

## 北海道大学殿向けライナック制御システムの製作

### MANUFACTURING OF LINAC CONTROL SYSTEM FOR HOKKAIDO UNIVERSITY

重岡伸之<sup>#</sup>

Nobuyuki Shigeoka

Mitsubishi Heavy Industries Mechatronics Systems, Ltd.

#### Abstract

At present Hokkaido University is planning renewal of electron linear accelerator facility after more than 40 years have passed since its establishment. In this renewal plan, we delivered one S-band standing wave accelerating structure with electron gun as an injector in FY2015, and one S-band traveling wave type 3 m length accelerating structure for accelerating section and a PLC-based accelerator control system, which can control and monitor the condition of the accelerator in FY2016. This accelerator control system is based on the application of the accelerator control technology of the sterilization system by electron beam irradiation, which was handled by the Mitsubishi Heavy Industries Group as one of the applications of electron linac to the industrial. We completed delivery of this system in December 2016. In the near future, installation and combined operation test with modulators etc., are planned at the timing of updating the electron linac of Hokkaido University.

#### 1. はじめに

北海道大学工学部では 1973 年度(昭和 48 年度)に導入された最大加速エネルギー45MeV の電子線形加速器が使用されており、電子線を金属ターゲットに入射させることにより発生する中性子を用いた散乱・回折実験や、電子線そのものを用いたパルスラジオリンス法など様々な研究に用いられている。[1]

近年加速器を利用して発生させるパルス中性子を用いた分析手法に注目が集まっているが、特にその利用において重要な役割を果たすモデレーター(ターゲットから発生した中性子を散乱により目的とするエネルギーまで減速するための減速材)の開発において北海道大学はこれまで先導的な役割を果たしてきており、電子線形加速器はその開発に大きく寄与してきた。

この加速器は導入から既に 40 年以上が経過した今も日々様々な実験に用いられている。一方で保守に関しては老朽化した部品を北海道大学殿において都度交換することで行われているものの、使用年数が経過することによりその労力も増大し、年々維持管理が困難になっている状況である。このような背景をふまえ、北海道大学では電子線形加速器の更新計画が進行中である。

本計画において当社は 2015 年度に入射器となる電子銃付きのサイドカップル型の S バンド定在波型加速管 1 台を、また 2016 年度には加速部用の長さ 3m のディスクローデッド型の S バンド進行波型加速管 1 台と、運転制御系および LLRF 系を含む加速器制御システムを納入した。

本発表ではこのうち、2016 年 12 月に北海道大学への納入を完了した加速器制御システムについて述べる。

#### 2. 加速器更新計画の概要

加速器更新計画の概要を Table1 に示す。  
既存のライナックでは加速管として S バンド 2m 管が 3

本用いられ、それぞれ最大出力 5 MW のクライストロンから RF の供給を受けている。今回の更新では加速管構成が変更され、25 kV の電子銃付きサイドカップル管を入射器として使用し、約 3 MeV のエネルギーで出力される電子ビームを後段の 2 本の 3m 加速管で所定のエネルギーまで加速する。最大出力 7.5 MW のクライストロン 2 台で計 3 台の加速管にエネルギーを供給するため、入射器と 1 台目の 3m 管には 1 台のクライストロンの出力を導波管で分岐させて各々に RF を供給し、2 台目の 3m 管にはもう 1 台のクライストロンからの RF を供給する構成となっている。

今回の加速器更新計画が完了した際には、既存設備の能力と比較して中性子発生量が約 2 倍に向上するものと予想され、各種の実験におけるデータ取得速度が向上し、効率的な実験の遂行と研究の進捗に寄与することが期待されている。

尚、今回の計画では電子銃から加速部までが更新の対象であり、偏向磁石による振り分け部以降は既存のシステムをそのまま使用する設計となっている。

Table 1: Outline of the Accelerator Renewal Plan

Beam energy	~ 32 MeV (at 250 mA beam current)
Beam current	250 mA
Beam pulse length	4 $\mu$ sec
Beam output power	3 kW
RF source	Klystron (Toshiba E3772A)
E-gun type	Pulsed DC, 25 kV
Injector	S-band side-coupled structure with built-in e-gun
Accelerating structures	2x S-band traveling wave type 3 m accelerating structure

<sup>#</sup> nobuyuki\_shigeoka@mhims.co.jp

### 3. 加速器制御システム

#### 3.1 加速器制御システムの概要

今回弊社で製作した加速器制御システムは、動作の安定性と機器の保守性を考慮して設計された PLC ベースの制御システムであり、前述した加速器の運転を統括的に行うことができることを目的として設計された。本システムの設計思想は、以前三菱重工にて手がけた実績のある、電子滅菌装置[2]の制御システムの流れを汲むものであり、必ずしも加速器そのものを研究の対象としないユーザーにとっても、直観的な操作で加速器の運転操作や状態の監視が可能である。

#### 3.2 加速器制御システムの制御対象

本システムの制御および監視対象となる主要な機器類は以下の通りである。

- クライストロンモジュレーター
- 電子銃電源
- 電子銃カソード電源(ヒーター、グリッドパルス)
- LLRF (Low Level RF)系
- トリガー系(マスタートリガー、高圧トリガー等)
- クライストロンドライブアンプ
- クライストロンフォーカスコイル電源
- 真空計(コールドカソードゲージ)
- 真空ポンプ(イオンポンプ)
- ビーム電流計 CT (Current Transformer)
- RF モニター(導波管方向性結合器)
- ゲートバルブ
- プロファイルモニタ
- 冷却水流量スイッチ

以下については本システムの製作時点では仕様が未決定であったため、制御システム側では制御的な取り合いおよび操作画面類のみを設けた。今後、仕様が確定した段階でシステム改修を行うことで信号取り合いの追加が可能である。

- 磁石電源(収束磁石、ステアリング磁石、偏向磁石)
- 導波管位相器・減衰器

クライストロンモジュレーターは弊社の製作所掌外であるが、PLC 間通信である FL-net を用いた信号取り合いにより、加速器制御システム側からの統一的な操作と状態の監視を実現している。

#### 3.3 インターロック

加速器運転の安全性確保と機器の保護を目的として Table 2 に示すようなインターロックを設けた。尚、放射線インターロックについては建屋側から供給される接点信号に基づいて動作するものである。またモジュレーターにも独自に建屋側からの放射線インターロック信号を受けて高電圧出力を停止する仕組みが設けられているが、本システムによるインターロック動作はそれを補完し、かつ重複する部分はフェイルセーフとなっている。

Table 2 に示した例は全体の一部であるが、上下流の CT 信号間の偏差を検出し、それが過大である場合にはビーム出力を停止したり、ゲートバルブのリミットスイッチからの開閉状態信号を元にビームの出力許可状態を切り替えたりなど、オペレーションミスで加速器を破損させる可能性を低減するための仕組みが盛り込まれている。

Table 2: An Example of Interlocks

Interlock signal (source)	Operation
Radiation interlock (Building)	HV system off, RF output off
Low water flow (flow sensor)	LV off (focus coil cooling water) HV off (waveguide cooling water etc.)
High vacuum pressure (vacuum gauge)	LV off (SCS vacuum) HV off (3 m accelerator vacuum)
High VSWR (VSWR unit)	HV off
CT current difference (CT monitor unit)	Beam off
Gate valve close (gate valve)	Beam off

#### 3.4 加速器制御システムの機器構成

本制御システムは物理的には以下の 5 つの制御盤から構成される。外観写真を Figure 1 に示す。リストの上からの順番が、写真の左側からの並びに対応している。

- LINAC CONTROL RACK
- LLRF RACK
- KLYSTRON RACK 1
- KLYSTRON RACK 2
- GUN CONTROL RACK



Figure 1: Appearance of the accelerator control system.

Figure 1 に示したものは製作工場からの出荷前の状態であり、実際の使用状態では各制御盤はそれぞれ目的に合わせて異なる場所に設置される計画である。

以下では各制御盤の詳細について述べる。

#### 3.5 LINAC CONTROL RACK

LINAC CONTROL RACK はシステム全体の制御と、タッチパネルを用いた状態監視および運転操作を行う制御盤であり、制御室に設置されて用いられる。制御装置としては三菱電機の MELSEC Q シリーズ PLC を、タッチパネルには同社の GOT シリーズを採用した。タッチパネ

ル画面の例を以下に示す。

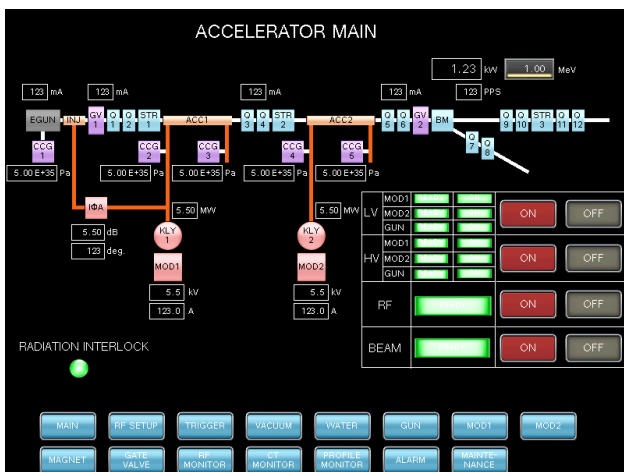


Figure 2: An example of a control screen.

Figure 2は ACCELERATOR MAIN 画面と名付けられた、加速器の全体制御画面である。本画面ではユーザーが以下の基本的な加速器の運転操作を行うことができる。

- LV (クライストロンヒーターなどの低電圧) の ON/OFF
- HV (クライストロンの印可電圧などの高電圧) の ON/OFF
- RF (クライストロンドライブ RF) の ON/OFF
- BEAM (カソードからの電子ビーム出力) の ON/OFF

同時に、加速器のビーム電流や、クライストロンの印可電圧、各真空計によるモニター値などが表示され、加速器の運転状態を一覧することが可能である。さらに、画面下部に表示されたボタンを押すことで、各システムの詳細画面に遷移することができる。

また、本ラックの収納スペースに設置した PC を用いて、Ethernet 経由で PLC のデバイスメモリを読み取って、トレンドデータとして保存したり、グラフとして表示したりすることができる。

### 3.6 LLRF RACK

LLRF RACK は LINAC CONTROL RACK と共に制御室に設置されて使用され、クライストロンのドライブ RF の元となる S バンド 2856MHz の基準発振器や、2 系統のドライブアンプに RF を分配するための方向性結合器、系統間の位相差および振幅のバランスを調整するための位相器および減衰器等が収納されている。

また、ビーム電流計 CT から出力されたパルス信号を入力し、電流値を PLC が読める電圧信号の形で出力する CT モニターユニットなどもこの制御盤に収められている。

ビーム電流やモニターされた RF などの信号波形は上述のようにモニターユニットを用いてその値を制御システムの PLC に取りこみ、画面表示などに用いるほか、本ラックに設置したオシロスコープで波形の形状をモニターすることも可能である。

### 3.7 KLYSTRON RACK 1, 2

KLYSTRON RACK は対応するモジュレータ毎に 1 台ずつ、計 2 台が存在する。本ラックはモジュレータ室でモジュレータの近傍に設置して使用することが想定されており、ラック上にはクライストロンドライブ RF の最終段の増幅を行う 200 W の RF アンプと、クライストロンフォーカスコイル電源 (メインコイル電源、カウンターコイル電源の計 2 台) が設置されている。

また、クライストロンの出力導波管に接続された RF モニタ (方向性結合器) 付き導波管によってピックアップされた進行波、反射波それぞれの信号を入力し、クライストロンから見た VSWR を計算するための VSWR ユニットも本ラック内に設置されている。

### 3.8 GUN CONTROL RACK

GUN CONTROL RACK は KLYSTRON RACK と同様にモジュレータ室に設置されて使用される。本ラックには電子銃のカソードからの電子放出を制御するためのカソードヒーター電源およびグリッドパルス電源の制御部が設置されている。電源の本体は加速器室内の高圧デッキ上に設置され、電気的に浮いた状態であるため、本ラック内に設置された接地電位の制御部との間は光ファイバーにより通信を行っている。

## 4. まとめ

北海道大学のライナック更新計画向けに加速管 3 台およびモジュレータ 2 台から構成される電子線ライナックに対応した制御システムを製作し、2016 年 12 月に納入を完了した。ライナックの更新計画は 2017 年現在進行中であり、導波管系など残りのシステムの調達とライナック全体の設置工事が完了した段階で、本システムとモジュレータ間、および他の制御対象機器との接続動作試験が実施される予定である。

当社では加速管の製作技術に加えて本発表で述べた加速器制御及びシステム化に関する技術を活用し、近年各種分析・イメージング用途で注目されている小型の加速器駆動中性子源など、加速器の産業応用を推進していく所存である。

## 参考文献

- [1] 北海道大学電子線形加速器施設;  
<http://www.eng.hokudai.ac.jp/labo/hulinac/LINAC/>
- [2] N. Hisanaga *et al.*, “大出力電子滅菌装置 (10 MeV 25 kW) の開発”, 三菱重工技報, 第 33 巻, 第 6 号, 1998, pp. 388-391.