽和して、フィルター機能を失うので注意が必要である。

幸いにも、ヒータ類はバランスしたペア線で給電するので、コモンモードコアを飽和させない。そこで、ペア線専用の同軸フィルターを独自に設計し、利昌工業㈱にてエポキシ充填した製品を開発していただいた。図 16 にその概念図と外観、そして実装の様子を示す。コモンモードに対しては  $\pi$  型フィルターを形成しており、フィルターゲインは、100 kHz にて -40 dB, 1 MHz にては計算上は -60 dB であるが、実際にはコンデンサにインダクタンス成分があり、これ以上の周波数では減衰が小さい。そこで実装時には外部で電波吸収フェライトを通過させて高い周波数の成分を遮断している。

このフィルターによって、サイラトン放電に伴うノイズは、ピーク電圧で数ボルトであり、TDK フィルターの場合の 500 V より格段に小さくなった。

ノーマルモードに対しては、コアのインダクタンスが働かないので、デカップリングコンデンサ 0.47  $\mu\text{F}$  によりショートされるのみであるが、同軸の中に入っているため、有効に機能する。

なお、コモンモード用のコンデンサ 0.1  $\mu\text{F}$  による地絡電流が 100 V にて 1 mA 流れるので商用ラインに直結せず、直前にアイソレーショントランスを用いる事が望ましい。

ヒータ電力等の交流電力は全てこの同軸ペアフィルターを通しており、ノイズはほぼ完全に遮断されている。

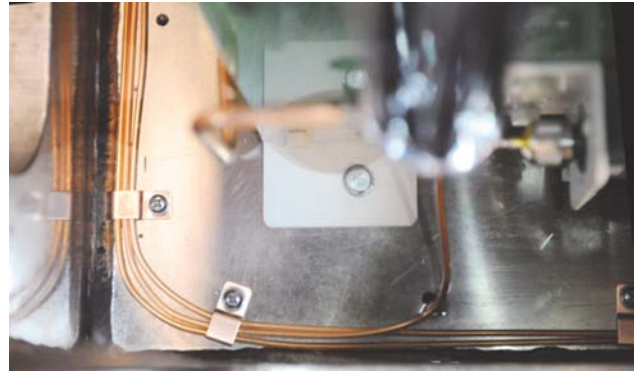
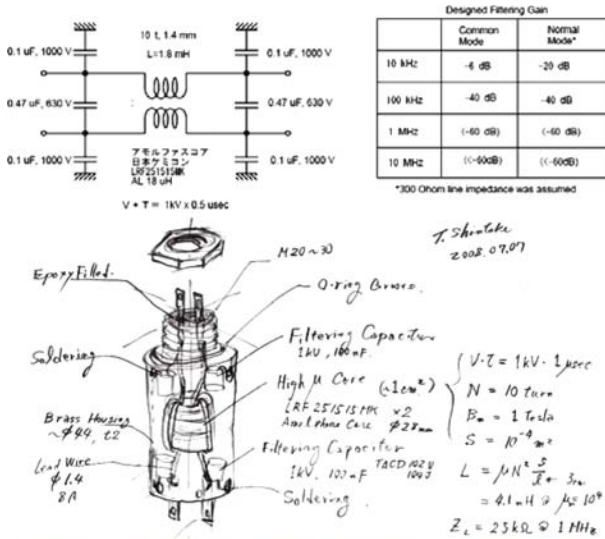
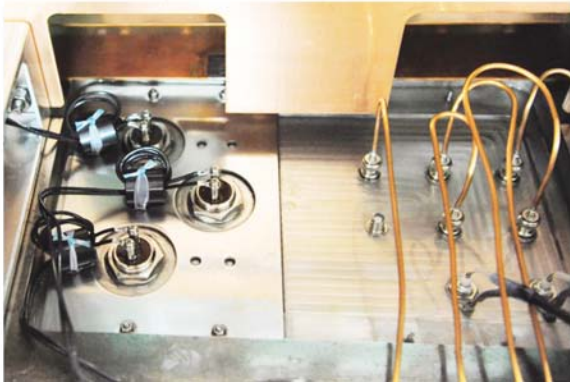


図17 同軸セミリジッドケーブルは、タンク底部の隅を走らせ、ノイズ電圧の誘導を避けている



タンク底板のパネル (内部)



コネクタボックス (モジュレータ底板, 外部)

図16 同軸型ペアフィルターと実装状況

ところでパルストランスのバイアス回路はノイズ対策上大変に都合が悪い。すなわちバイアス電流はアースを通過して帰ってくるので、バイアス線は不平衡線となり、上記の同軸ペアフィルターが使えないのである。かといって、通常同軸フィルターでは直流電流を流し込むとフェライトが飽和し、インダクタが効かない。そこで再度、パルストランスのバイアス電流の必要性を検討しなおして、バイアス回路を削除する決

定を下したわけである。なんら問題なく動作している。既存技術の改良に於いて、何らかの技術を付加してゆくのは容易(安心)だが、削除するには勇気が必要だ。

### 5.3 同軸線の取り扱い

電流モニターや電圧モニターの信号は同軸線で外部へ伝送するが、ノイズの混入を避けるため、図16に示すように、セミリジッドケーブルを使用している。グラウンドが網線のケーブルは、有限の抵抗を持つので、強いノイズ源の近くを通過するとき、ノイズが回り込む危険性がある。

さらに図17に示すように、同軸ケーブルは出来るだけタンク底部の隅を走らせ、また金属性の止め具にてグラウンドに落としており、電圧ノイズが誘導しにくい工夫をしている。

電流モニター、電圧モニターの端末側は、絶縁、非絶縁にかかわらず、ノイズの回り込みは問題になっていない。

## 6. トラブル

量産を開始してから、いくつかのトラブルが発生した。単なるケアレスミスもあったが、大変に勉強になる事例があったので報告しておきたい。

### 6.1 すわー大事。ダイオード発振か？

2009年8月6日、東海にて開催された加速器学会でこのモジュレータの話をしていてその当日、播磨に残っていた稲垣から異常の知らせが届いた。クライストロンの電圧波形に500 MHz ぐらゐの振動波形が乗っているというのである(図18)。

話を聞いて「クライストロンのダイオード発振か？」と疑った。通常ダイオード発振はGHz帯の信号だが、最近のデジタルスコープはサンプリング周波数が高いのでエライアス(alias signal)を見ているのかも

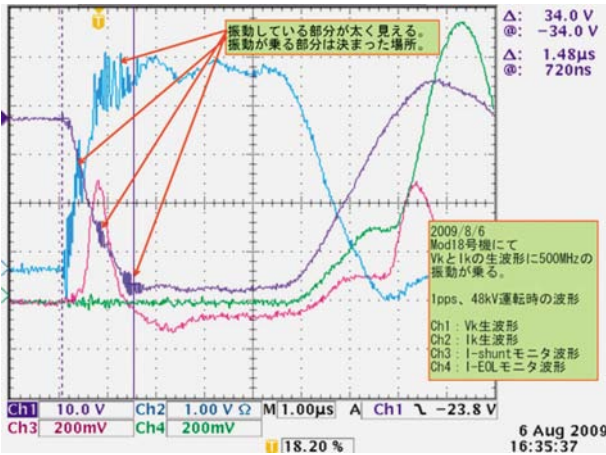


図18

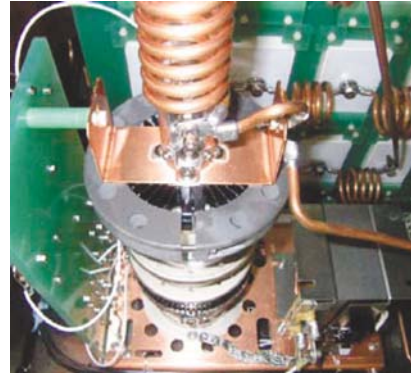


図19

しれない。もし発振なら一大事。プロジェクトは確実に1年以上遅れる。いやな予感がした。

集束ソレノイドの電流を変えてもらったが、変化なしの報告。クライストロン電圧に敏感だと言う。

やはりダイオード発振であろうか？

ほかの号機はどうなっている？

異常波形が少し出るのもあるし、色々ですと言う。

これはカソードのばらつきか？

そもそも静電容量分割方式の電圧モニターが100 MHz以上で動作するはずもないが、気が動転しているので判断が狂う。

稲垣からリザーバ電圧を変えたら振動が消えたと言った報告がはいった。

これはサイラトロンのプラズマ振動だ。

E2Vでは出荷検査で波形を見ているはずじゃないか。

すぐにRon Sheldrakeにメールを打つ。「どうなっているんだ、見落としているんじゃないのか？」

すぐに返事が来た。We are carefully testing all tubes.

そっちのスコープが古いんじゃないのか？

It's 1 GHz scope. Are you happy?

むっ。その後、水素圧力を疑い、双方のヒータ電力をチェックした。よく合っている。とてもいいデータだ。水素圧力の問題ではない。

そうになると、もしや一体型が悪いのか？ スチールで密閉したから電磁ノイズの逃げ場がなくなって、箱のQが高くなって、ついにプラズマ発振！ あーそんな、ばかな…でも可能性は…十分にある。垣根の上の猫が笑うような顔がちらつく。くそっ。

よしプラズマ発振なら俺が止めてやる！ Dampingだ。フェライトアブソーバだ。研究所を探し回るが大きいものがない。そうだ、KEKのCバンド小屋の棚に残っているはずだ。すぐにKEKの吉田光宏君に連

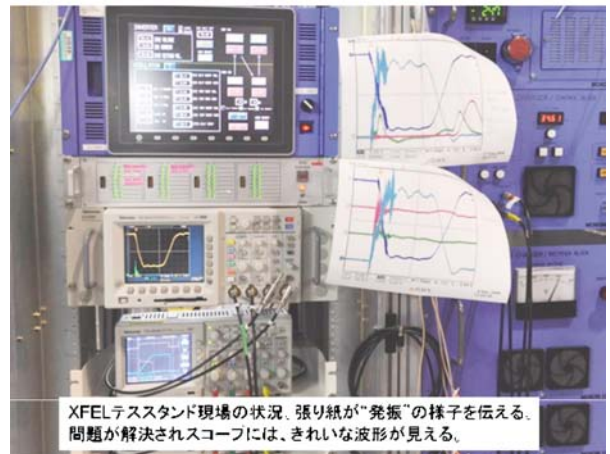


図20

絡すると、「ありましたが小さいですよ」という。それでもいいからと、すぐに送ってもらった。「白澤、すまんがこれでサイラトロンの頭にリングの鉢巻を作ってくれ。振動電流を熱に変えてやる」

数日で鉢巻ができてきた(図19)。すぐにサイラトロンの頭に取り付けて試験。が白澤から低い声で「やはり、だめでした」と連絡があった。そうかプラズマ発振は、そんなに強いのか。困ったことになったな。

そして9月1日、稲垣が意外な事を言ってきた「コネクタボックスの中でトリガの同軸と信号同軸が混信しているかも知れません」

そこで、コネクタボックスを開けてみた (図 20)。「なんだこれは」そこには裸線の G1 トリガー、そしてすぐ近くには、これまた裸線の信号同軸が。ばかな。なるほどと全ての現象が理解できた。G1, G2 トリガー線はサイラトロングリッドに直結している。サイラトロンにトリガーを送ったあと、プラズマが走り始める。このときサイラトロンの中では数 100 MHz のプラズマ振動が発生することが知られている。これは正常な動作である。その誘導電圧がグリッドへ、そして G1, G2 トリガー線へ逆流、コネクタボックスの中で、約 5 cm ほど裸線があるので、ループアンテナとなってコネクタボックス内部へ放射。これが信号同軸の裸線へカップルして、あたかもクライストロン電圧に高周波の振動が乗っているようなシグナルを出したわけだ。

なぜこんな配線になってしまったか。それはひとえにコストダウンをしようとしたためである。J-J パネルコネクタよりは、パネルアダプタに直接半田付けする方法を選んだためである。確か打合せで出た話だったような気がするが、出来てからコネクタボックスの中はチェックし忘れていた。

すぐに、G1, G2 の裸線を改修してコネクタに取替えたところ、正常な波形となった。

## 6.2 EOL ダイオード、連続破損

9月2日、EOL ダイオード破損。前のトラブルが解決したと思ったら、またすぐに次か。組み立て調整棟 (通称：組調棟) の加速管エージングスタンドで、Cバンドクライストロンが放電した直後、EOL ダイオードの何本かが貫通ショートした (図 21)。

この日から、色々な調査が始まった。

①ダイオードの温度上昇か？ ファイバー温度計にて測定するが、周りの絶縁油より若干高い (20°C 以

内) が問題ない温度。

②クライストロンソケットをグラウンドへ強制ショートにして運転してみる。当然、大きな電流 (5 kA) が EOL ダイオードに流れるが、412 回パルス打ってもダイオードを破損させられない。

③ 85HF160 単体の逆耐圧は Vr1700V。EOL では 52 段直列となっており、全体の逆耐圧としては十分であり、充電電圧 50 kV に対して十分な余裕がある。

④ニチコンにてダイオード 2 本直列にてハーフサイン試験をしたところピーク順方向 3200 A、逆電圧 1100 V (ダイオード 1 本あたり 550 Volt) にて破損した。これはキャリア消滅時間以内の逆電圧である。

原因不明のまま 1 週間、2 週間と時間が流れる。その間も EOL ダイオード破損事故が再発していた。9 月中旬のある日。このままでは埒が明かない。「何か原因があるからこそ、ダイオードが破損する。これだけやっても分からないということは、回路図やシミュレーションに現われない何かがあるということだ」そう思って、組み立て現場のモジュレータの前にビニールをひいて座り込み、じっくりと同じところを何度も眺め続けた。以前からこういう時は「座り込み」と決めている。1 時間ぐらいたっただろうか、おや？ この配管銅パイプ、おかしなところへ走ってないか？ EOL ダイオードと直列につながっている 5 オームの抵抗が、PFN の終端ではなく始点につながっているのを発見した。これでも回路図としては間違っていないから通常運転には問題ない。が、しかし、あーこれだ！ コモンモードが、ダイオードを激しくたたきこになってしまう。通常のシミュレーションには出ないモードだ。

ニチコンのスタッフに見てもらい確認したあと配線を修正した (図 22)。おそろおそろ試験運転。定格運

9月2日、EOLダイオード短絡故障が発生。  
現在調査中。

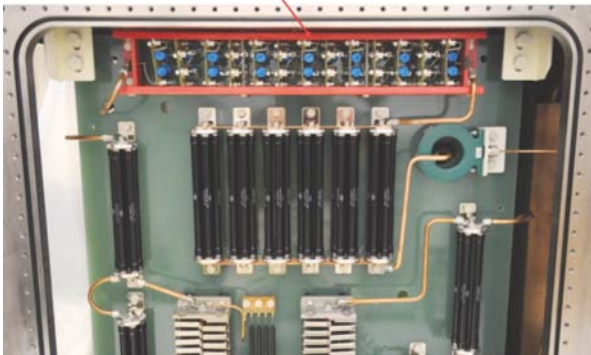


図21



図22

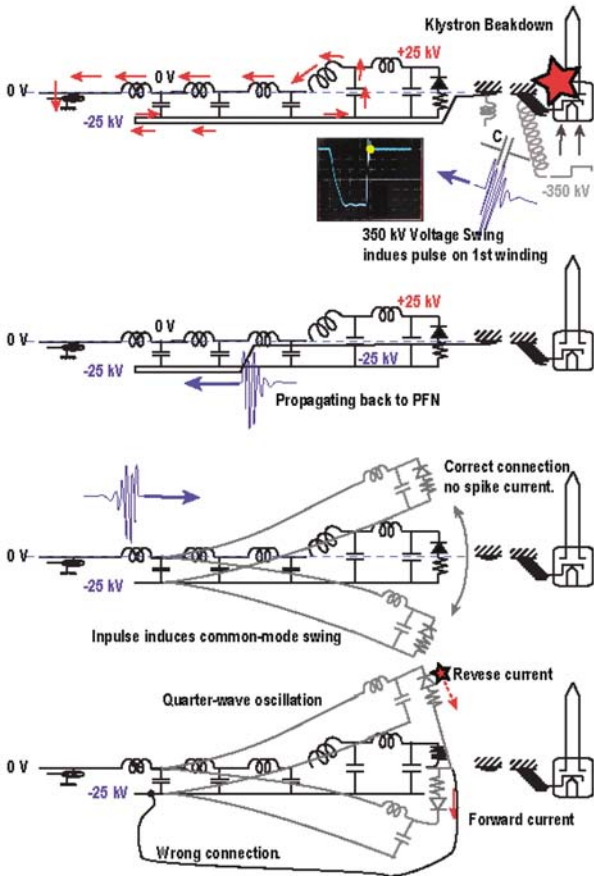


図23

とする。パルストランス2次の出力電圧がいきなりショートされてゼロに引き落とされる。ご存知のように1次巻き線と2次巻き線は向かい合っているため、浮遊容量でカップルして高速のパルスが1次巻き線に誘起される。コアを通して磁気誘導される電圧は遅い。浮遊容量で誘導されたインパルスがPFNの出力端（左端グランド側）に走ってゆく。その周波数があまりに高いので、PFNの通常モード（differential mode）が追いつく事が出来ず、コモンモード（common mode）のみがPFN全体を包むように右へ伝送してゆくと、右端は開放端であり、図23のように $\lambda/4$ の共振振動をする。

EOLダイオードが正しく接続されていれば、右端の両電極は同相で振動するため、EOLダイオードには何も見えない。しかし図23の最下段のようにEOLダイオードのグランド側がPFNの左端につながっていると、EOLに振動が見えることになる。

クライストロン電子銃の放電アークが十分に大きく高速であれば、大きなCommon-mode振動を誘起する。EOLダイオードはPFNコンデンサの50 kVで逆バイアスされているが、振動振幅が50 kVを超えると、一瞬、順方向となり順方向電流が流れる。この振動はPFNのグランドラインの長さから30 MHz以上と考えられるので、振動は15 nsecで電圧符号を反転する。まだキャリアは消滅していないので高い逆バイアスの中、キャリアがダイオードの空乏層の高電界で加速されて、Si格子と衝突し、電子ホールペアを形成、これがさらに加速され、つまりアバランシェを起こしてダイオードが破損したと考えられる。

そこで配線を正しい位置に修正した。現在までに40台近くのモジュレータが定格8時間運転試験を通過し、クライストロンギャラリーに設置された。あれ以来EOLダイオードの破損は全く発生していない。

転でクライストロンが数回放電したがEOLダイオードは故障しない。直ったようだ。

なぜ50 kV充電の回路で、逆耐圧85 kVのEOLダイオードが破損するのか。図23に破損のメカニズムを示す。PFNの電位を縦軸に回路に表現している。パルスの中ほど、PFNを進行する波が右端のオープン端で反射する直前にクライストロンで放電があった

ドキュメンタリー

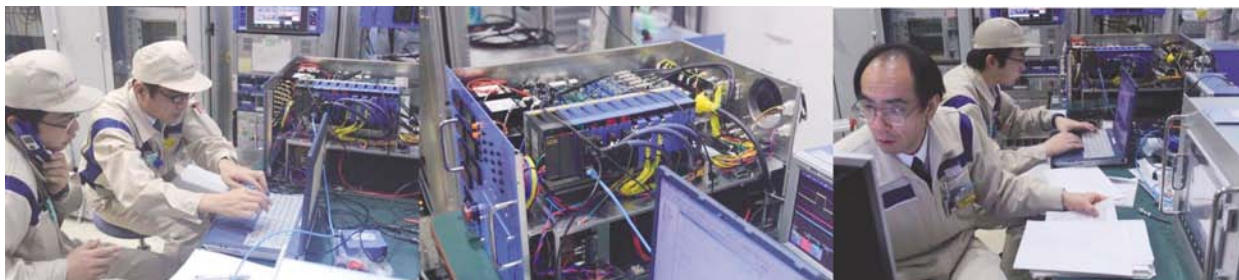
2009年2月、ニチコン草津工場では遅れていた量産1号機の試験準備が整った。



2009年02月16日。組み立てを待つタンクがずらり。1号機の工場立会い試験合格。スタッフ緊張がとけた。そしてSPring-8内、組み立て調整棟。量産1号機の定格運転試験を実施した（2009年2月19日～21日）量産を進めるための重要な最終テスト、R&Dのハイライトでもあった。



2009年2月19日，ニチコンより量産1号機が来た．桜井，エアーパード取り付け，クライストロン接続．



2009年2月20日，制御のPLCが動かない．担当に電話連絡，現場でデバッグ．がんばれ，宮嶋．



2009年2月21日試験開始．勝負の六山，電圧を上げる，データを読む．波形に見入る白澤，松本，近藤，川口．



試験現場はまるで戦場．着実に電圧をあげてゆく．夕刻，定格50kVに達した．量産ラインを再起動指示．



2009年03月25日，トラック初回便到着．5台同時納入．記念撮影．ギャラリーはまだガランとしている．





2009年夏 テストスタンド，ニチコン松本，川口の名コンビ，現場に張り付く。



2009年7月29日，モジュレータ1号機がギャラリーへ。苦心の近藤，思わず笑みがこぼれる。



2009年10月7日，量産が軌道に乗った草津工場。出荷を待つモジュレータ。量産の工夫が美しい。



2009年11月19日，クライストロン1台目，導波管を接続。エアパッドはうまく稼動した。



2010年02月04日，並ぶラックとモジュレータ。CB13の試験。秋には全数を稼動予定。X線FEL運転まであと1年。