

## スキャンジノバのクライストロンモジュレータ MAX IV 運転状況

### THE UPDATED STATUD OF MAX IV KLYSTRON MODULATORS OF SCANDINOVA

湯城磨<sup>#, A)</sup>, Lindholm Mikael<sup>A)B)</sup>, Kumbaro Dionis<sup>C)</sup>  
Osamu Yushiro<sup>#, A)</sup>, Mikael Lindholm<sup>A)B)</sup>, Dionis Kumbaro<sup>C)</sup>  
A) ScandiNova Systems KK  
B) ScandiNova Systems AB  
C) MAX IV Laboratory

#### Abstract

MAX IV consists of a 3 GeV storage ring, a 1.5 GeV storage ring and a linear accelerator (Linac). A Linac is activated as a full-energy injector to the both storage rings, and also provide the energy to the Short Pulse Facility (SPF). The construction of MAX IV has completed in 2016 and started the user operation in 2017. 3 GeV storage ring is mainly for the hard x-ray users, on the other hand, 1.5 GeV storage ring is for soft x-ray and UV users. The linac consists of three main hardware parts which are RF power, wave guide and accelerator systems. ScandiNova has agreed on a contract that guarantees and responsible for the RF specifications including modulator and klystron. This paper, we report the updated operation status of the linac and some accelerator information.

#### 1. はじめに

スウェーデンで 2009 年に計画が承認された MAX IV 加速器は、既存の MAX II(1.5GeV)そして MAX III (0.7GeV)の幅広い見地と経験を受け継ぎ、更に NEG コーティング真空チャンバ[1]の実現や電磁石ブロック[2]等の革新的な技術が投入され、数年の検証 R&D を経て 2016 年に完成、2017 年よりユーザ運転が開始された。本稿では、MAX IV 加速器のアウトラインを紹介するとともに、スキャンジノバ・システムズが責任機関としてまとめた、ライナックのモジュレータとクライストロンを中心とする、これまでの改良内容及び最新の稼働状況等について報告する。

#### 2. MAX IV 加速器

##### 2.1 加速器の概要

MAX IV 加速器は、3 GeV のライナック、1.5 GeV と 3.0 GeV の蓄積リングから成り(Fig. 1)、その概略パラメータは Table 1 の通りである[3]。ライナックの最下流の先端には SPF(Short Pulsed Facility)にビームが供与されている。

また、現在 Soft-XFEL の検討が並行して進められているが、ライナックは 100Hz 運転が可能で整備が完

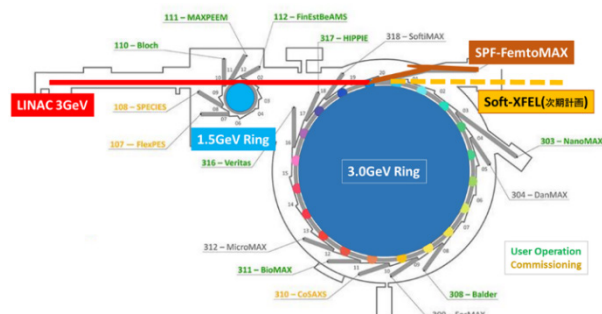


Figure 1: MAX IV accelerator outline.

了しているため、いつでもビーム供与ができる状態にある。そのパラメータは Table 2、概略図は Fig. 2 の通りである[4]。

Table 1: Main Parameters of MAX IV Accelerator

Parameter	Specification
[Linac]	
Length	300 m
Energy Spread	<0.05 % + Chip
RF Frequency	3 GHz
Rep. rate	1-100 Hz
Bunch Length	10-500 fs
Charge per bunch	20-200 p C
Normalized emittance	< 1 um
[1.5 GeV Storage Ring]	
Circumference	96 m
Beam current	300mA (500 mA max)
Emittance H/V	6 nm rad / 60 pm rad
Lifetime	10 hours
Orbit stability	10% of beam size
RF frequency	100 MHz
[3.0 GeV Storage Ring]	
Circumference	528 m
Beam current	300 mA (500 mA max)
Emittance H/V	-330 pm rad / -8 pm rad
Lifetime	10 hours
Orbit stability	10% of beam size
RF frequency	100 MHz

Table 2: Soft XFEL Parameters Outline (Planning)

Parameter	Specification
Energy	5 (-6) GeV
Wavelength	2 - 10Å
Flux	10 <sup>12</sup> photons/pulse
Undulator period/K-value	18 mm / 1.8 - 2.1

# osamu.yushiro@scandinovasystems.com

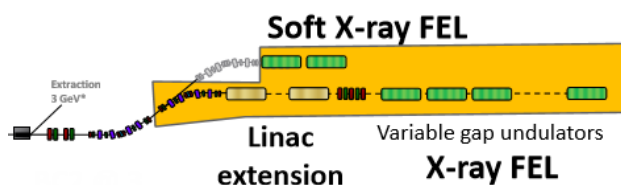


Figure 2: MAX IV soft XFEL outline.

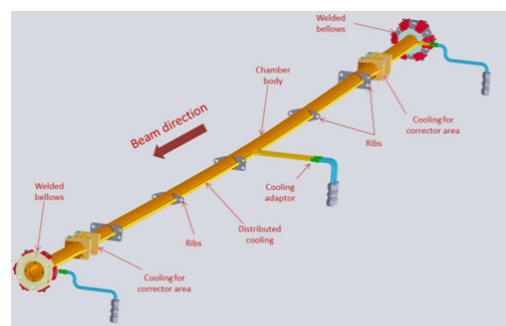


Figure 5: Vacuum chamber outline.

## 2.2 加速器の特徴とテクノロジー

1) 1.5 GeV/3.0 GeV の蓄積リングは共に、電磁石を半割で一体構造化している。従来のように幾つもの電磁石を現地でインストールをし、個別の動作確認する手間を省き、メーカーの工場ブロック毎事前アライメントができる。その仕様は 20  $\mu\text{m}$  である。マグネットが小型化され、一体構造とすることで作業を大幅に軽減した。また、ビームチャンバの外径を細くすることができ、これが真空チャンパの NEG コーティング化を実現した。Figure 3 は、3 GeV 蓄積リングの lattice の一例、Fig. 4 は、M1タイプ(構成:8 極/4 極/8 極/4 極/2 極/8 極)とU1(構成:4 極/6 極/4 極/偏向)タイプの電磁石ブロックの構成である[2]。(電磁石の寸法は、2.3-3.4 m)

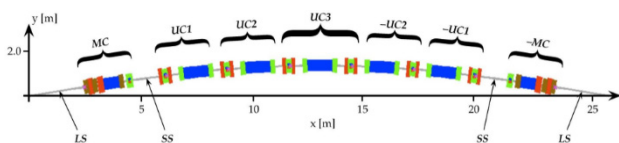


Figure 3: 3 GeV ring lattice.

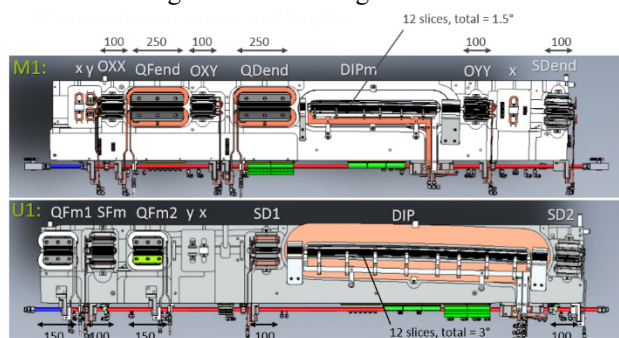


Figure 4: The layout of M1 and U1 magnet blocks.

2) 3 GeV の真空チャンバは(Fig. 5)、CERN と共同研究の上、NEG コーティング方式が採用された。電磁石ブロックを所定位置に設置後、チャンバを排気し下部ブロック全体(23m/7 式)を約 200°C に加熱しながら管内に NEG コーティングを施す[5]。これら一連の作業は、事前 R&D(Fig. 6)のプロトコルに従い実施された[6]。

3 GeV 蓄積リングのコミッションは、2015 年夏に始まり、1 年後全ての真空チャンバの動作確認が完了した。放射光施設において、真空チャンバを NEG コーティングする試みは世界初であり、MAX IV の今後の運転動向が注目される。

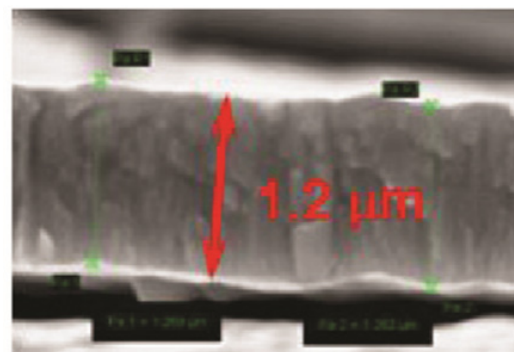


Figure 6: NEG coating R&D result [6].

## 3. MAX IV 加速器運転状況

2017 年にユーザ運転が開始された後、3 GeV 蓄積リングは 200 pmrad に向けたチューニングを 2020 年初頭にかけて、そして 150 pmrad への調整は 2023 年に達成させる予定としている。Linac は、既に 100Hz のフルパワー運転が可能になっており、Soft XFEL を 2022 年半ばに、Hard XFEL は 2027 年までに建設を視野に入れ検討が進んでいる(Table 3)。また、加速器のステータスを(Fig. 7)に示す[7]。

Table 3: MAX IV Upgrade Plan

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
3.0 GeV ring	Advance ODR parameters														
	-200 period lattice tuning + 10s														
	-150 period lattice tuning + 10s + orbital injection														
1.5 GeV ring	Advance ODR parameters														
	Tuning studies														
LINAC	Advance ODR parameters														
	Soft X-ray Linac														
Upgrade to diffraction limited source at 50 keV / 30 period															
DRN															
Hard X-ray FEL															
Beyond baseline															

Figure 16. MAX IV Accelerators Roadmap: 2016-2030. Projects included in the base-line design are shown in orange whereas upgrades of the existing accelerators, including a FEL and a complete replacement of the 3 GeV ring are shown in green.

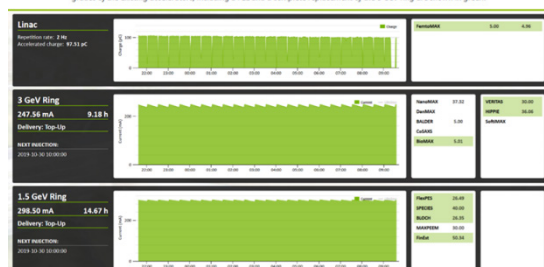


Figure 7: MAX IV operation status (@April/2020).

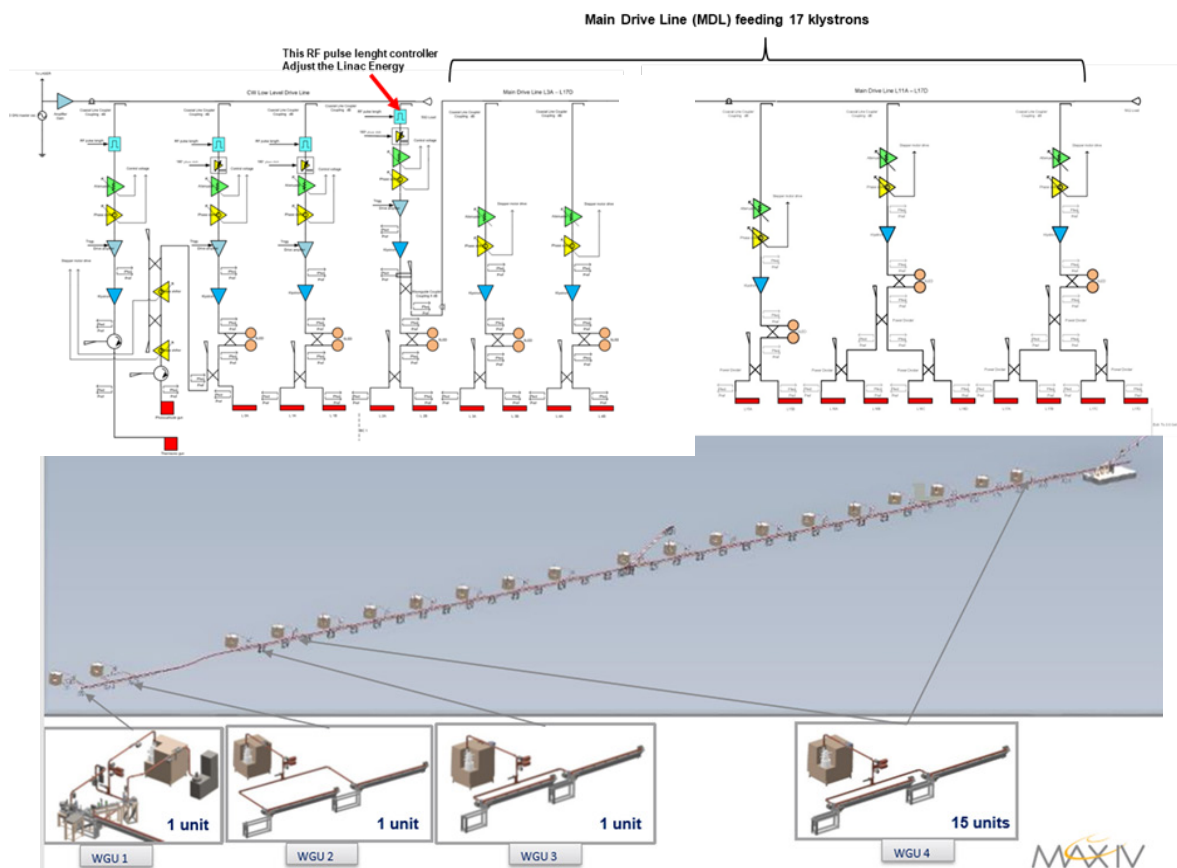


Figure 8: MAX IV linac overview.

## 4. MAX IV ライナックとモジュレータ

### 4.1 ライナックの加速器概要

ライナック加速器の全体概要は、Fig. 8 の通りである。電子銃は熱カソードと RF 電子銃の 2 系統が用意され、ここに 8 MW ピーク出力のクライストロンとスキャンジノバのモジュレータが RF を供給。また、5m の加速管 2 台をフィードする 37 MW ピーク出力のクライストロンとスキャンジノバのモジュレータが 20 台連なる。この RF 出力は、SLED( $Q=10^5$ )によりパルス圧縮(0.7  $\mu\text{sec}$ )される。クライス

トロンは、位相変動を抑えるため常に固定の定電圧飽和モードで動作させる。SLED 圧縮の Q 値の微調整は、RF パルス幅により調整される(Fig. 9)。

クライストロンの RF 入力電力(MDL: Main Drive Line)は、#3 ステーションのクライストロンにより下流 17 台全数に供給される。建屋の壁に取り付けられた方向性結合器は、建屋の伸び縮みを吸収できる調整機構付きのカプラーを新たに開発、安定した RF ドライブ出力が得られている(Fig. 9)。

### 4.2 モジュレータとクライストロン

スキャンジノバは、RF ソースユニットの責任機関としてクライストロン、集束コイルを含むモジュレータを総計 21 台(1 台 8 MW 仕様/20 台 37 MW 仕様)納入した。クライストロンを含むモジュレータの仕様は Table 4、パルス安定度のデータは Fig. 10、ライナックギャラリーの様子は Fig. 11 の通りである。

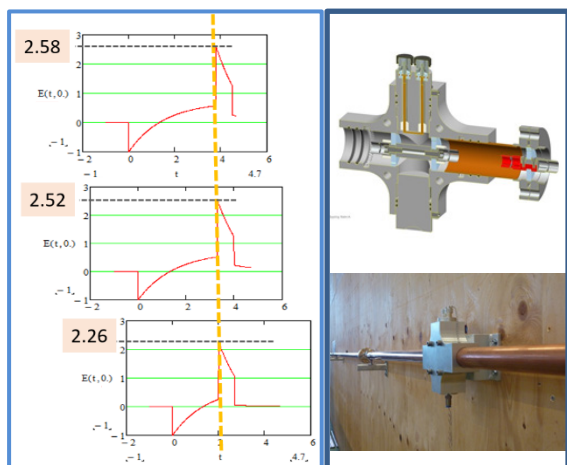


Figure 9: Pulsed compressor tuning and MDL.

Table 4: Modulator Specifications

Parameter	K100	K300
RF Peak Power	8 MW	37 MW
Klystron V/A	170 kV / 140 A	300 kV / 350A
Flat top	3.0 $\mu\text{sec}$	4.5 $\mu\text{sec}$
Pulse Frequency	10 Hz	100 Hz
Flat top flatness	+/- 1%	+/- 1.5%
Stability	< +/- 0.01 %	< +/- 0.01 %
Pulse length jitter	< +/- 8 ns	< +/- 8 ns
Efficiency	> 80%	> 80%

17 番のステーションの安定度が受入れ時 0.01%を超えていたが、その後クライストロン起因と判明し、クライストロンの交換で規格に入っている。[4, 7]

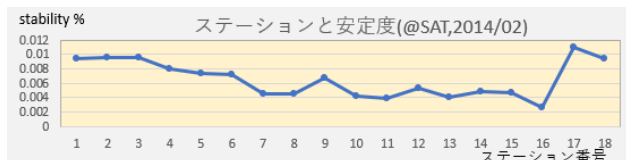


Figure 10: Modulator stability (@SAT).



Figure 11: Klystron gallery with K300 modulator.

### 4.3 導入当初からの改善項目

2014 年にクライストロンとモジュレータの搬入時点からの不具合と改善項目は、下記の通りである。

- 1) 輸送不具合 : クライストロン 1 件
- 2) クライストロン不具合 : 微小放電/コンディショニング不足。エージング継続で改善。複数本発生。
- 3) クライストロン E37310 出力窓のリーク : 出力窓が上を向いているため、セラミックス窓に塵付着が起因。
- 4) ノイズ起因でモジュレータ不具合 : 外部 USB メモリを止め、ハードディスク使用で解決。
- 5) オイル冷却用のモータのベアリング不具合 : ベアリングを他のメーカーに切り替え解決。
- 6) オイル冷却用のモータのソフトの一部に不具合 : ソフト変更で改善。
- 7) IGBT の電流許容インターロック異常 : 設定値変更。
- 8) モジュレータの V/I 読取値の異常 : キャリブレーション変更。
- 9) 24V DC 電源の容量不足 : 1.3A から 2.5A(Siemens 社製)のタイプに交換。
- 10) クライストロン E37326 の微小放電問題 : 稼働後数カ月で発生。SK(Spot Knocking)処理で回復するも再発現象あり。モジュレータに SK 処理機能を追加検討。
- 11) モジュレータ K03 位置の IGBT の特定故障問題 : 20 ステーションのうち K03 のモジュレータの IGBT のみ故障する現象を調査結果、Linac のドックレッグ部起因の放射線が影響を受けていることが判明 (Fig. 12)。272MeV 電磁石に X線シールドの強化で解決。

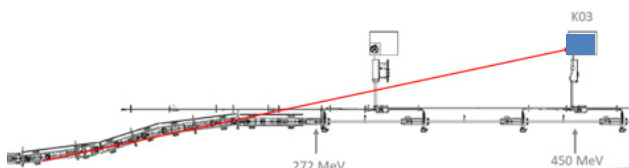


Figure 12: Linac radiation leakage overview.

### 4.4 故障モード統計データ

2017 年のユーザ運転開始以降の加速器施設全体の故障モードは、Fig. 13 の通りである。うち Linac は全体の 24.5%と約 1/4 を占めているが、稼働率は 97.9%であるので、総稼働率の 0.5%程度であった。

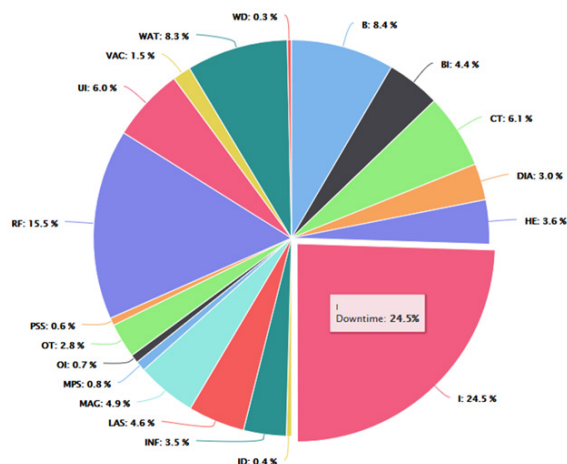


Figure 13: MAX IV downtime distribution.

## 5. まとめ

2014 年にライナックに 18 式、その後増設され 22 式のスカンジノバもモジュレータが設置されている。ライナックの年間運転時間は 7300 時間に達し、スカンジノバのモジュレータは安定稼働の上 MAX IV ライナックの運転を支えている。近い将来 FEL 計画にも RF ユニット全体の責任を担っていく。

## 参考文献

- [1] <https://www.maxiv.lu.se/news/max-iv-becomes-the-first-synchrotron-to-successfully-trial-neon-venting-from-cern>
- [2] M. Johansson, “Design of the magnets for the MAX IV project” Beam Dynamics meets Magnets-II workshop, Bad Zurzach, 01-04 Dec. 2014.
- [3] <https://www.maxiv.lu.se/accelerators-beamlines/accelerators/accelerator-documentation/max-iv-ddr/>
- [4] MAX IV Laboratory Dionis Kumbaro SCN User Meeting May2019.
- [5] E. Al-Dmour *et al.*, “The vacuum system of MAX IV storage rings: Installation and conditioning” Proc. of IPAC2017, Copenhagen, Denmark pp. 3468-3470
- [6] M. Grabski *et al.*, “NEG thin film coating development for the MAX IV Vacuum system”, Proc. of IPAC2013, Shanghai, China pp. 3385-3387.
- [7] MAX IV Laboratory Dionis Kumbaro SCN User Meeting May2020.