

北海道大学向け電子線形加速器システムの製作

PRODUCTION OF THE ELECTRON LINEAR ACCELERATOR SYSTEM FOR HOKKAIDO UNIVERSITY

重岡伸之[#]

Nobuyuki Shigeoka

Mitsubishi Heavy Industries Machinery Systems, Ltd.

Abstract

At Hokkaido University, a renewal plan for electron LINAC for neutron generation as known as HUNS (Hokkaido University Neutron Source,) is being gradually implemented from FY2015. In the first year, we (MHI-MS) have delivered one S-band side-coupled accelerating structure with electron gun as an injector. In the second year, we also have delivered an accelerator control system and a 3-meter long S-band disk-loaded type accelerating structure which is used for the first stage acceleration. In FY2017, replacement work started. We manufactured waveguide network and beamline equipment such as beam ducts and profile monitors, and then we installed them on site in December. We also completed electric wiring work in April 2018 and adjustment operation in May 2018. At end of May, we have confirmed arrival of electron beam at neutron target with Hokkaido University.

1. 概要

1.1 経緯

北海道大学 大学院工学研究院 瞬間強力パルス状放射線発生装置研究室[1]では、中性子発生とその利用を主な目的として、1973年度に設置された最大電子ビームエネルギー45MeVの電子線形加速器が長年に渡り運用されてきた。この電子線形加速器(旧ライナック)の老朽化に伴い、北海道大学では電子加速器の更新が計画され、2015年度より順次機器の調達が行われ、2017年度には旧ライナックの一部撤去と新規製作品への置き換えが行われ、2018年5月に新ライナックのビーム出力に至った。

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台を納入し、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[2]を納入した。さらに2017年度には導波管と、ビームダクトやプロファイルモニター等のビームライン機器類を製作し、前年度までに納入してきた機器類と、モジュレーターなど北海道大学からの支給品も含めて据付工事を行った。2018年4月からは配線・配管工事および、ビーム出力を確認するまでの調整運転を行うなど、物品製作から据付・運転調整までの一貫した対応を行った。

1.2 加速器更新の概要

新ライナックの概要をTable 1に示す。

2018年7月現在、加速器は北海道大学において最大RF出力到達を目指したユージングを実施中の状況であるが、最大出力でのビーム出力時には、更新前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。

[#]nobuyuki_shigeoka@mhims.co.jp

Table 1: Outline of the Accelerator after the Renewal

Beam energy	~ 32 MeV (at 250 mA beam current)
Beam current	250 mA
Beam pulse length	4 μsec
Beam output power	3.2 kW
RF source	Klystron (Toshiba E3772A)
E-gun type	Pulse DC, 25 kV
Injector	S-band Side-Coupled Structure with E-gun
Accelerating Structures	2x S-band traveling wave type 3 m accelerating structure

2. 加速器構成

2.1 システム構成

新ライナックの全体構成ブロック図をFig. 1に示す。

旧ライナックの加速部は電子銃と2m加速管3本、モジュレーター3台で構成されていたのに対し、新ライナックは入射器と3m加速管2本、モジュレーター2台で構成されている。

入射器としては電子銃付きのサイドカップル型定在波加速管を使用し、小型化と低速部の電子ビーム集束に使用されるソレノイドコイルの省略を可能にしている。

主加速部には3mの進行波管2台を使用している。上流側の加速管(加速管1)は2016年度に納入した当社製の加速管で、PAL-XFEL向けに納入したものと同一仕様である。下流側の加速管(加速管2)は北海道大学からの支給品であり、産総研で使用されていた三菱電機製の加速管である。

導波管系の大部分はSF₆加圧型を採用しており、加速管との間はRF窓で仕切られている。2台のクライストロンのうち、上流側にRF電力を供給する#1クライストロン

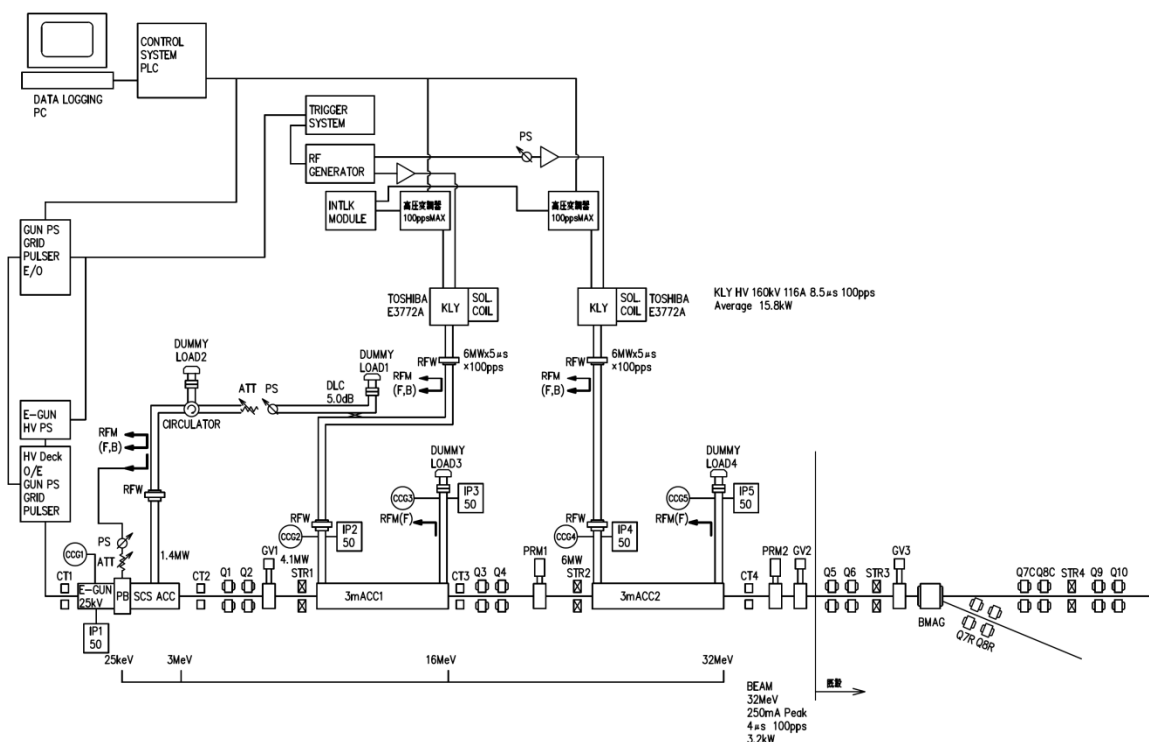


Figure 1: System block diagram of the accelerator.

の出力は 5dB のハイブリッドで分割されて入射器と加速管 1 のそれぞれに入力される。#2 クライストロンの出力は全てが加速管 2 に入力される。

クライストロンは東芝電子管製 E3772A が使用されている。定格ピーク出力は 7.5MW であるが、エネルギー計算上は余裕を見て 6MW での計画としている。

モジュレーターはニチコン製であり、北大から直接ニチコンに発注された。パルス成形は一般的な PFN 方式であるが、スイッチング素子に IGBT が採用されている。加速管の真空排気は入力および出力の導波管フランジに接続された真空引口付きの導波管にイオンポンプを接続することで実施している。入射器では電子銃直結の排気ヘッダーにイオンポンプを取り付けている。

新設部分には 2 箇所ゲートバルブ (GV) を設置している。上流側の GV1 は電子銃の真空保護と電子銃交換時の下流側の真空保護の目的で境界を設けるためのものであり、下流側の GV2 は既設部分をそのまま使用する旧ライナックのビーム輸送部との取合い点として設置した。

集束磁石 (Q) については旧ライナックで使用していたものを使用している。ステアリングコイル (STR) については新設部分の 1, 2 のみ新規製作品と置き換えた。

旧ライナックにはターゲット電流計以外の常設のビームモニター機器は設置されていなかったが、新ライナックでは 4 箇所の電流計 (CT) と 2 箇所のプロファイルモニター (PRM) によりビーム電流およびビームプロファイルを計測可能である。

図中の GV2 より下流側は旧ライナックのビーム輸送部をそのまま使用しており、ビームダクトや真空ポンプを含め機器の交換等も実施していない。

2.2 設置状況

機器据付工事完了時の加速器室の状況を Fig. 2 に示す。手前側が上流 (入射器) 側、奥が下流側である。

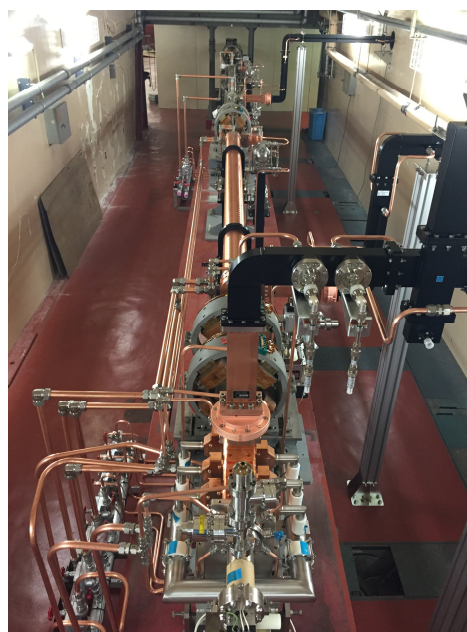


Figure 2: A plane view of the accelerator room.

加速管は高さ 400 mm のコンクリート製の台の上にレイアウトされており、ビームライン高さは 1500 mm である。

手前に見える導波管は入射器への系統である。そのすぐ後ろには加速管 1 への系統が、奥には加速管 2 への系統が見える。写真撮影時は電気配線工事前であり、

方向性結合器や電磁石等にはまだ配線が接続されていない。

入射器とその周辺の状況を Fig. 3 に示す。

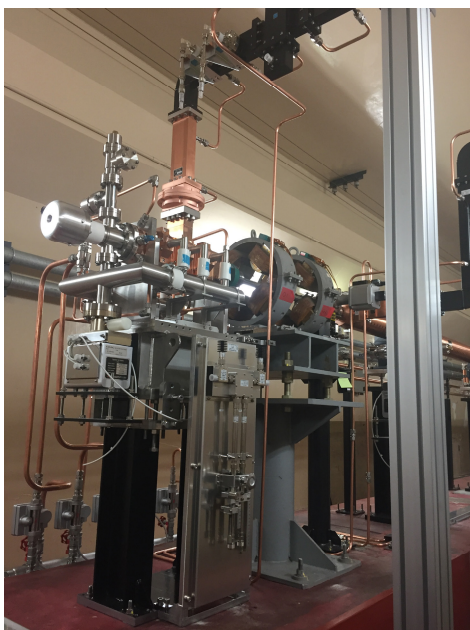


Figure 3: Injector and its surroundings.

手前下側に見えるのは同軸の位相器・減衰器で、入射器への系統の導波管から方向性結合器を用いて取り出した高周波電力を入射器のプリバンチャーに入力する前に、位相と振幅を調整する役目を担っている。

写真の入射器の下流側に見えるものも含め、全ての集束磁石は旧ライナックからの流用品である。

3. 調整運転

3.1 工程

電気配線完了後の調整運転は約 3 週間の工程で実施した。作業内容としては概略以下の通りと多岐に渡り、相当にタイトな工程が想定された。

- モジュール単体動作確認(ダイオード運転)
- 制御システムとモジュールとの制御取合確認・調整
- 制御システムへのモニター機器類(ビーム電流計、RF モニター、真空計等)の信号取り込み確認・調整
- 建屋側とのインターロック信号取合確認
- 運転動作確認
- 加速管 RF エージング
- 電子銃カソードアクティベーション
- LLRF パラメーター調整(入射器プリバンチャー、3m 加速管)
- ビームパラメーター調整(Q, STR)

特にエージングに関してはその素性が弊社にとって未知の産総研から移設された加速管も対象として含まれていることもあり、当初から上記期間内で最大出力まで到達させるのは困難と想定されたため、調整期間中のエージングは加速管 2 を透過させるまでの最低限の範囲に絞って行った。

調整の途中では#1 クライストロンのエージング不足による不調(内部放電)や#2 加速管内部の放電、高圧スイッチングノイズによるリモート機器制御への影響などのトラブルも発生したが、結果として当初の計画通り 3 週間の間に低いデューティでのビーム出力確認までこぎつけ、調整の最終段階では既設のビーム輸送部最下流に設置された中性子ターゲットにビームを入射し、レムカウンタを用いて中性子の発生を確認することができた。

3.2 RF 波形

エージング途中の RF 波形を Fig. 4 に示す。クライストロン出力(ピーク)は約 5 MW、パルス幅は 2.5 μ s の状態である。#2 の反射波形には不規則な凹凸が見られる。それに対して加速管 1 の反射波形はほぼフラットである。#1 系統に比べ#2 系統の反射電力は大きい、加速管からの反射が大きいことに加え、#1 系統ではクライストロンと加速管との間に 5dB のハイブリッドが挿入されており、反射の一部がダミーロードで吸収されていることも要因の一つと考える。

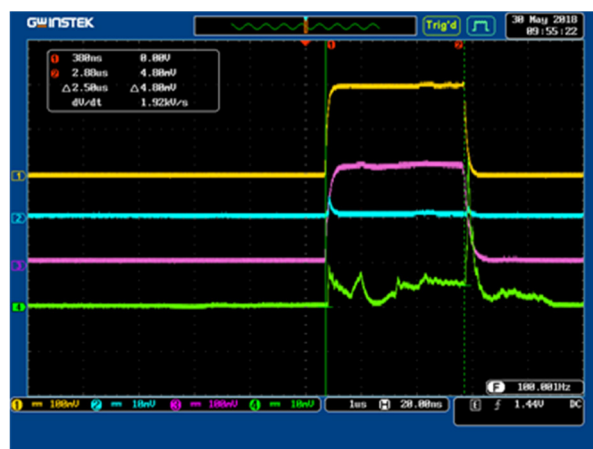


Figure 4: RF waveform during aging operation.

3.3 ビーム波形

同じくエージング途中に CT (Current Transformer) を用いて測定したビーム電流波形を Fig. 5 に示す。

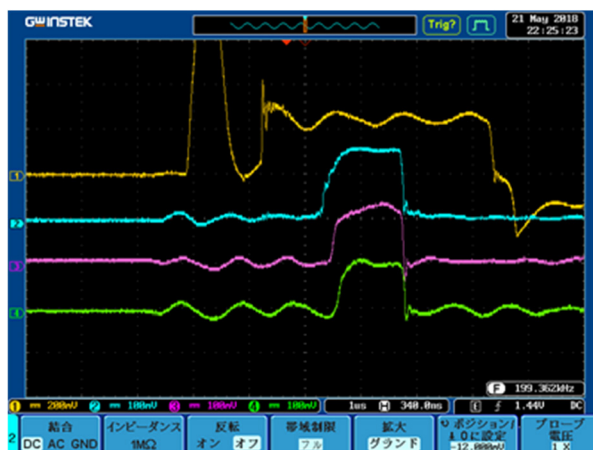


Figure 5: CT waveform during aging operation.

波形取得時点での RF パルス幅は $2.5 \mu\text{s}$ であるため、ビームパルス幅は $1 \mu\text{s}$ 強である。

CT1 は厳密にはビーム電流ではなく、電子銃電源から電子銃へ流れ込む電流を測定している。方形部分の立ち上がり以前に山なりの波形が見えるのは、電子銃電源の高圧が立ち上がる際にケーブルの静電容量に流れ込む電流が検知されているものである。方形部分はカソードのグリッドにより制御された出力波形となっている。

全体的に波形には周期 $1 \mu\text{s}$ 程度の大きなうねりが乗っているが、これはカソードからのビーム電流とは関係なく計測される波形で、モジュレーターの高圧スイッチにより発生するノイズを拾っているものである。

カソードからの電流出力 500 mA に対し CT4 では 230 mA 以上の透過電流が計測されており、シミュレーションで予想した 45.5% と同等もしくは若干良い透過率が得られている。カソードには CPI EIMAC 製 Y646B を使用しており、定格電流出力の 750 mA に対し、十分に余裕のある運転条件である。

ビームロス は CT1 (カソード出力)/CT2 (入射器出口) 間および CT2/CT3 (加速管 1 出口) 間で大きく、前者はほぼ過去の同タイプの加速管の運転実績値通りであるが、後者は入射器出口の 2 台の集束磁石間のピッチが 300 mA と大きく離れていることも要因の一つと考える。これは既設の磁石を再利用したための制限であるが、今回のダクトサイズに合わせたコンパクトな集束磁石に交換することで、改善できる可能性がある。

4. まとめ

北海道大学の電子線形加速器の更新プロジェクトにおいて、当社は加速管などのコンポーネントの製作に加えて現地据付工事および調整運転を含めた対応を行い、計画通りビーム出力を実現することができた。

今後も当社が得意とする加速管を中心とした加速器コンポーネントの製作技術に加え、加速器のシステム化対応技術にも磨きを掛け、加速器業界の発展に貢献していく所存である。

謝辞

本プロジェクトの現地工事遂行にあたっては長年旧ライナックの保守に携わってこられた佐藤様をはじめ、大沼先生、古坂先生、加美山先生など、北海道大学工学部の皆様に大変お世話になりました。また様々な協力会社の方々、特に工事全般において現場で献身的にサポートして頂いた(株)ハイブリッジの和島様にはこの場で深く感謝申し上げます。

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. Shigeoka *et al.*, “北海道大学殿向けライナック制御システムの製作”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 1-3, 2017, pp. 1126-1128.