

大強度加速器J-PARCの現状と将来計画

Yoichi Sato
Accelerator Laboratory, KEK
J-PARC Center, KEK & JAEA

Contents

- Status of accelerator operation
- The 5-year medium-term plan (2013 ~ 2017)
- The Long-term plan (2018~)
- Summary

Status of accelerator operation

400 MeV H^- Linac
[181 MeV at present]

3 GeV Rapid Cycling
Synchrotron (RCS)

Neutrino Beam Line for
T2K Experiment

K4
Trigger

Materials & Life
Science Facility
(MLF)

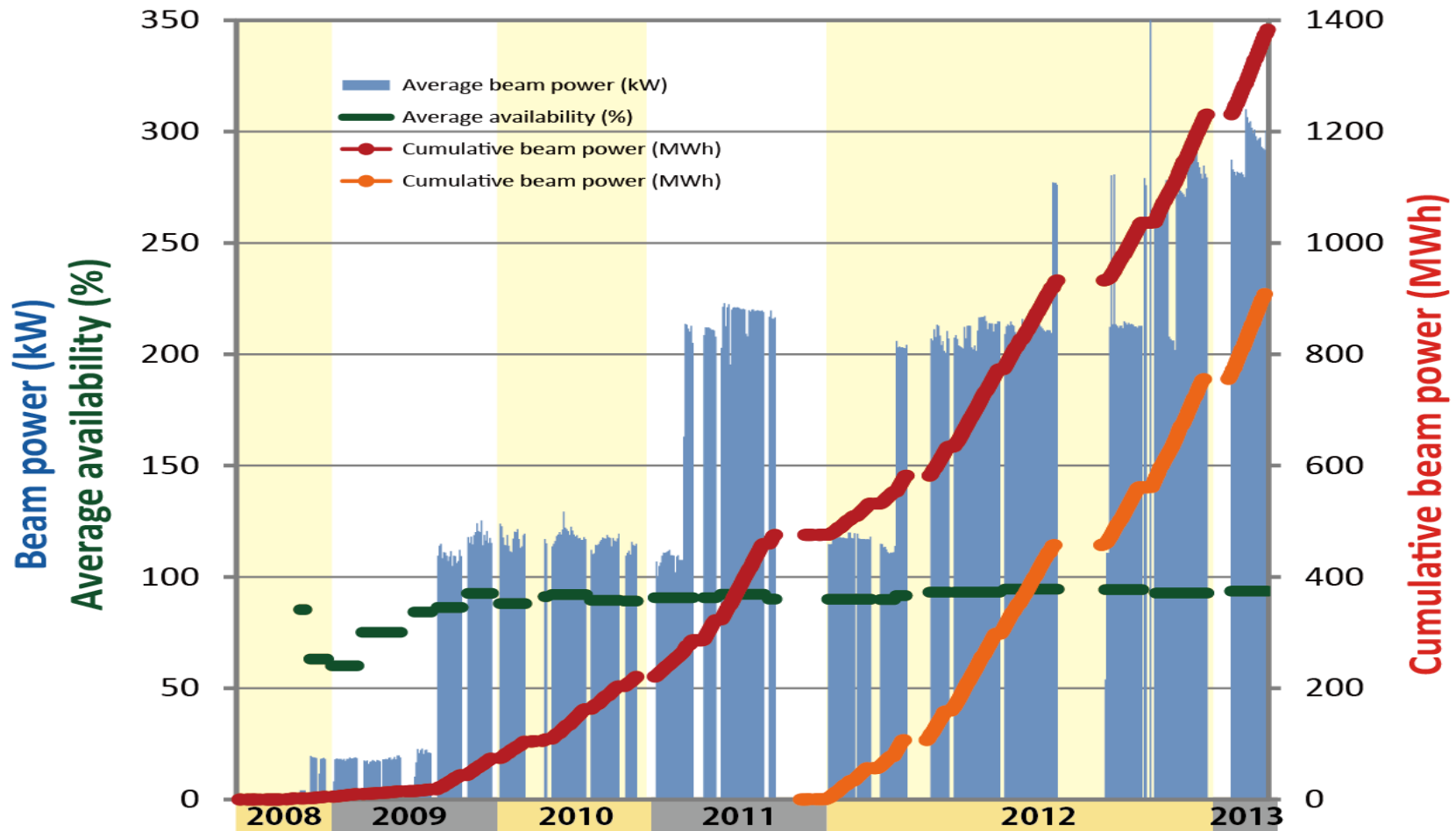
Main Ring Synchrotron
(MR)

Hadron
Experimental
Hall (HD)

— JFY 2006 / 2007
— JFY 2008
— JFY 2009

History of beam delivery from RCS to MLF

May 2008- March 2013

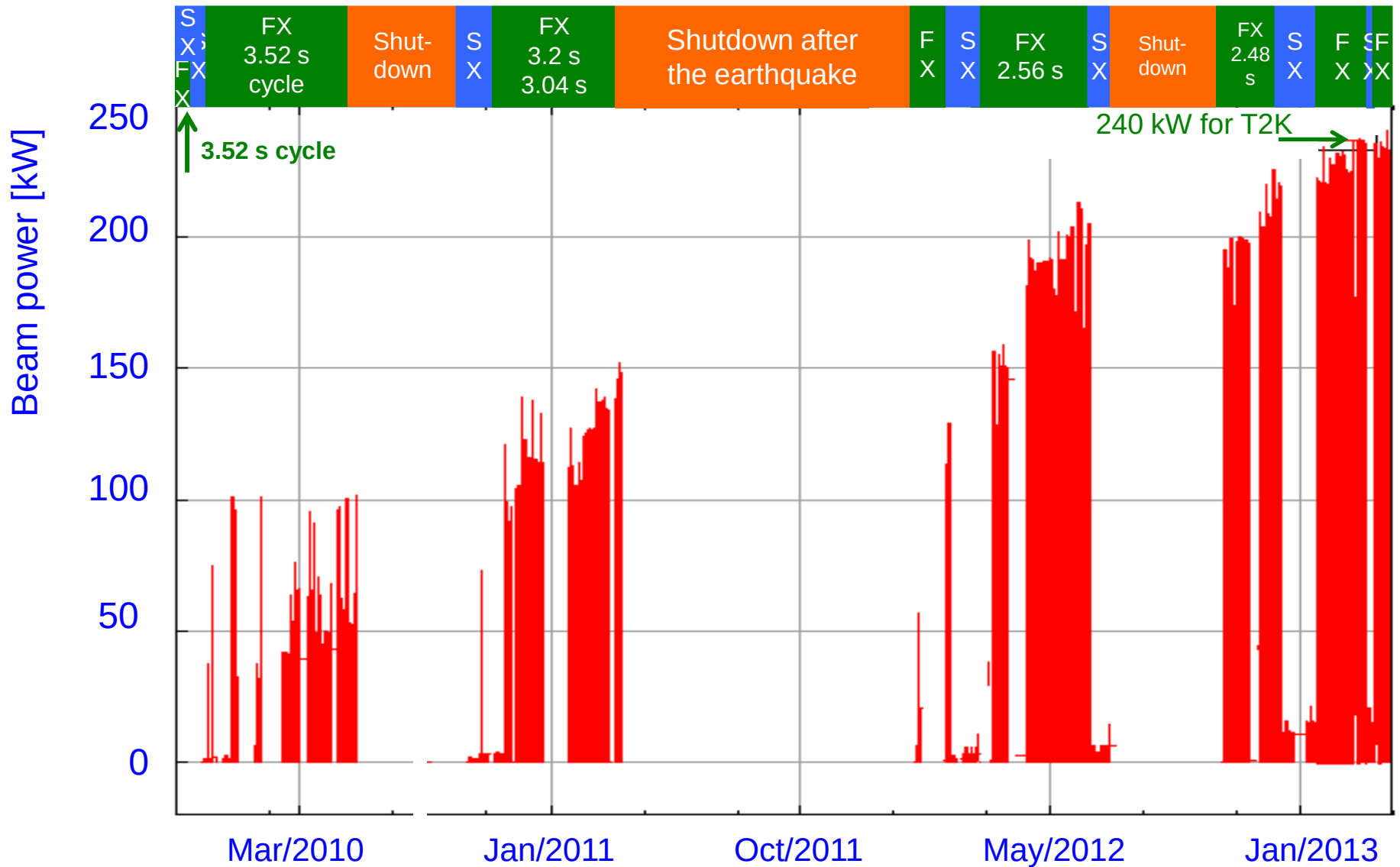


Beam delivery of ~ 300 kW was started in Jan. 2013.

High power beam study of the RCS was performed in Apr. 2013.

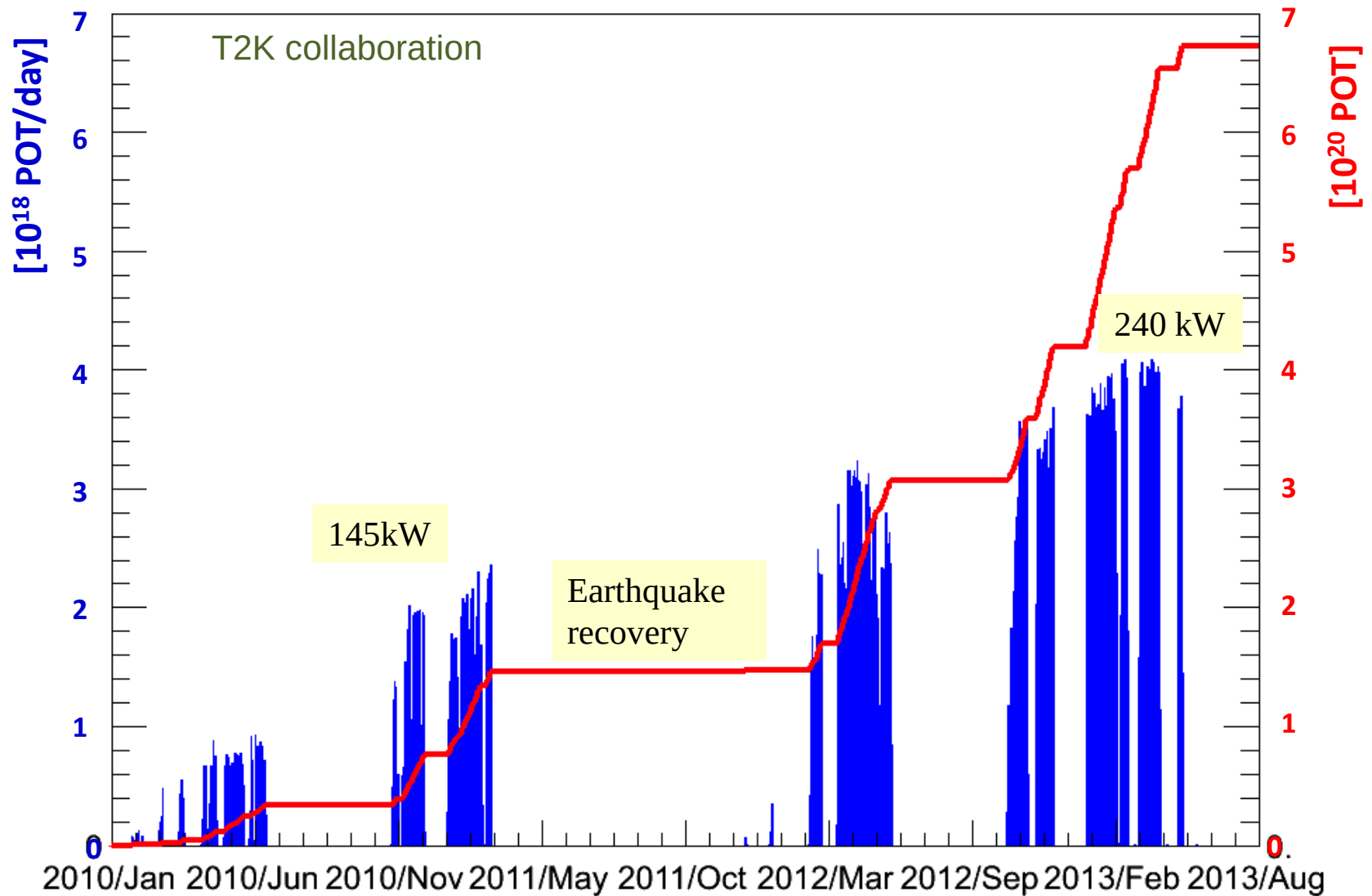
Beam delivery of 556 kW was successfully demonstrated.

MR operation history from January 2010 to March 2013



History of delivered beam to the T2K experiment

as of May 7th, 2013



Accumulated number of proton $\sim 6.7 \times 10^{20}$ POT.

MR FX commissioning

MR ~240 kW [空間電荷効果の影響が許容範囲]

入射エラー(入射キッカーテール部由来)対策:

- バンチ毎フィードバックシステムの導入、増強
- 入射キッカーテール部の一部改善

緑字は2014春に適用
青字は試験/開発中

入射時、加速初段でのビーム不安定性対策:

- バンチ毎フィードバックシステムの導入、増強
- バンチ内フィードバックシステムの試験
- 色収差の補正パターン(6極磁石) --- Δp 由来チューン広がり(抑えすぎると不安定)
- 4極磁石補正パターンによるチューンずれ抑制

ビームハロー成分対策(ロス局在化、放射化抑制):

- コリメータの増強(3-50BT: 2 kW, MR: 3.5 kW)だが、放射化を測定しながらロス量を操作
- Linac 400 MeV化に伴うハロー成分の低エミッタンス化(3-50BT通過時)
- 3-50BTのアップグレードに基づくハローカット効率化、3-50BT/MRロスバランス

その他の対策:

8極磁石 / SkewQ磁石 / 新オペレーションポイント / RF feed-forward / 繰り返し時間短縮(2.48s->2.4s)

MR 300 kW or more [空間電荷効果の影響が厳しくなってくる]

上のツールによる調整に加え、バンチ長を伸ばしてしのぐ。

- 高調波RFの導入 (整備済)
- 入射キッカー立ち上がり時間の短縮 (補正キッカーの導入: 2014 Fall)

ビーム強度増強にむけて

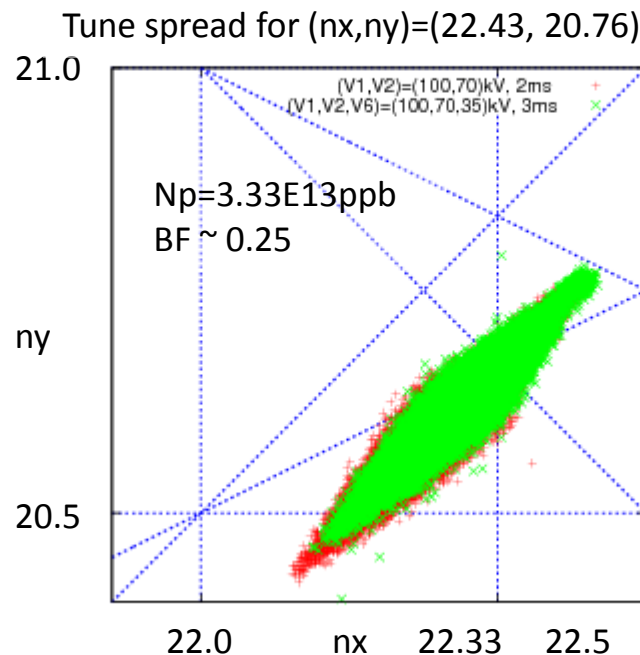
- ビーム強度の増強は空間電荷効果対策が鍵となる。

$$\text{Bunching Factor: } BF = \frac{I_{\text{average}}}{I_{\text{peak}}}$$

$$\Delta v_{\text{Space Charge}} = - \frac{n_{\text{total}} r_p}{2\pi\epsilon_{\perp} \beta^2 \gamma^3} \frac{1}{BF}$$

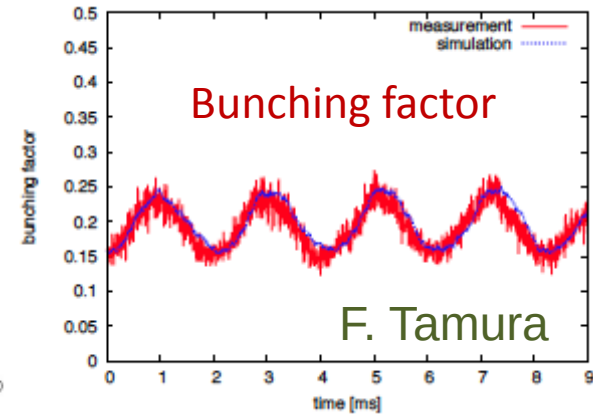
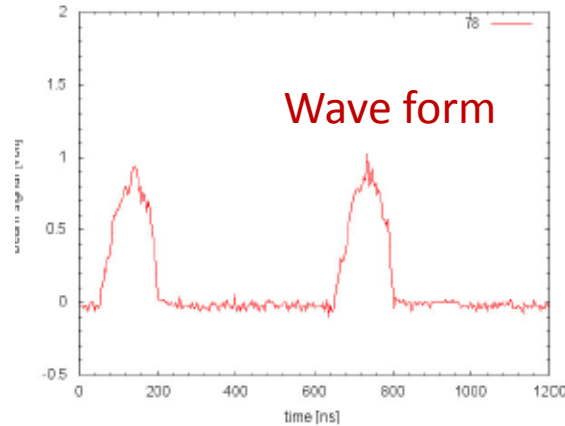
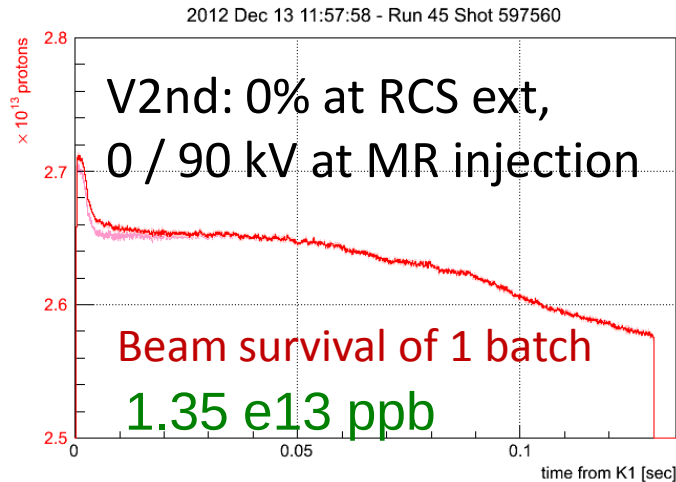
一様分布モデルの場合

- バンチ長を伸ばし、ピークカレントを下げれば(BFが上がり)、空間電荷効果の緩和が可能。
- しかし、バンチ長を伸ばしすぎると、RCS取出しキッカー、MR入射キッカーの立ち上がり時間中にビームが掛かってしまい、横方向エミッタンスの広がったビームになってしまう。

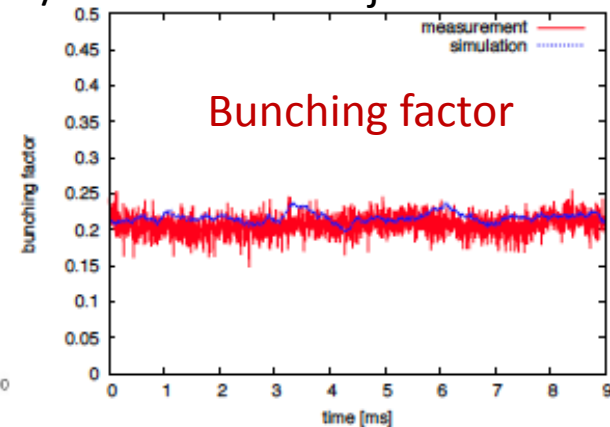
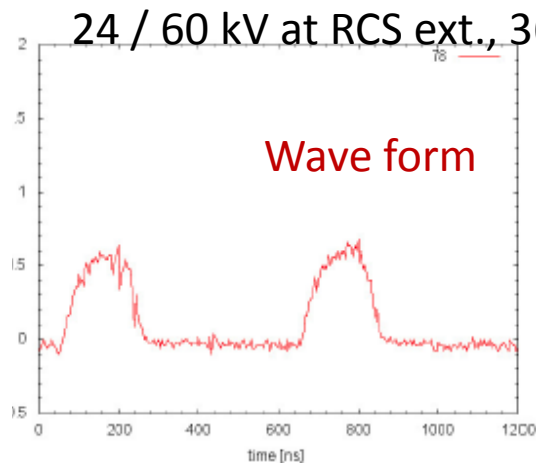
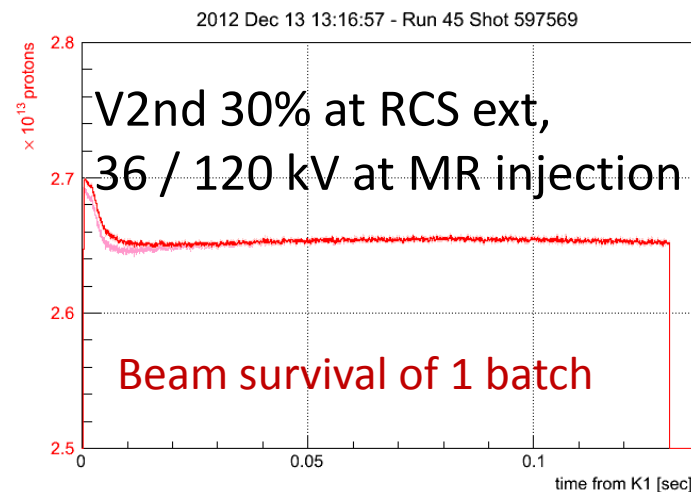


Improvement of beam survival with 9th rf system in MR

Without 2nd harmonics rf voltages

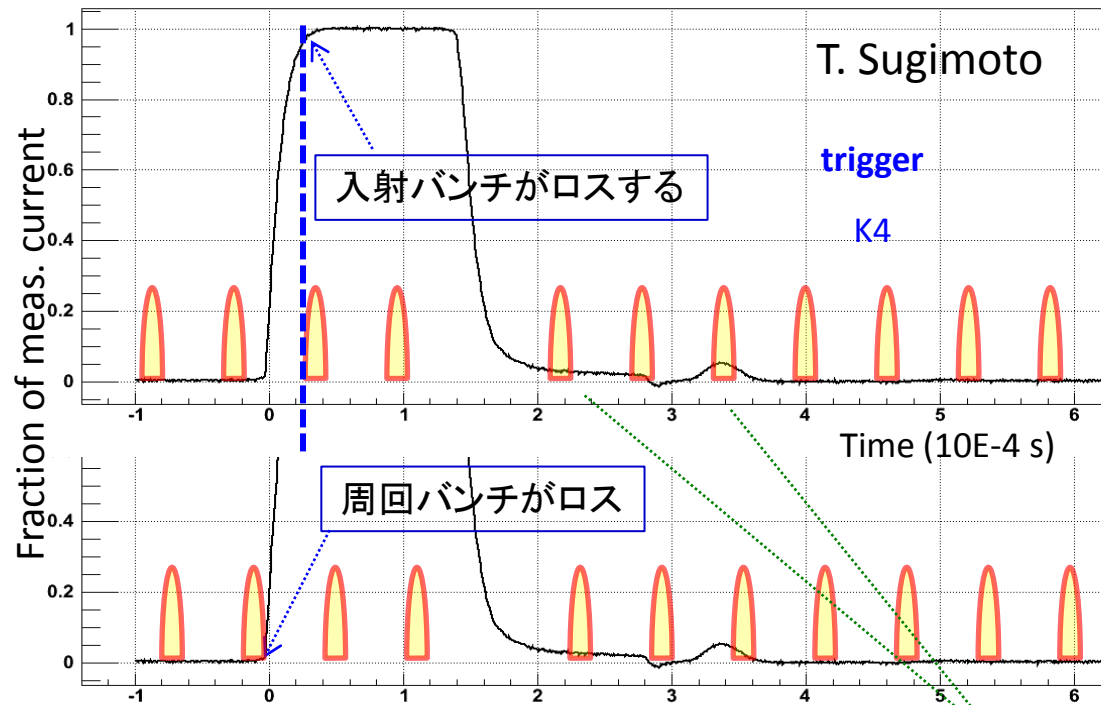


With 2nd harmonics rf voltages



Beam loss is reduced by the 2nd harmonic RF.

MR入射キッカー



現状の立ち上がり時間: 380ns (1 - 99%)

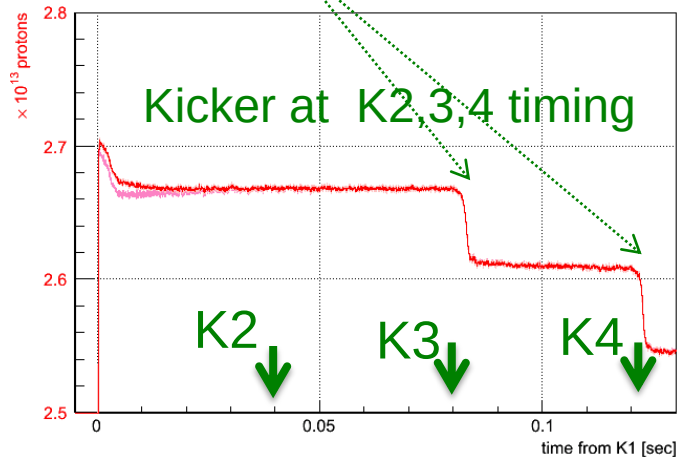
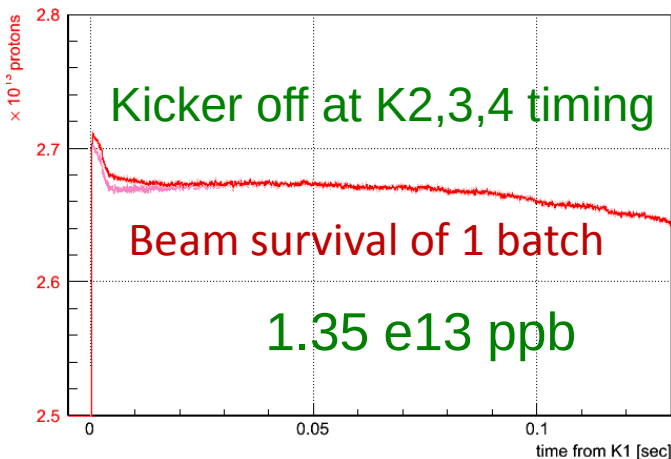
2013年夏:

整合用コンデンサの最適化で
立ち上がり時間-60 nsを目指す。

テール部のロスも一部改善

2014年夏:

テール部のロスは補償用小型キッカーを
導入する。



入射キッカーupgrade
はMR300kW以上を
目指す際には必須

The 5-year medium term plan for FX operation 2013~2017

Upgrade plan of linac

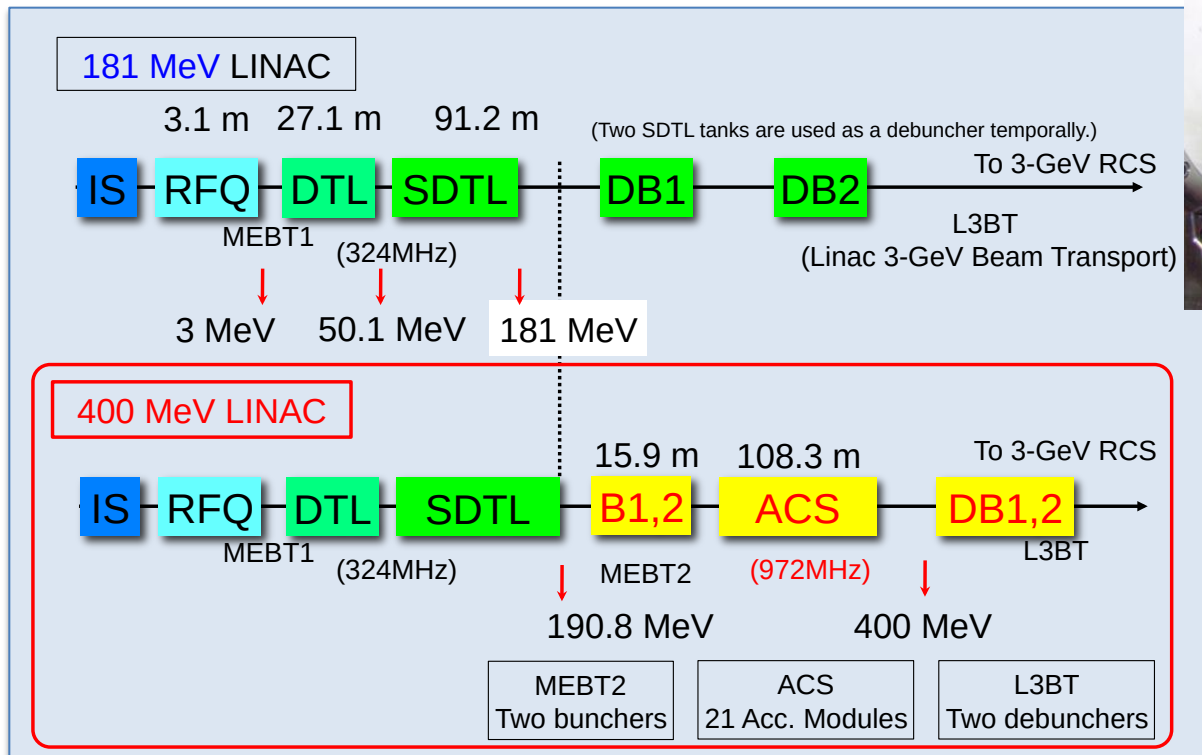
The design specification of the J-PARC facility (e.g. 1MW@RCS, 0.75MW@MR) cannot be realized with the present 181 MeV/30 mA linac.

For beam energy (Small emittance beam for the RCS injection) :

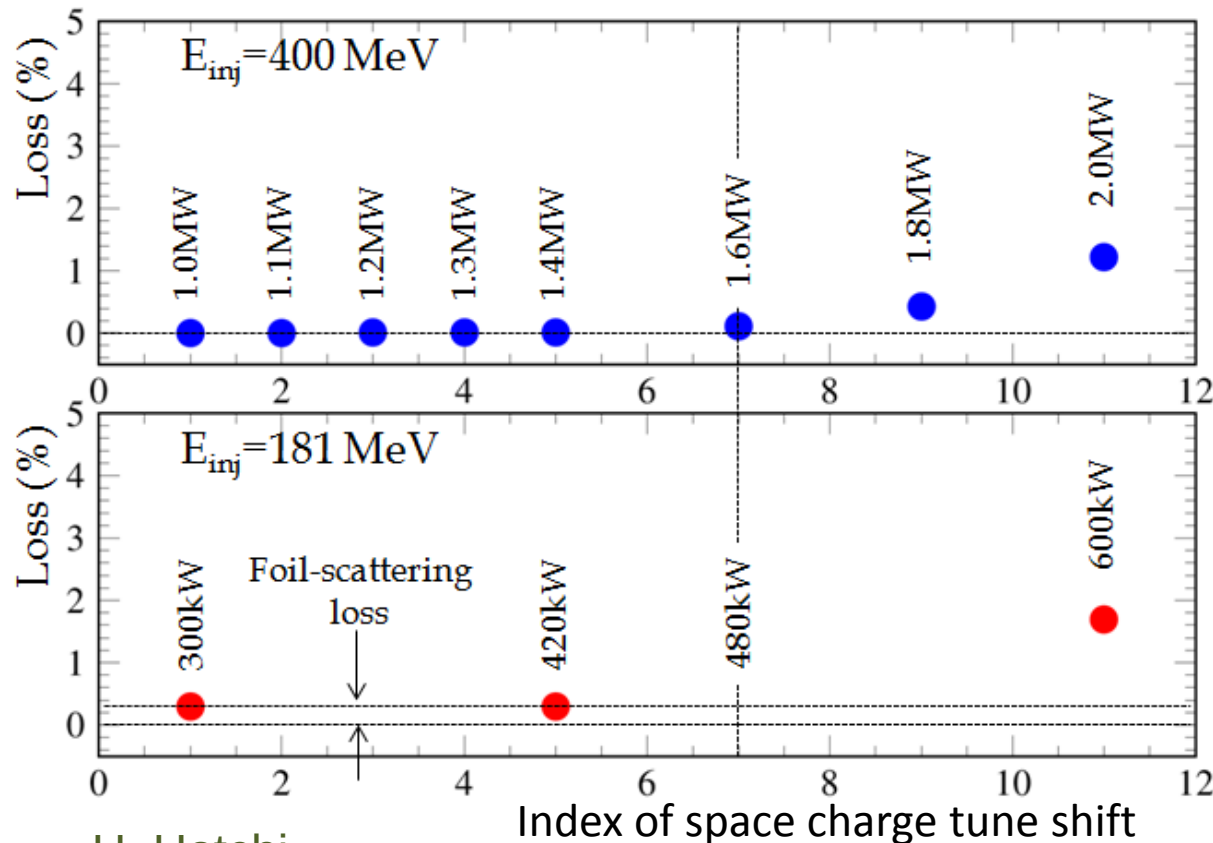
New accelerating structure, ACS(Annular Coupled Structure linac) will be installed to increase the extracted beam energy of the linac from 181 MeV to 400 MeV. Power supplies of RCS injection magnets will also be replaced for adopting 400 MeV injection beam.

For peak beam current :

Front-end part (IS+RFQ) will be replaced for increasing peak current from 30 mA to 50 mA.



Limitation of the RCS beam power



H. Hotchi

Summary of 400 MeV inj.

RCS intensity	Particle Loss	Loss power at 25 Hz (for MR)
1.0 MW	~0.3%	400 W (64 W)
1.1 MW	~0.3%	440 W (70 W)
1.2 MW	~0.3%	480 W (77 W)
1.3 MW	~0.3%	520 W (83 W)
1.4 MW	~0.3%	560 W (90 W)
1.6 MW	~0.5%	1067 W (170 W)
1.8 MW	~0.7%	1680 W (269 W)
2.0 MW	~1.5%	4000 W (640 W)

RCS collimator limit ~4 kW

RCS has a feasibility to operate 2 MW
(2MW is twice of design beam power)

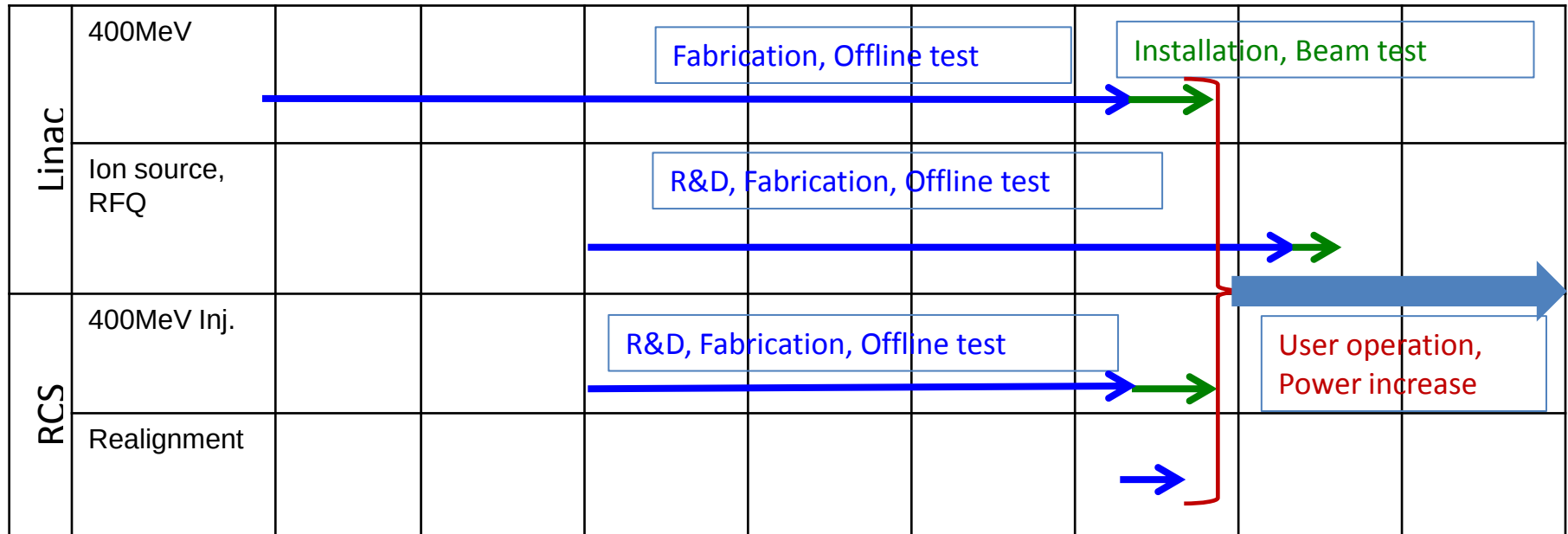
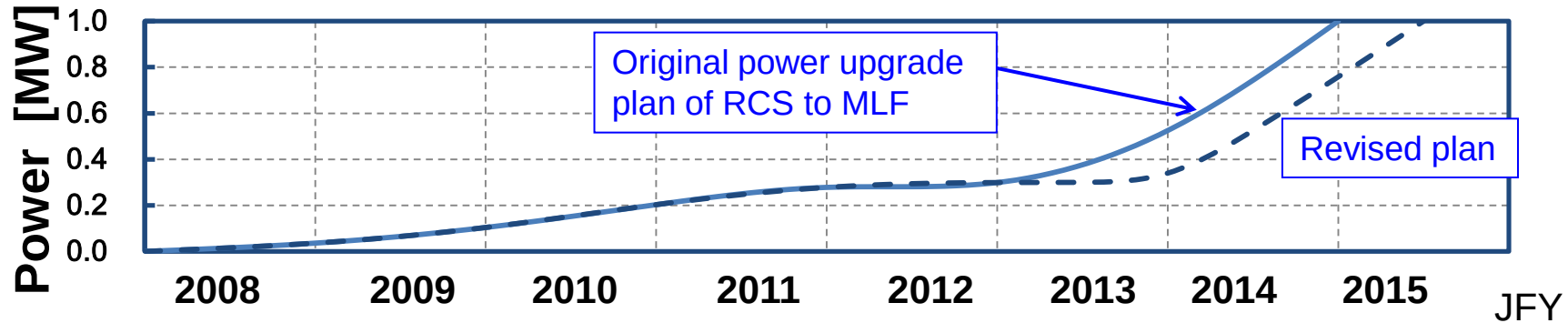


556 kW operation was successfully demonstrated in Apr. 2013.

しかし、RCS 2 MWの実現には、イオン源100 mAのR&Dが課題

Power upgrade for Linac & RCS

We revise the power-up curve after the earthquake: shifted 6 months.



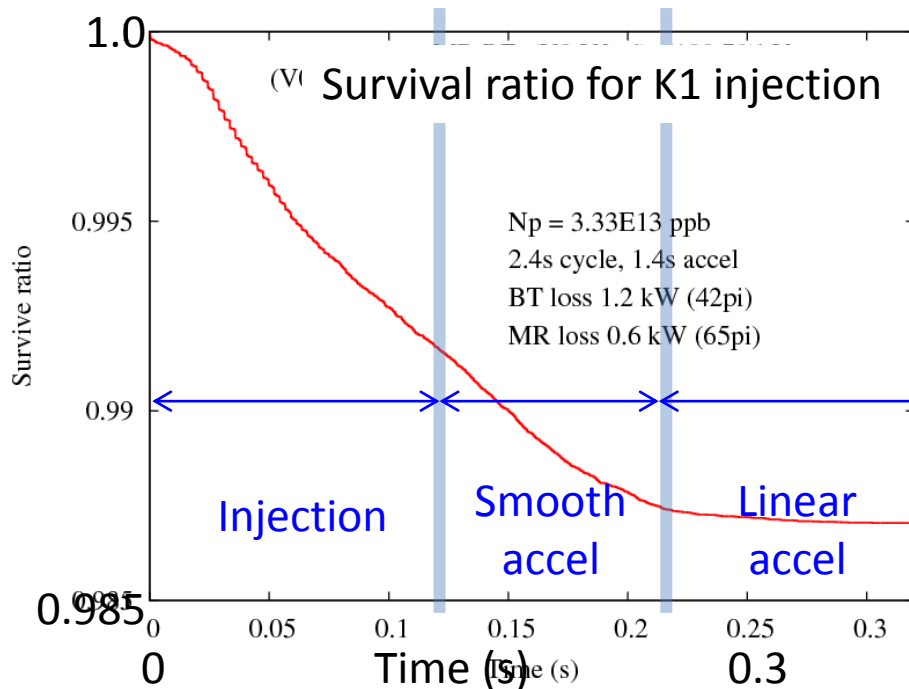
Mid-term plan of MR

FX: We adopt the high repetition rate scheme to achieve the design beam intensity, 750 kW.
Rep. rate will be increased from ~ 0.4 Hz to ~1 Hz by replacing magnet PS's and RF cavities.

JFY	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
			Li. upgrade				
FX power [kW]	150	200	240	~ 400	→ 750		
Cycle time of main magnet PS New magnet PS for high rep.	3.04 s	2.56 s	2.48 s	2.40 s	Manufacture installation/test		1.3 s
Present RF system New high gradient rf system	Install. #7,8	Install. #9	R&D	Manufacture installation/test		→	
Ring collimators	Additional shields	Add.collimators and shields (2kW)	Add.collimators (3.5kW)				
Injection system FX system	New injection kicker	Kicker PS improvement, Septum 2 manufacture /test		→			
		LF septum, PS for HF septa manufacture /test		→			

現行電源での可能性

各種技術的課題をクリアすることが前提



2.6E14ppp, 2.4s cycle,
1.4s accel, 0.88s decel
BT 1.2 kW loss (42pi cut),
MR 525 kW (65pi cut)
MR 0.49 kW loss

Fundamental RF: 100 kV → 240 kV
2nd harmonic RF: 70 kV

RCS conditions: 800kW, full errors, 400 MeV 100pi painted injection

MR conditions:

Bunching factor ~0.2 at injection

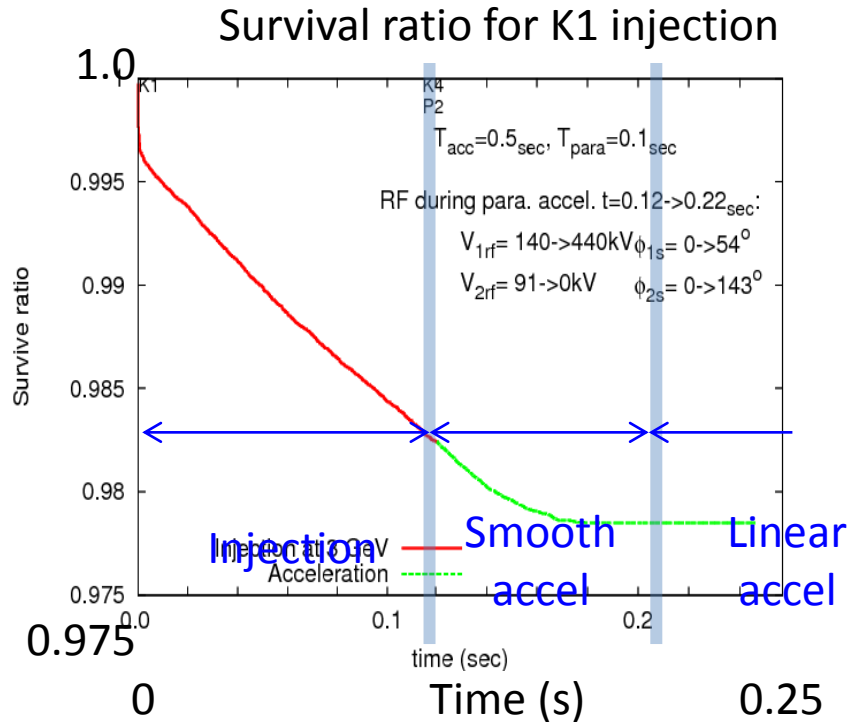
65pi cut, Alignment errors, measured multipole,
Sum resonance corrected (we have Skew Qs)

Chromaticity fully corrected, No instabilities

MR total loss is acceptable
for maintenance.

新電源 (1.3 s cycle) でのシナリオ

加速時間短縮に応じた各種upgrade + commissioningが前提



2.0E14ppp

1.3s cycle, 0.5s accel

BT 1.3 kW loss (60 pi cut),

MR 727kW (65pi cut)

MR 1.11 kW loss

Fundamental RF: 140 $\rightarrow$ 440 kV

2nd harmonic RF: 91 $\rightarrow$ 0 kV

During accel. $\Phi_{2s} > 0$

RCS conditions: 600kW, full errors, 400 MeV centered

MR conditions:

Bunching factor ~ 0.3 at injection

65pi cut, Alignment errors, measured multipole,

Sum resonance corrected (we have Skew Qs)

Chromaticity fully corrected, No instabilities

MR total loss is acceptable
for collimator capacity.

しかし、放射化測定を通じ
ロス量の慎重な操作が必要

Long-term plan for FX operation 2018 ~

Multi-MW proton driver :

K. Hara, H. Harada, H. Hotchi, S. Igarashi, M. Ikegami,
F. Naito, Y. Sato, M. Yamamoto, T. Koseki

Scenarios for Multi-MW output beam power for neutrino experiment are being discussed .

1. Large aperture MR

Enlarging the physical aperture from 81 to $> 120 \pi \text{mm.mrad}$

A new synchrotron in the MR tunnel

2. Second booster ring for the MR (emittance damping ring)

The BR with an extraction energy $\sim 8 \text{ GeV}$, between the RCS and the MR

3. New proton linac for neutrino beam production

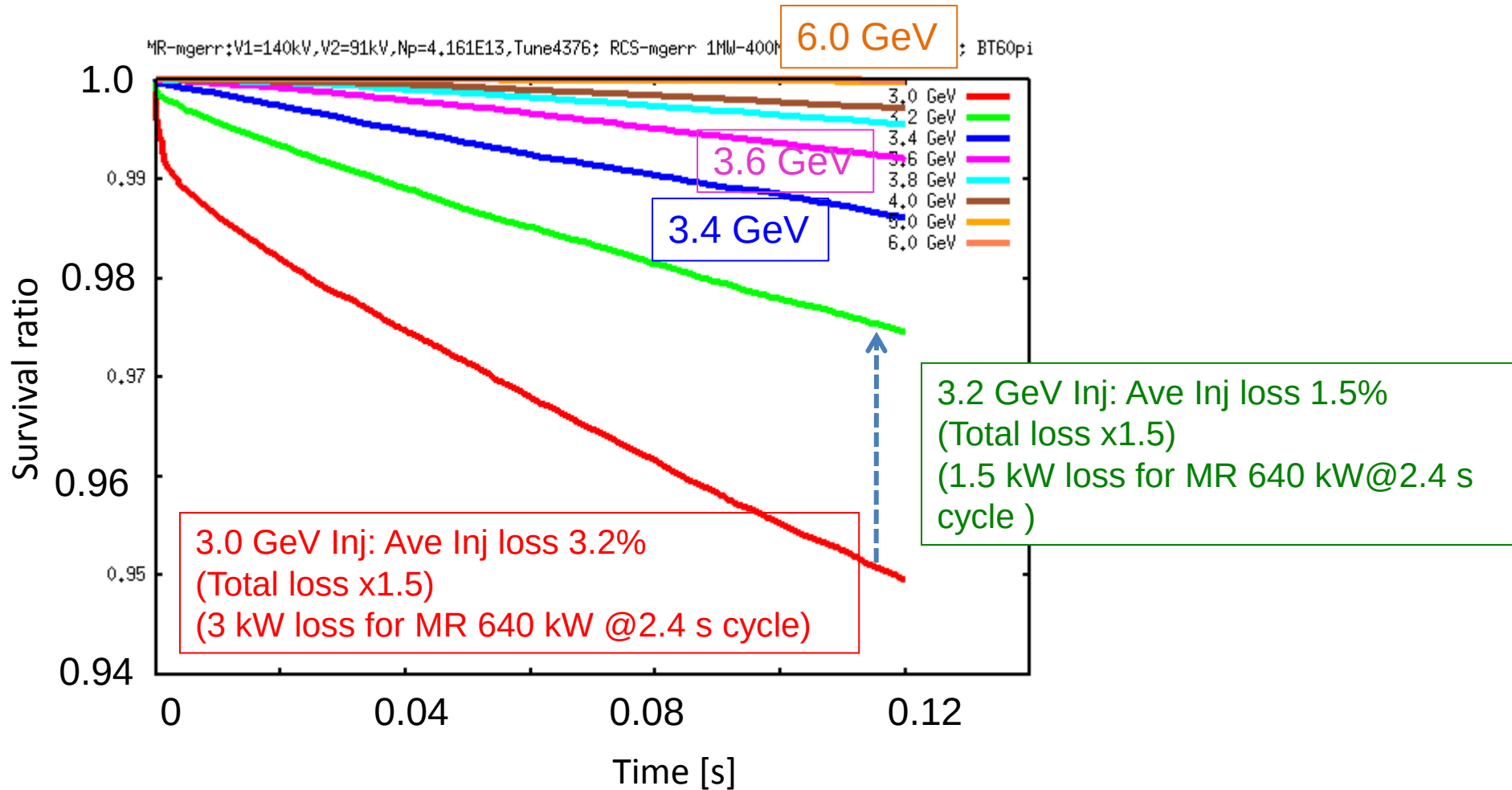
- Linac with an beam energy $> 9 \text{ GeV}$

- The MR is operated only for the SX users

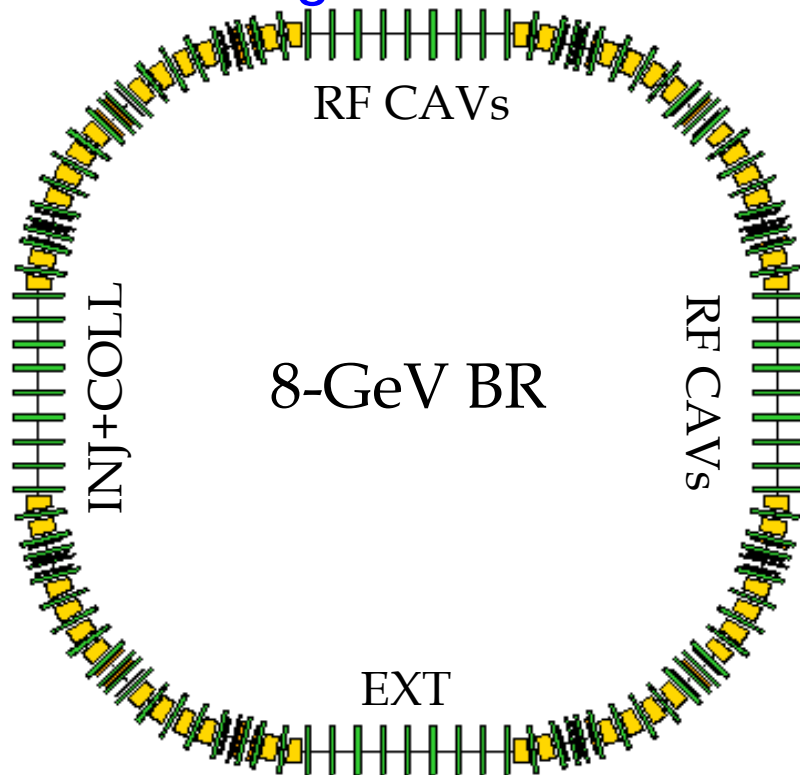
....

Injection energy and beam loss in the MR

Simulation of beam survival in the injection period of the MR
for the RCS 1MW eq. beam ($4e13$ ppb)



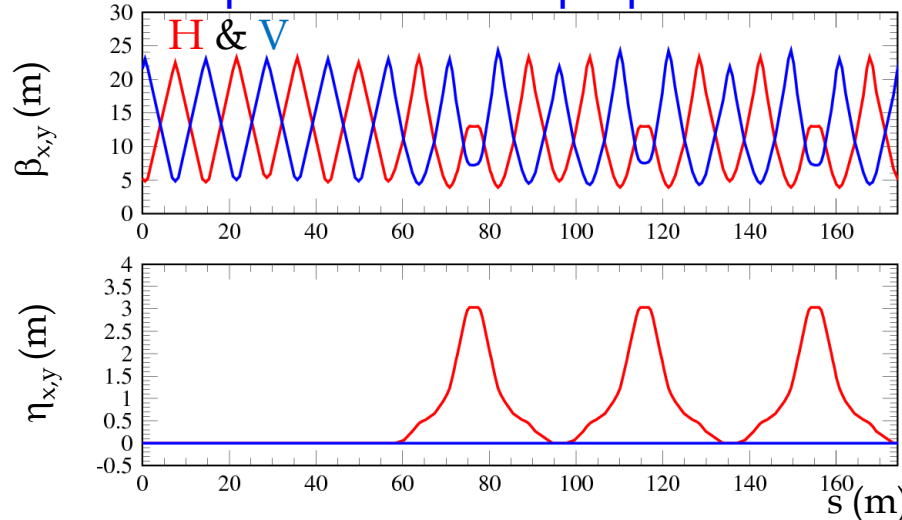
Design of the 8-GeV BR : Lattice & parameters



Parameters of the RCS and 8 GeV BR

	3-GeV RCS	8-GeV BR
Circumference	348.333 m	696.666 m
Super-periodicity	3	4
Injection energy	400 MeV	3 GeV
Extraction energy	3 GeV	8 GeV
Repetition	25 Hz	25 Hz
Ramping pattern	Sinusoidal	Sinusoidal
Transition energy	9 GeV	15 GeV
Harmonic number	2	4
Number of bunches	2	2
Momentum acceptance	$\pm 1\%$	$\pm 1\%$
Ring acceptance	486 π mm mrad	189 π mm mrad
Collimator aperture	324 π mm mrad	126 π mm mrad

Beta & Dispersion for 1-superperiod



Design of the 8-GeV BR : Simulation results (2)

RCS intensity (MW)	$\epsilon_{x99.8\%}/\epsilon_{y99.8\%}$ at 14.2 ms (π mm mrad)	$\epsilon_{x99.8\%}/\epsilon_{y99.8\%}$ at 20 ms (π mm mrad)	MR beam power (MW) assuming 1-s cycle
1.0	35.0/36.5	31.1/32.5	1.6
1.2	39.9/42.4	35.4/37.7	1.9
1.4	44.1/47.2	39.2/42.0	2.2
1.6	49.4/54.0	44.0/48.0	2.6
1.8	55.0/60.1	48.9/53.4	2.9
2.0	57.9/62.4	51.5/55.5	3.2

8-50BT & MR collimators : $54-60\pi$ mm.mrad

$h=9$, bunch=8 $\rightarrow$ $h=18$, bunch=16

入射時間120ms $\rightarrow$ 280ms (1s cycle $\rightarrow$ 1.16s cycle) $\Rightarrow$ Power $\times 1.72$

Beam loss @ 8-50 BT collimator

0.2% particle loss $\Rightarrow$ 1.71 kW if assuming 3.2 MW from MR

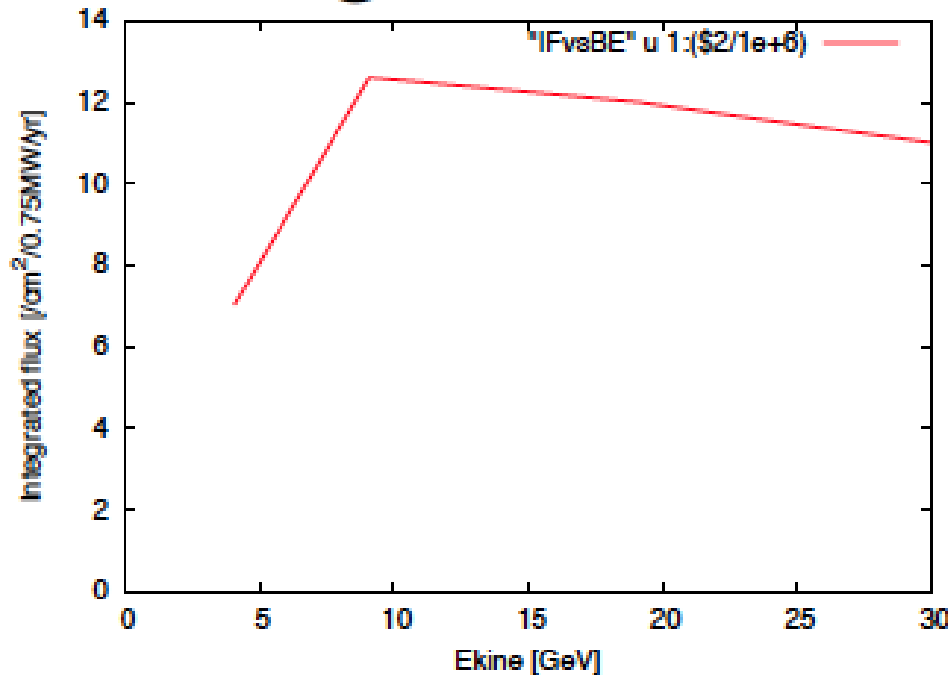
Loss capacity of the 8-50BT collimator: 2kW (as same as the 3-50BT collimator)



3. New proton linac for neutrino beam production

- Linac with an beam energy > 9 GeV
- The MR is operated only for the SX users

Integrated flux



太田良介氏

ニュートリノフラックスの陽子ビーム依存性
MR大強度化検討会(2012.7.31)

この場合、サイトがJ-PARCである必要はない。
つくばの可能性は？

Proton driver in the KEKB tunnel

KEKB tunnel:

Circumference ~ 3 km

LS section $200\text{ m} \times 4$

Proton linac:

$E = 9\text{ GeV}$

- 509 MHz, 5 cell (TRINSTAN)

$E_0 = 10\text{ MV/m}$

Real estate grad. $\sim 3.2\text{ MeV/m}$

900台以上の空洞

アークに空洞?、2周以上?

- 1.3 GHz, 9 cell (ILC)

$E_0 = 37.5\text{ MV/m}$

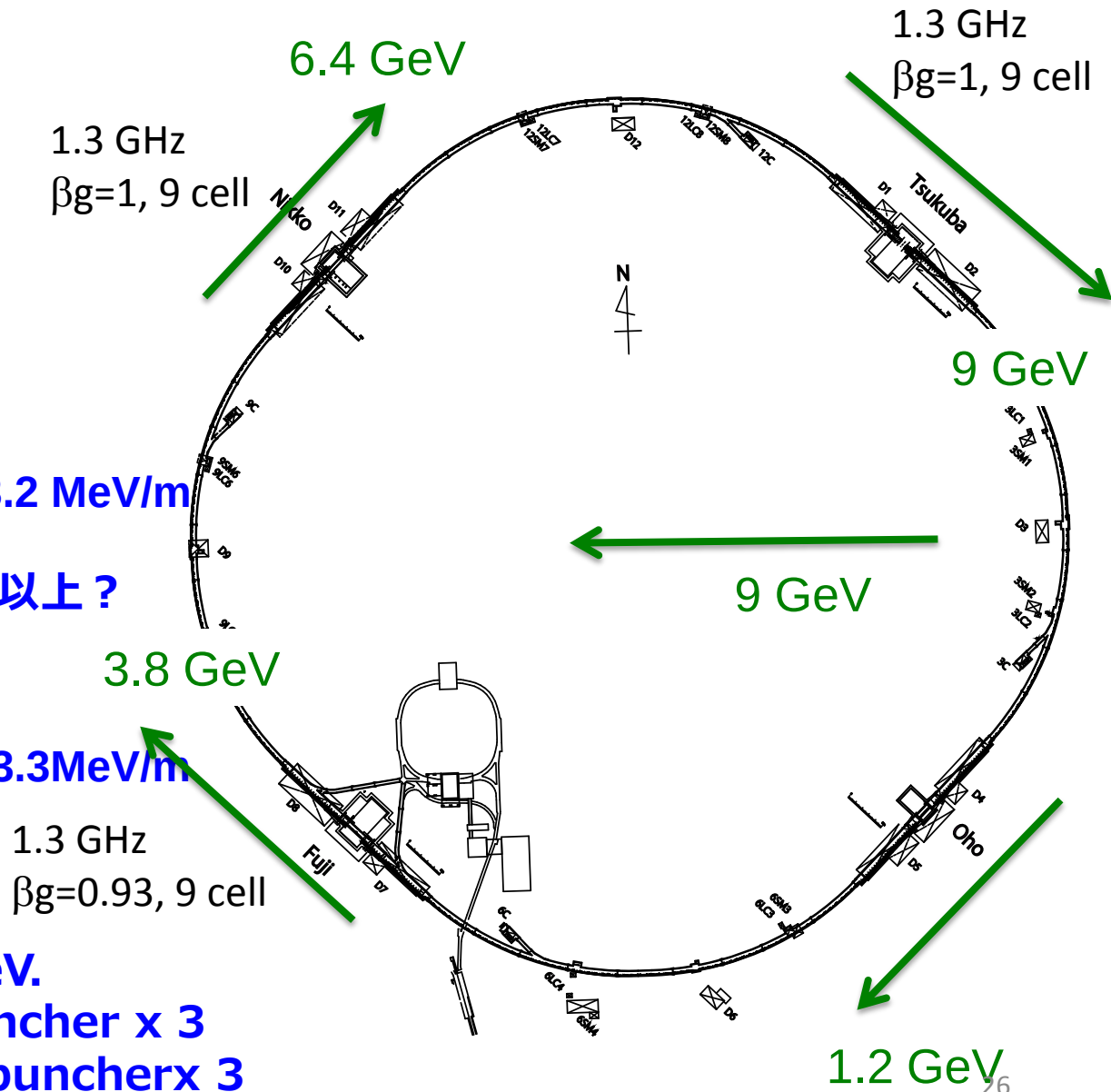
Real estate grad. 13.3 MeV/m

最初の直線部で $1 \sim 1.2\text{ GeV}$.

その後、3つの直線部で 9 GeV .

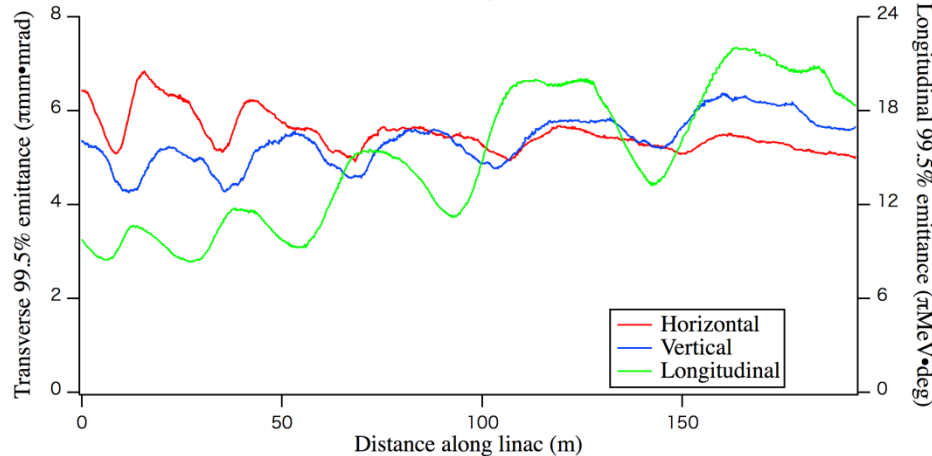
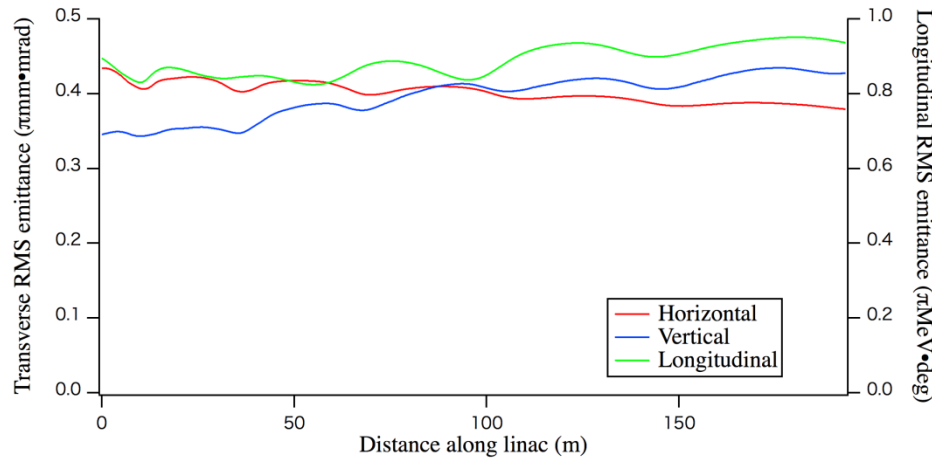
第1アークに 650 MHz rebuncher $\times 3$

第2、3アークに 1.3 GHz rebuncher $\times 3$



第1アーク後の再加速

$\beta_g=0.93$ section (1.2 $\rightarrow$ 3.8 GeV)



3台のrebuncher を置けば、ビームは最初のアークを越え、 $\beta_g=0.93$ 部を問題なく通る。

KEKBトンネルを用いた9 GeV proton driver は可能と思われる。
ビーム強度はduty との兼ね合い(特にlow β 部)で決まる。
CWでよければ、9 GeV $\times$ 1mA= 9 MW .

まとめ

利用運転の状況

- MLF : 300 kW (ハイパワー試験では556 kW)
- NU : 240 kW

5年の計画: (2013 - 2017)

- 2013年運転停止期間中にリニアックを400 MeVに増強する。
- 2014年運転停止期間中にリニアックを50 mAに増強する。
- 2015年度中にRCS 1MWを目指す (one shot)
- MR-FX : 高繰り返し化によって2017年度中に750 kWを目指す。

高繰り返し電源、高勾配空洞、入出射の増強、コリメータの増強が必要。ダクトのチタン化を実施。

長期計画 (2018 -)

マルチMWビームの検討

- 8 GeV ブースター案 : Linac 100 mA, RCS 2 MW eq. → MR 3.2 MW(h=8) - 5.5 MW(h=18)
100 mAイオン源、入射Kicker のR&Dが重要。
- 9 GeV リニアック案 : KEKBのトンネルを使って ~ 9 MW(cw)。2022年以降？

次世代の加速器ニュートリノ実験 ワークショップ の御案内

第一回 平成26年2月5日(金) 10:00-16:00 @KEK東海キャンパス

第二回 (仮) 平成26年3中旬、第三回以降も開催予定

新アイデア紹介、講演希望は世話人まで

世話人: 小林隆, 小関忠, 佐藤洋一, 中平武(KEK), 中家剛(京都大), 横山将志(東京大)

次世代の加速器ニュートリノ実験ワークショップ

近年、J-PARC T2K実験、原子炉ニュートリノ実験の最新結果が相次いで報告されました。これらの結果は、三世代の混合角の最後のひとつを決定し、さらにレプトンのCP対称性の破れを測定する可能性を開いた、ニュートリノ物理の大きなブレークスルーといえます。これにより、高エネルギー物理学将来計画検討小委員会の答申(*1)に挙げられたニュートリノのCPの破れの測定を目指す条件がととのい、KEKロードマップ(*2)にあるとおり、次世代の加速器ニュートリノ研究の戦略の検討を進めていく時期に至っています。

そこで、より大強度(>1MW)のビームの実現にむけた加速器増強やニュートリノビーム生成・ニュートリノ測定器の高性能化の可能性と、そのビームを使った次世代ニュートリノ研究のさまざまな可能性、アイデアを出し合い議論する研究会のシリーズを始めたいと思います。ここの議論の中から、日本における加速器ニュートリノ実験の新たな将来像を生み出すことを目指したいと考えています。

ニュートリノ物理に興味をお持ちの方はもちろん、大強度陽子加速器・大強度二次ビーム生成にたずさわっておられる加速器やビーム物理の研究者の方々など、多くの方の参加をお待ちしております。新しいアイデアをお持ちの方の参加は大歓迎ですので、講演の希望などあれば世話人までご連絡ください。

場所: KEK東海キャンパス

日時: 第一回 平成26年2月5日(金) 10:00-16:00
第二回 平成26年3中旬(予定)
第三回以降も開催予定

第一回、第二回でカバーする予定のアジェンダ

- ニュートリノ物理の現状と、大強度ビームによる将来展望
- J-PARC加速器の750kWに向けた取り組みとNUビームラインの基本性能
- 日本のニュートリノ実験の将来計画と、欧米の将来計画のレビュー
- マルチMWを実現する陽子加速器とニュートリノビームラインの構想
- マルチMWでのニュートリノ実験のシナリオ
- ニュートリノ検出器の性能向上によるニュートリノ実験の高精度化
- その他新しい実験のアイデア

世話人: 小林隆, 小関忠, 佐藤洋一, 中平武(KEK) 中家剛(京都大), 横山将志(東京大)

(備考) 科研費(新学術領域研究「ニュートリノフロンティアの融合と進化」における計画研究A01「加速器ニュートリノビームによるニュートリノフロンティアの展開」)より旅費の補助が可能です。ただし予算はかぎられていますので、旅費の補助を希望される方は1月10日(金)までに世話人に連絡して下さい。

(*1) <http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/hecsubic/>

(*2) <http://www.kek.jp/ja/About/OrganizationOverview/Assessment/Roadmap/>