

# スキャンジノバ クライストロン用モジュレータの MAX-IV運転状況

湯城磨 (ScandiNova Systems KK)、 Mikael Lindholm (ScandiNova Systems AB)、  
Dionis Kumbaro (MAX-Lab/MAX-IV)

## 要旨

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. MAX IV 加速器概要(1)

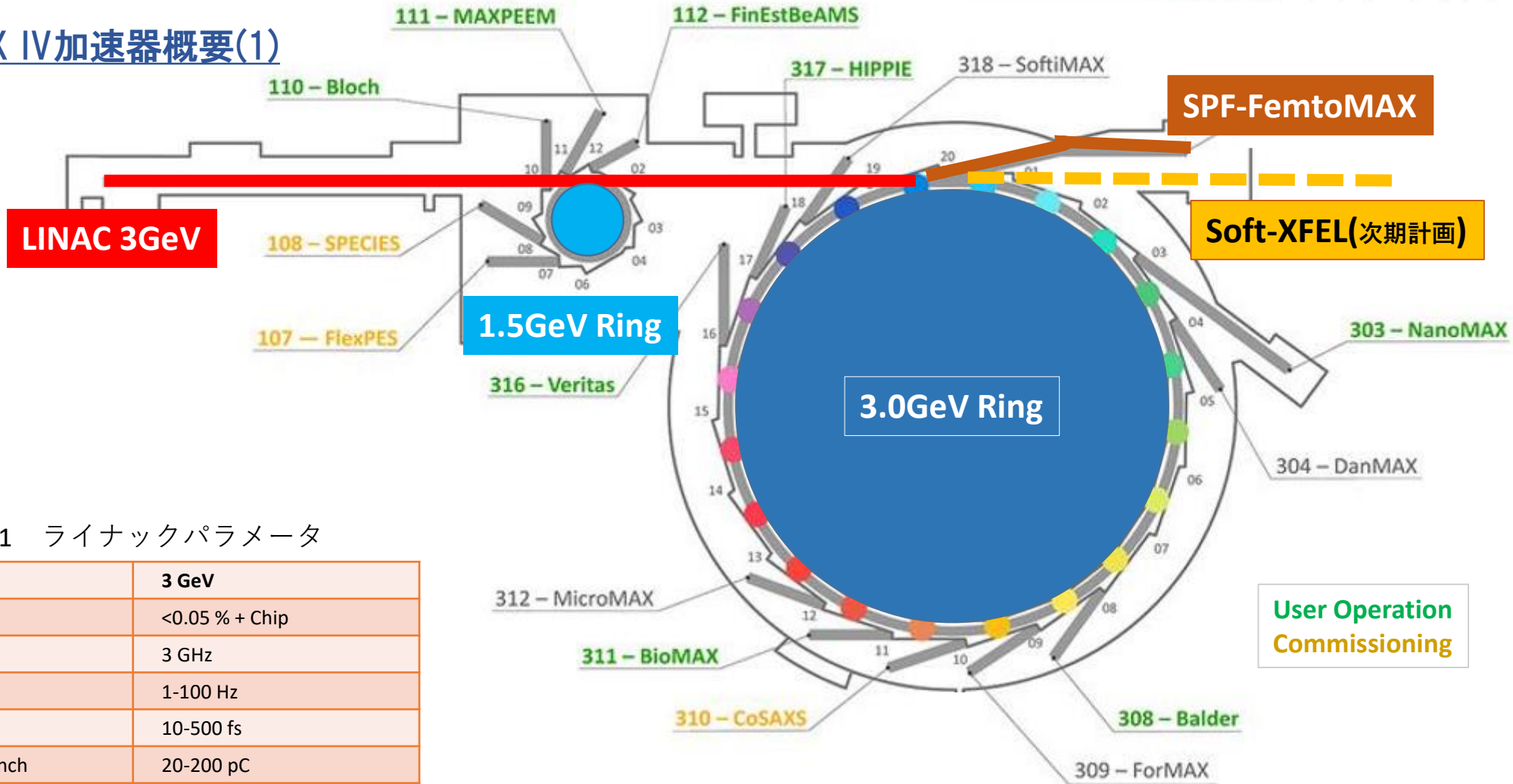


表1.1 ライナックパラメータ

Energy	3 GeV
Energy Spread	<0.05 % + Chip
RF Frequency	3 GHz
Rep. rate	1-100 Hz
Bunch Length	10-500 fs
Charge per bunch	20-200 pC
Normalized emittance	< 1 um

表1.2 1.5GeVリングパラメータ

Energy	1.5 GeV (full energy top-up from Linac)
Circumference	96 m
Beam current	300 mA (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

表1.3 3.0GeVリングパラメータ

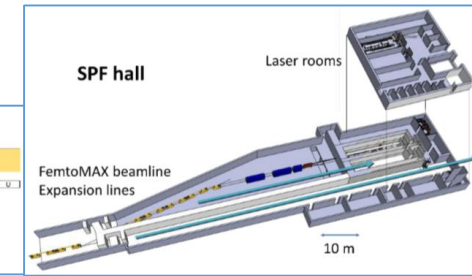
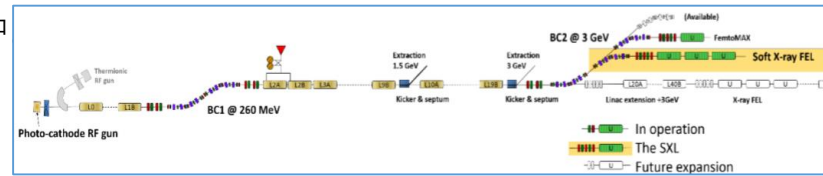
Energy	3.0 GeV (full energy top-up from Linac)
Circumference	528 m
Beam current	300 mA (500 mA max)
Emittance H/V	-330 pm rad / -8 pm rad
Lifetime	10 hours
Orbit stability	10% of beam size
RF frequency	100 MHz

## History

- 1981 - MAX-lab is formed
- 1986 - First experiments at **MAX I**
- 1997 - First experiments at **MAX II**
- 2005 - MAX IV Conceptual Design Report
- 2007 - First experiments at **MAX III**
- 2009 - Decision to build **MAX IV**
- 2016 - First experiments at **MAX IV**
- 2021 - First experiments at Soft X-FEL is planning

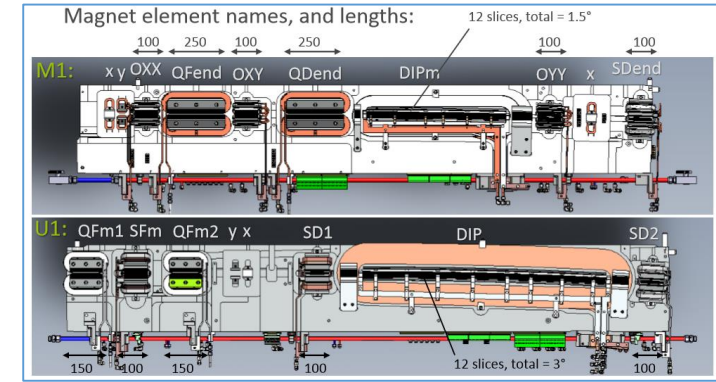
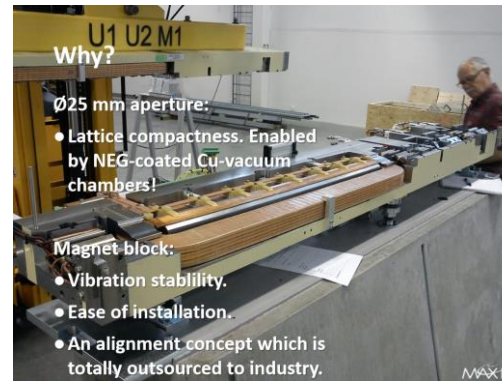
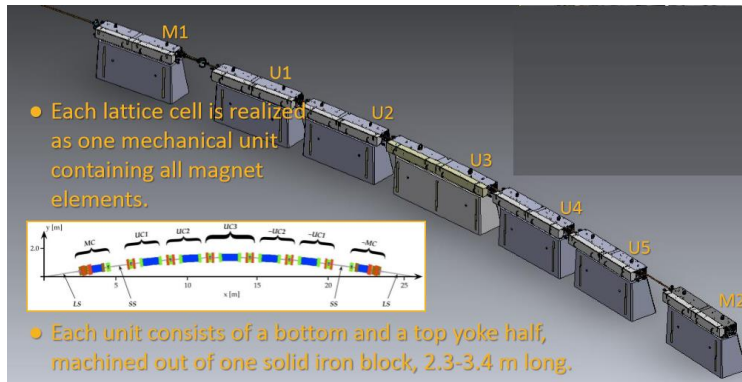
## 1. MAX IV加速器概要(2) - 特徴とテクノロジー -

① フルエネルギー入射で次期FELアップグレードを可能とする加速器設計とした。FemtoMAXは稼働中S-XFELは設計検討段階である。  
RFソースは100Hz対応済。

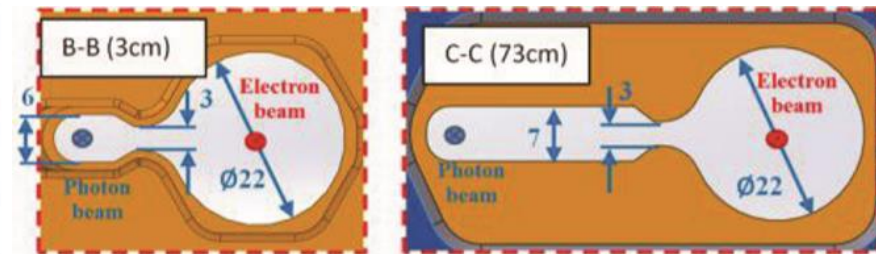
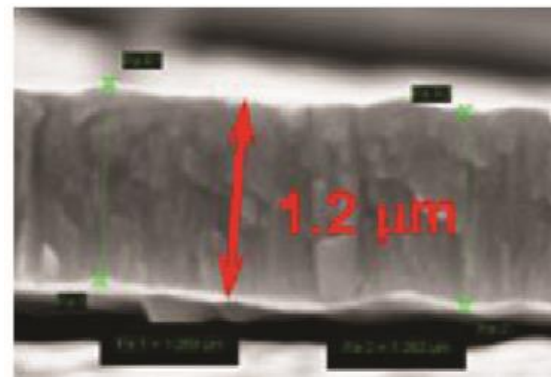
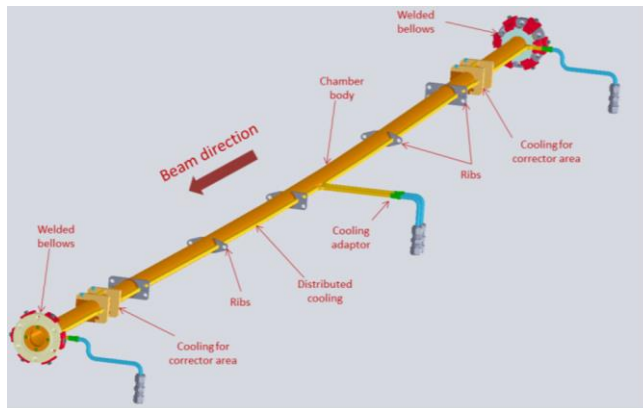


② 旧来マシンのMAX II/IIIのユーザの為、1.5GeVと3.0GeVの2リング方式とした。

③ 電磁石セルブロック内に、2極、4極、6極、8極の電磁石を配置し、一体半割れ構造体とした。



④ 3GeVの真空チャンバは、CERNとの共同研究の上、内径22mmの銅パイプにNEGコーティング+ネオンガスを施し、外側を水冷却。イオンポンプを使わない真空システムを構築。1.5GeVの真空チャンバは、SUSパイプ材でイオンポンプ、TSP(Titanium Sublimation Pump)とNEGにより真空システムを構築。



Linac successfully completed the task for which it was assigned

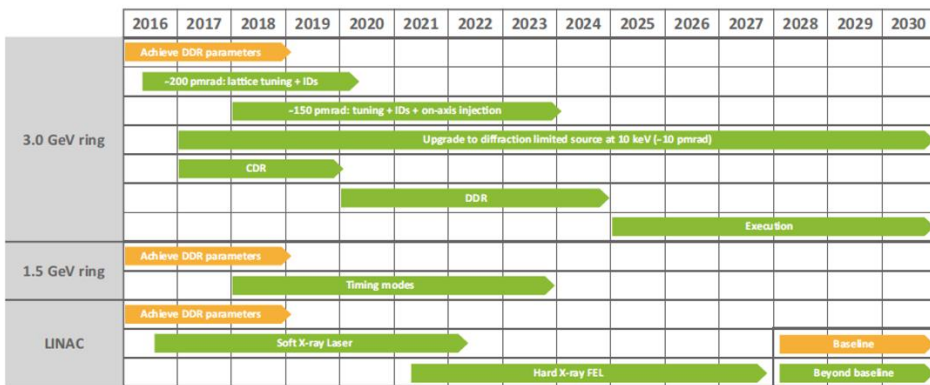
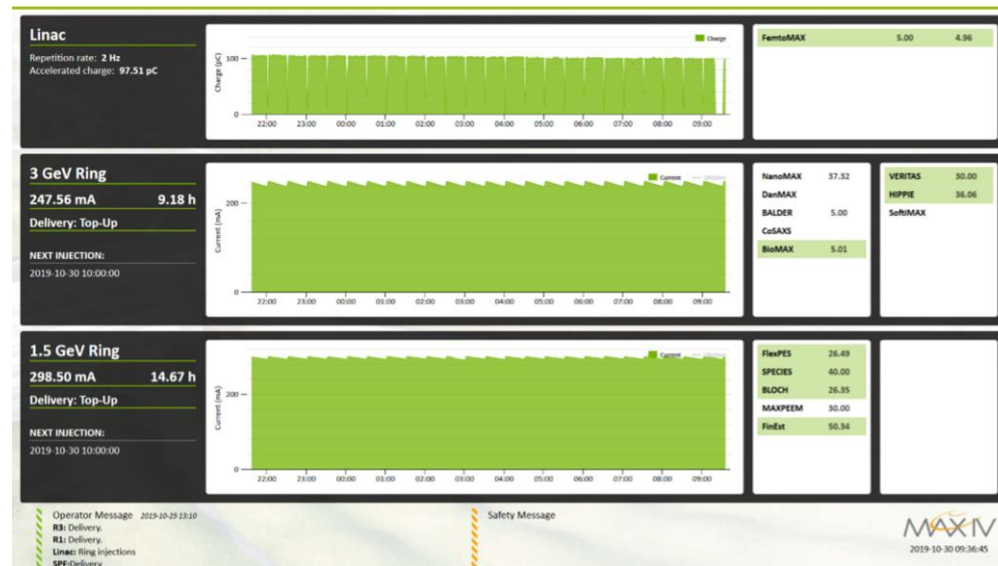


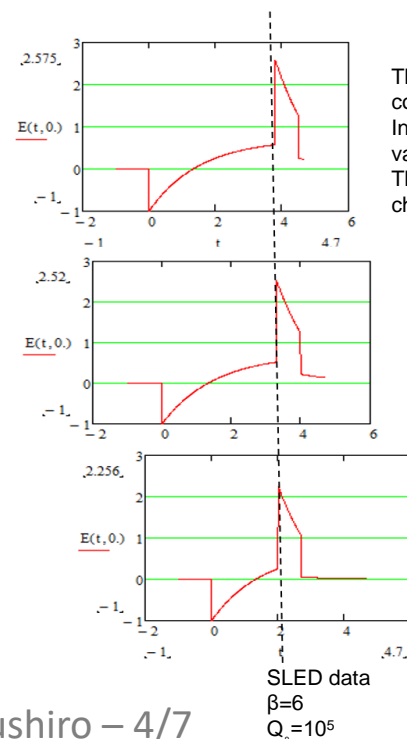
Figure 16. MAX IV Accelerators Roadmap: 2016-2030. Projects included in the base-line design are shown in orange whereas upgrades of the existing accelerators, including a FEL and a complete replacement of the 3 GeV ring are shown in green.



### 3.1 MAX IV加速器 ライナックとLLRF

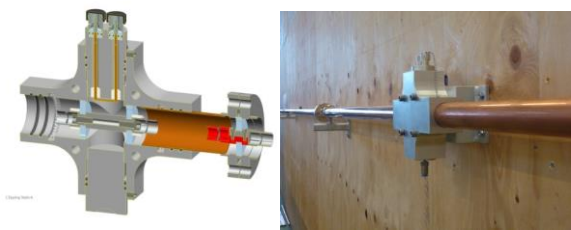
LinacのLLRFのコンセプトは下記の通りである。

- 1) 1台のドライブ用クライストロンE37310が17式のクライストロンをドライブし、位相変動を抑える。
- 2) RFパルス幅を変えて、パルス圧縮のピーク値を制御。

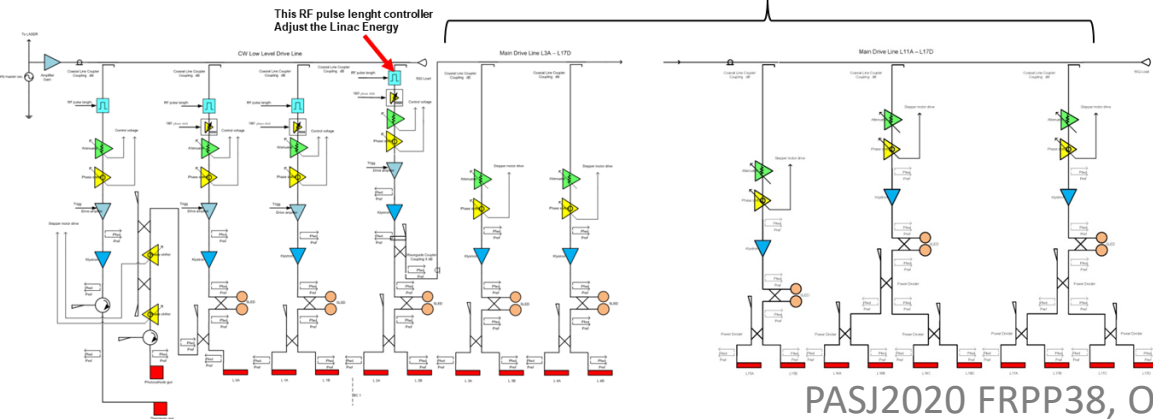


The klystrons are running at constant voltage to maintain a constant RF phase at the output. In order to reduce klystron output power variations due to variations in the input power they are run in sturation mode. The output power from SLED is adjusted by varying the charging time.

Input RF power from the third klystron 90 kW



Adjustable directional couplers Fixed to the linac tunnel wall at each accelerating section. Sliding joints Connected together with pressure regulated 1/8" EIA rigid line



ScandiNovaは、RFソース部分の責任機関として、クライストロン、集束コイルを含むモジュレータをMAX IVのライナックに全数供与。

MAX IV Linac

The linear accelerator (Linac) at MAX IV is constructed for injection and top-up to the two storage rings and as a high brightness driver for the Short Pulse Facility. It is also prepared to be used as an injector for a possible future Free Electron Laser. Linac consists of three main hardware parts: RF power, wave guide and accelerator systems. Linac lies in two parallel tunnels: Klystron Gallery and Linac Tunnel:

The RF power system consists by:

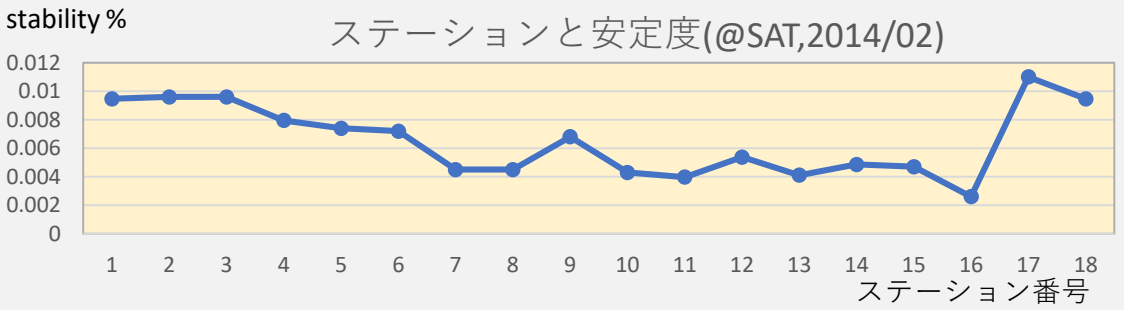
- 20+1 pcs: RF power units (37MW peak, 4,5usec, 100Hz),
- 1+1 pc: RF power unit (8MW peak, 3usec, 10Hz),

The wave guide and passive RF compressor:

- 300 m Wave guide
- 20+1 pcs: SLED (Q=100000, 4,5usec in, 0,7usec out),

The accelerator system:

- 2 pcs: RF Guns (a thermionic and photo-cathode), MAX IV Laboratory
- 39 pcs: Linac structures (max gradient of acceleration 25MV/M, 5m long)

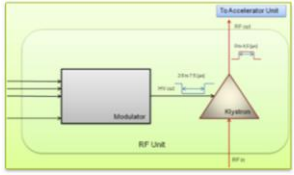


#17ステーションは、SAT後クライストロン起因と判明し交換された。(建設直後は18ステーション)

Klystron gallery

- 20 pcs SCN modulator model K2, Toshiba klystrons model E37310
- 1pc SCN modulator model K1, Toshiba klystron E37326

In MAX IV Laboratory dictionary:  
ScandiNova means modulator and  
Canon means klystron



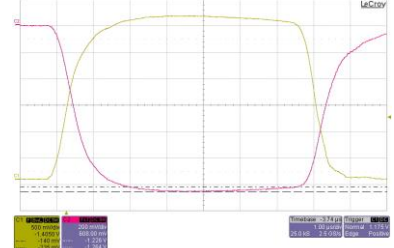
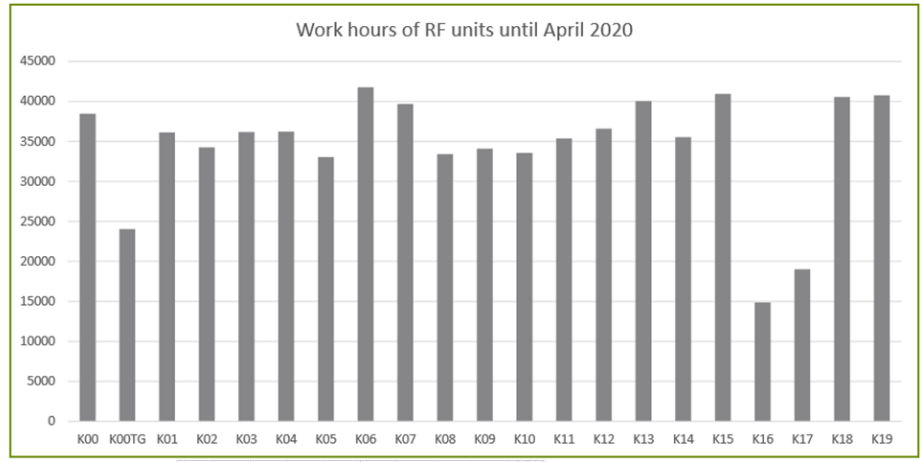
Parameters of model K1 and K2 modulators

Parameters	K1	K2
Peak RF power output [MW]	20	38
Klystron Average RF Power [kW]	0.8	18
Klystron voltage range [kV]	170	300
Klystron current range [A]	140	350
Flat top pulse width variable [μs]	0-3	0-4.5
Voltage Pulse width variable [μs]	1-4	2.5-7
PRF variable [Hz]	0-10	0-100
Flat top ripple or droop [%]	± 1.0	± 1.5
Pulse to pulse amplitude stability [%]	±0.01	< ± 0.01
Pulse to pulse to pulse time jitter [ns]	< ±4	< ±6
Pulse length jitter [ns]	< ±8	< ±8
Modulator Electric efficiency [%]	> 80	> 80



- The modulator model K2, consists of three 25kW High Voltage Power Supplies (CCPS) and seven parallel High Power Switch Units (HPSU).

- The modulator K1, consist of one 25kW High Voltage Power Supplies (CCPS) and two parallel High Power Switch Units (HPSU).

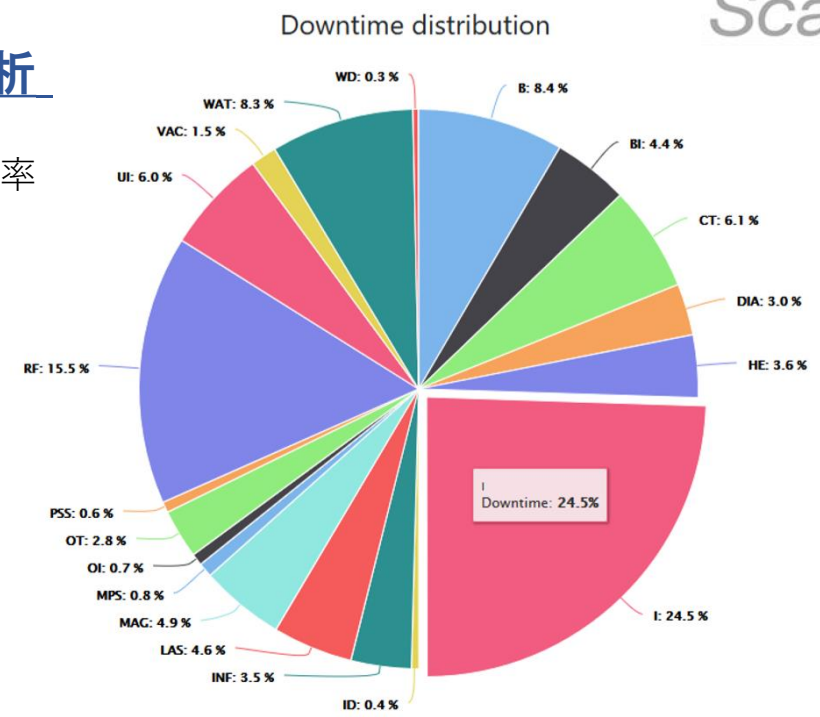


ビーム電圧/電流のパルス波形

### 4. MAX IV加速器 故障モード分析

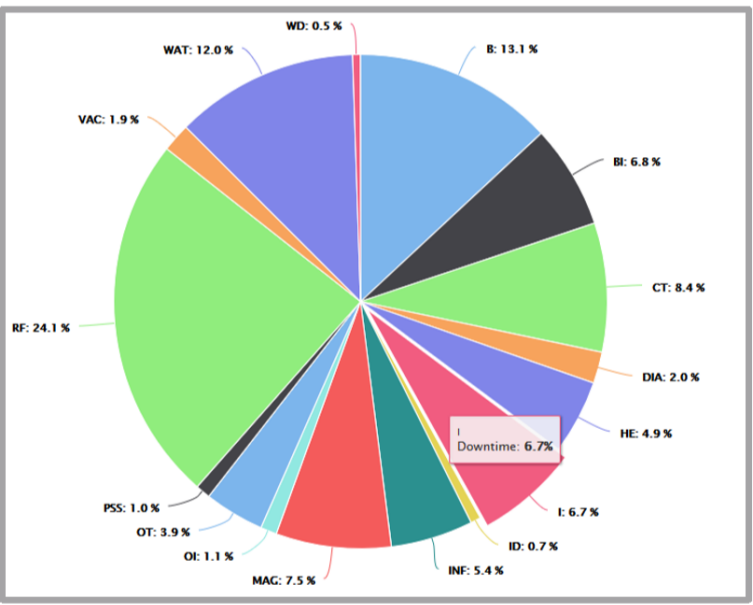
1.5GeVリング、3.0GeVリング及びSPFの稼働率とダウンタイムの概要は次の通りである。

Machine	Uptime (%)
R3	97.73
R1	98.39
SPF	97.60

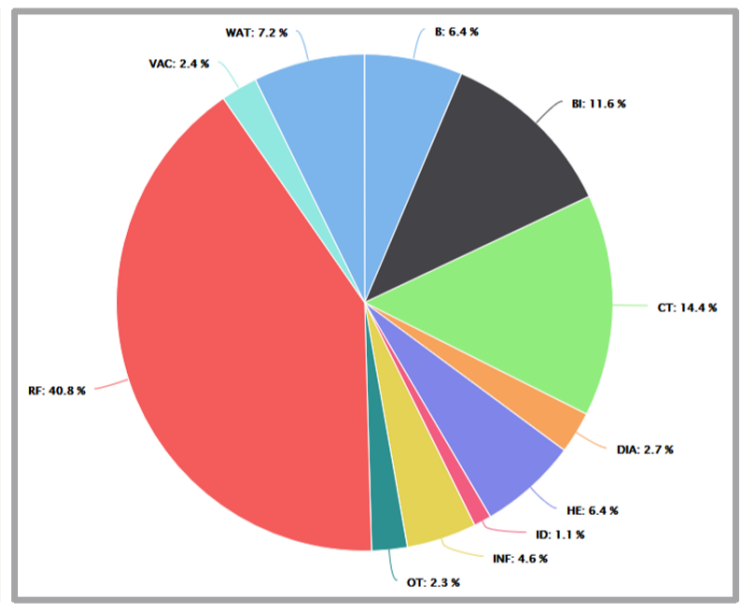


Beamlines	B
Controls	CT
Diagnostics	DIA
MPS interlock	MPS
Insertion Devices	ID
Infrastructure	INF
Linac	I
High Level Software (M)	MML
Human error	HE
Orbit Interlock	OI
Others	OT
Network	NET
Power Supplies	MAG
PSS (except BLs)	PSS
Radio Frequency	RF
Vacuum	VAC
Water interlocks	WAT

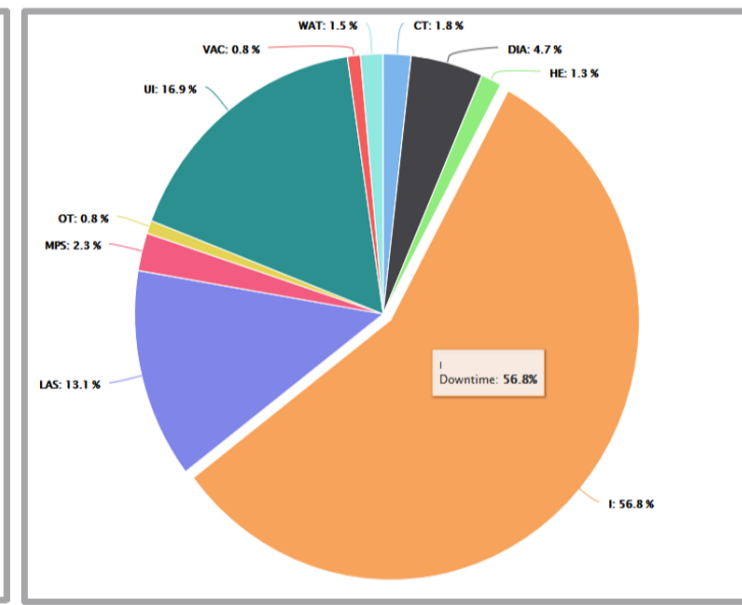
Downtime distribution R1 (1.5 GeV ring)



Downtime distribution R3 (3 GeV ring)



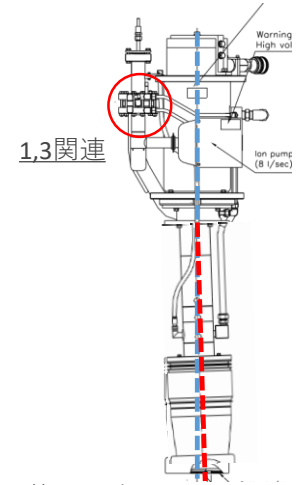
Downtime distribution SPF (3 GeV linac)



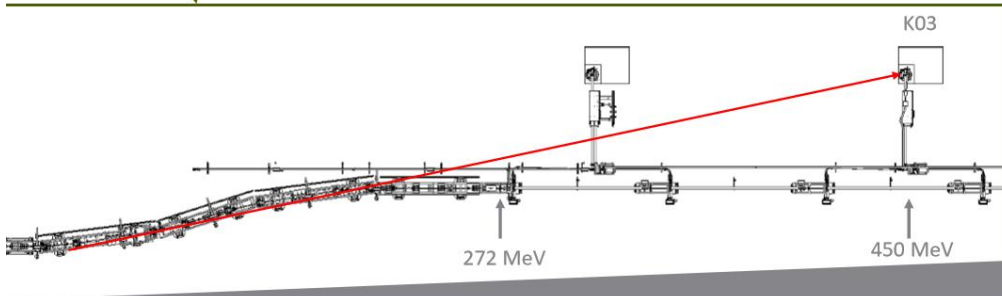
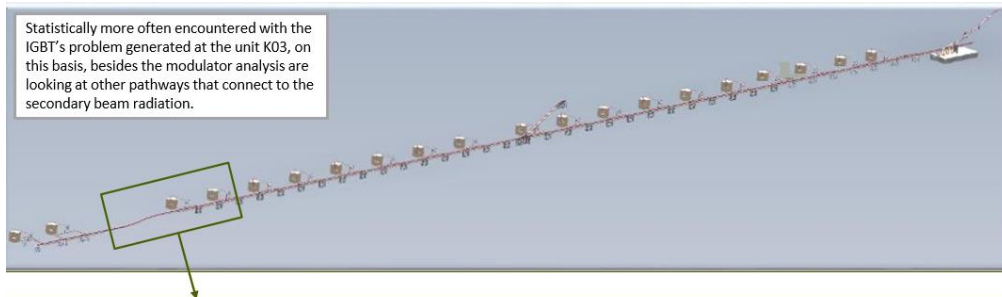
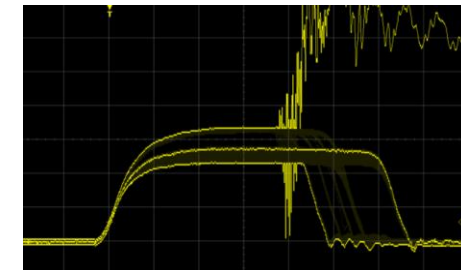
## 5. MAX IV加速器 ライナックRF関連 不具合/改善項目

導入当初からの不具合/改善履歴を下記に列挙する。

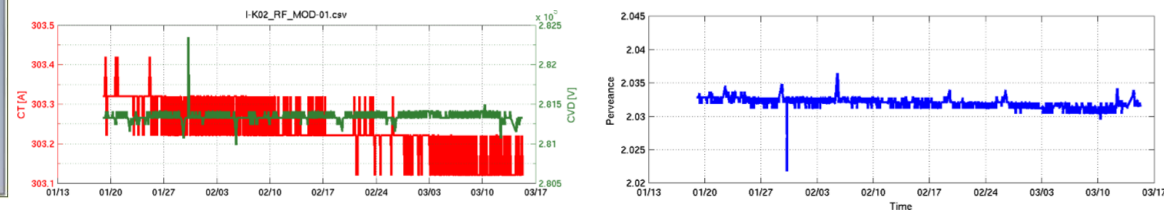
- [T] クライストロンE37310の輸送不具合：クライストロン受入れ試験(IP通電、他)は合格。しかし、インストール時にクライストロンのポティ部が3°程ベントしていることが発覚。→調査結果、輸送内箱にダメージが確認され(外箱は損傷無し)輸送途中に転倒したと推定。(発覚が遅く保険適用にならず。)
- [K] クライストロンE37310の微小放電。：コンディショニング不足。エージング継続で改善。複数本発生。
- [K] クライストロンE37310出力窓のリーク：出力窓が上を向いているため、セラミックス窓にパーティクルが付着し、窓割と判断。→ 上向き窓は特別の事情が無い限り水平取り出しにすべきであろう。
- [M] モジュレータのデータ取り出しを外部USBメモリとしていたが、これがノイズ起因となり、アラーム停止が出ていた。→ 外部USBメモリを止め、ハードディスク保存で解決。
- [M] 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。
- [M] 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。
- [M] IGBTの電流許容インターロック異常が発生 → 設定値を変更して改善。(設定値がシビアすぎた)
- [M] モジュレータのV/I読取値の妥当性の検証の結果、電圧の読取値にずれが指摘。→ キャリブレーション変更。
- [M] 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。
- [K] 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。
- [M] イオンポンプ電源の機能強化を検討中。
- [M] 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のドックレグ部起因の放射線が影響を受けていることが判明。  
→ Linacのマグネット部にシールドを追加することで不具合解消。詳細は、下図の通り。



微小放電関連



クライストロンE37326の運転変動



**6. 纏め** 2017年にユーザ運転を開始して以来、スカンジノバのK300型モジュレータ21台、K100型モジュレータ2台は、初期不具合の改善を完了し、MAX IV ライナックの安定稼働を支えている。更に近い将来S-FELも建設が着手される見込みで、本格稼働(100pps)運転も始まる見込みである。スカンジノバは、今後とも各国の研究施設の安定稼働の為により良い製品を届けて参ります。

Reference:

1. SCN User Meeting Dionis Kumbo Tokyo 14 to 17 May 2019
2. MAX IV Laboratory Dionis Kumbo SCN User Meeting May 2020
3. <https://www.maxiv.lu.se/news/first-year-operational-results-of-the-max-iv-3-gev-ring/>
4. Design of the magnets for the MAX IV project Martin Johansson, Beam Dynamics meets Magnets-II workshop, Bad Zurzach, 01-04 Dec. 2014
5. The Status of the vacuum systems of the MAX IV laboratory, IPAC2013 Shanghai, China
6. NEG thin film coating development for the MAX IV Vacuum system, IPAC2013, Shanghai, China