

加速器整備について

資料3
科学技術・学術審議会
大強度陽子加速器施設評価作業部会
(第3回)平成24年4月24日



大強度陽子加速器施設評価作業部会
平成24年4月24日

加速器ディビジョン 長谷川和男

内容

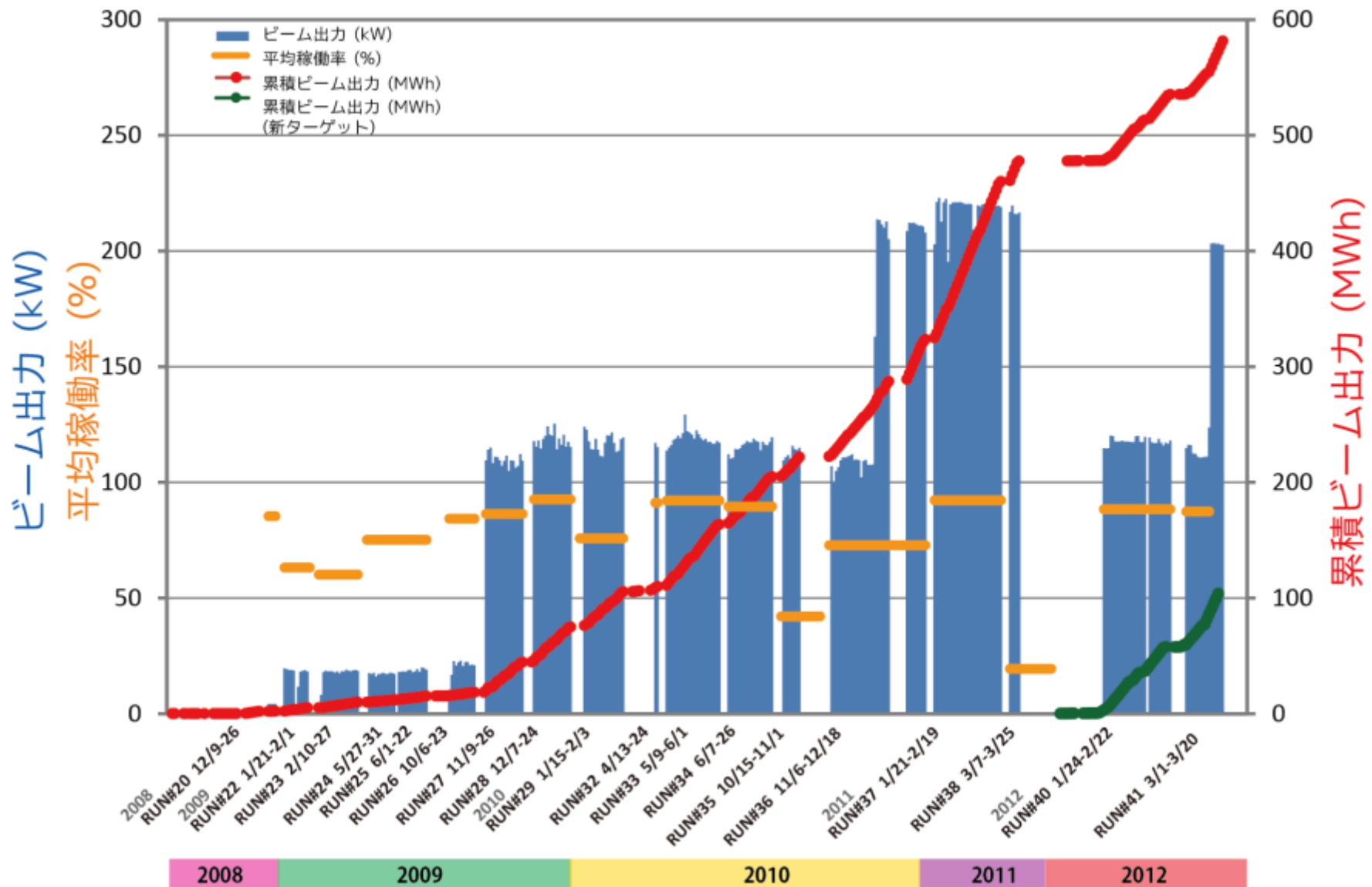
- ・ 運転開始後のマイルストーン
- ・ 運転実績(ビームパワー、運転時間)
- ・ 運転後の課題、改良点
- ・ 加速器の性能向上

運転開始後の主なマイルストーン



施設	調整開始	定格エネルギー達成	大強度試験	利用運転時の ビームパワー
Linac	2006年 11月	2007年1月 (181MeV)	<ul style="list-style-type: none"> 20mA-0.5ms-25Hz (RCS 420kW用) 27mA-0.1ms-2.5Hz 	<ul style="list-style-type: none"> 15mA-0.4ms-25Hz (13.3kW:RCS220kW用) 15mA-0.5ms-0.4Hz (MR行き用)
RCS	2007年 9月	2007年10月 (3GeV)	<ul style="list-style-type: none"> 420kW 	<ul style="list-style-type: none"> 220kW(MLF,25Hz) 300kW相当 (MR,0.4Hz)
MLF	2008年 5月		<ul style="list-style-type: none"> 420kW 	<ul style="list-style-type: none"> 220kW
MR	2008年 5月	2008年12月 (30GeV)	<ul style="list-style-type: none"> 200kW(FX) 10kW(SX) 	<ul style="list-style-type: none"> 160-190kW(NU行き) 3.3kW(HD行き)
NU	2009年 4月		<ul style="list-style-type: none"> 200kW 	<ul style="list-style-type: none"> 160-190kW
HD	2009年 12月		<ul style="list-style-type: none"> 10kW 5kW(運転時検査) 	<ul style="list-style-type: none"> 3.3kW

MLFのビーム出力

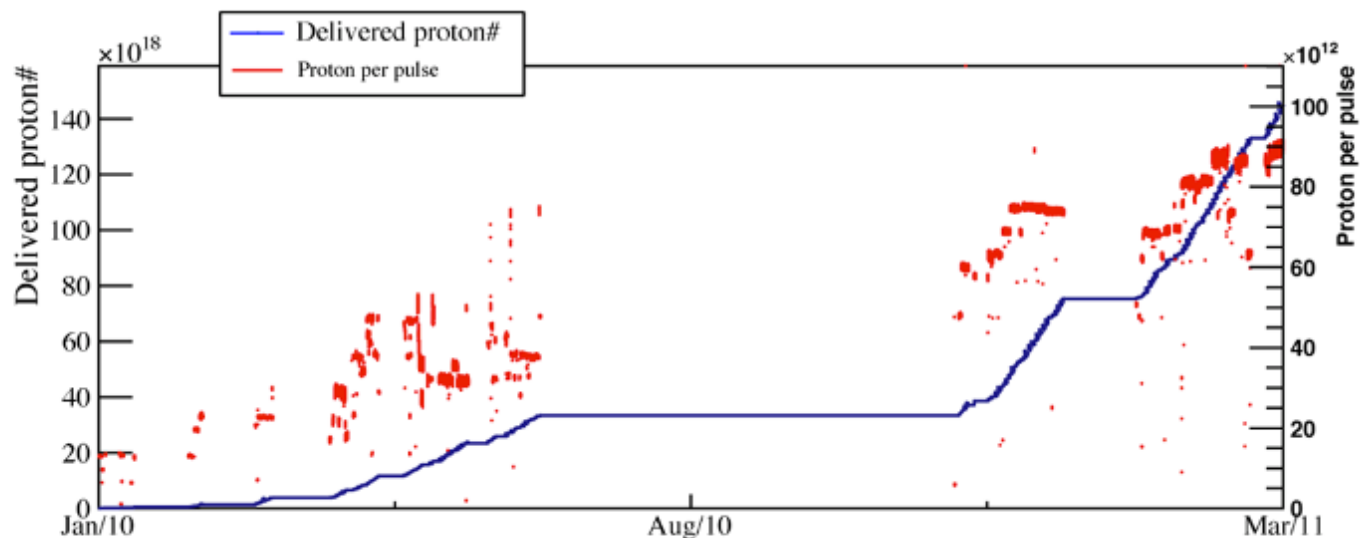


MLFのビーム出力と積算ビームパワー

MRの運転状況: 速い取り出し



・速い取り出しの利用運転 (T2Kの物理RUN) 開始: 2010年1月



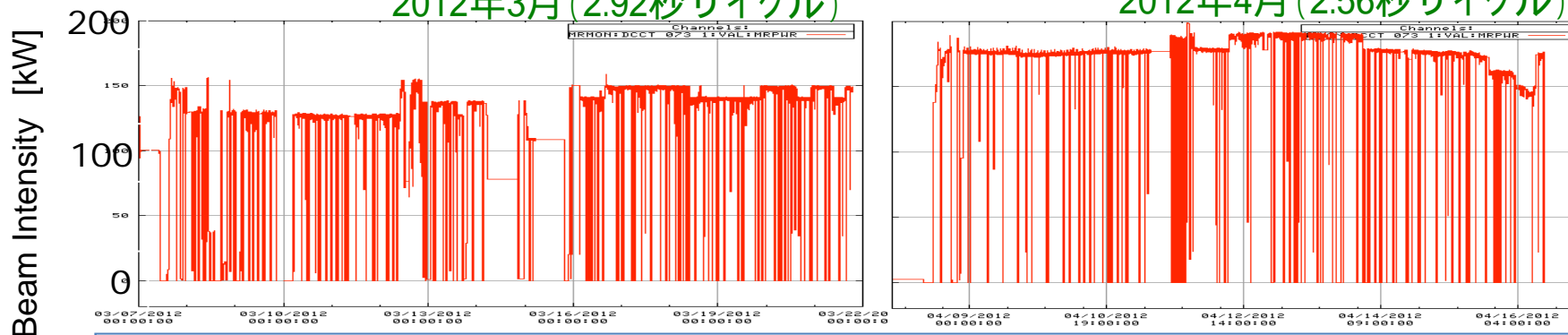
早い取り出しでの累積陽子数とパルス当たりの陽子数の履歴

2011年3月11日朝までに供給された陽子数: 1.4×10^{20} POT

・震災後の運転 (2012年3月と4月のビーム強度)

2012年3月 (2.92秒サイクル)

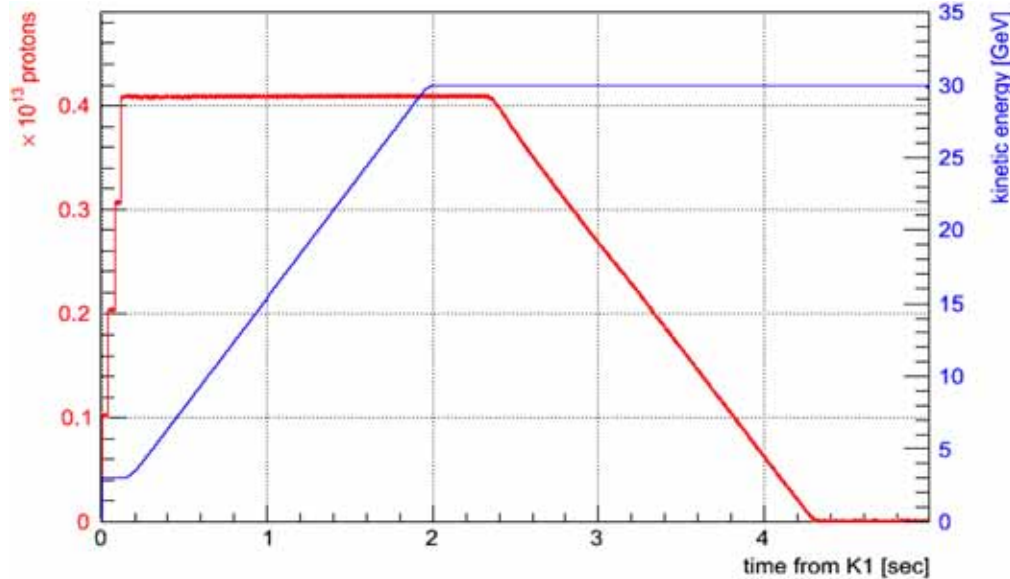
2012年4月 (2.56秒サイクル)



1パルス当たりの陽子数は $0.9 \sim 1 \times 10^{14}$ 個 (世界最高)、ビーム強度は最大190 kWを達成

MRの運転状況: 遅い取り出し

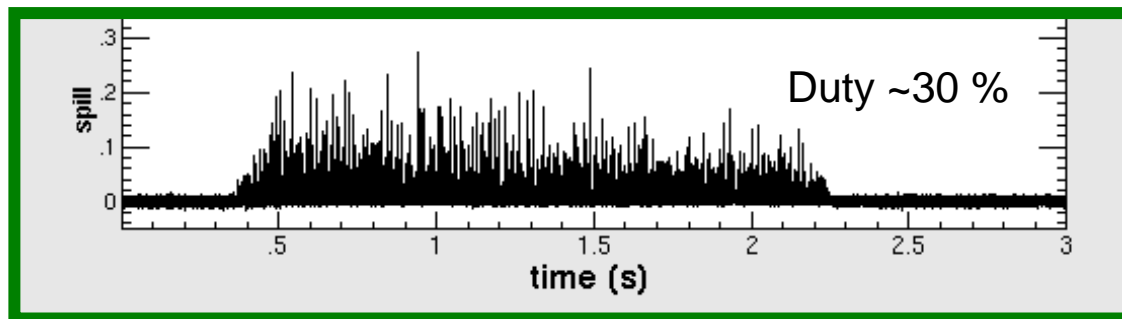
ダイナミックバンプ(取り出し中にロスを最小にするようバンプ軌道をフィードバック制御)を用いて、**取り出し効率99.5 %を達成(世界最高の効率)**。



MR内の陽子数(赤)とエネルギー(青)の時間変化

達成されたビーム強度

- 24時間連続: 3.3 kW
- 放射線遮蔽の施設検査: 5 kW
- 加速器スタディ: 10 kW



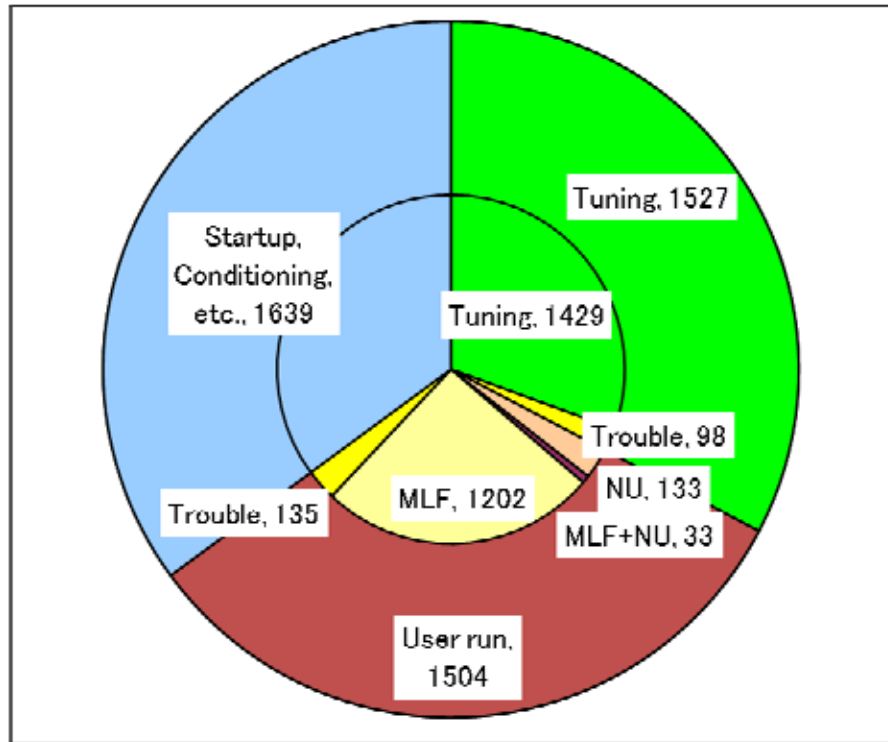
MRからの取り出しビームの時間構造

(スパイク構造が全くなく、取り出し中の時間変動がない構造をDuty100%と呼ぶ)

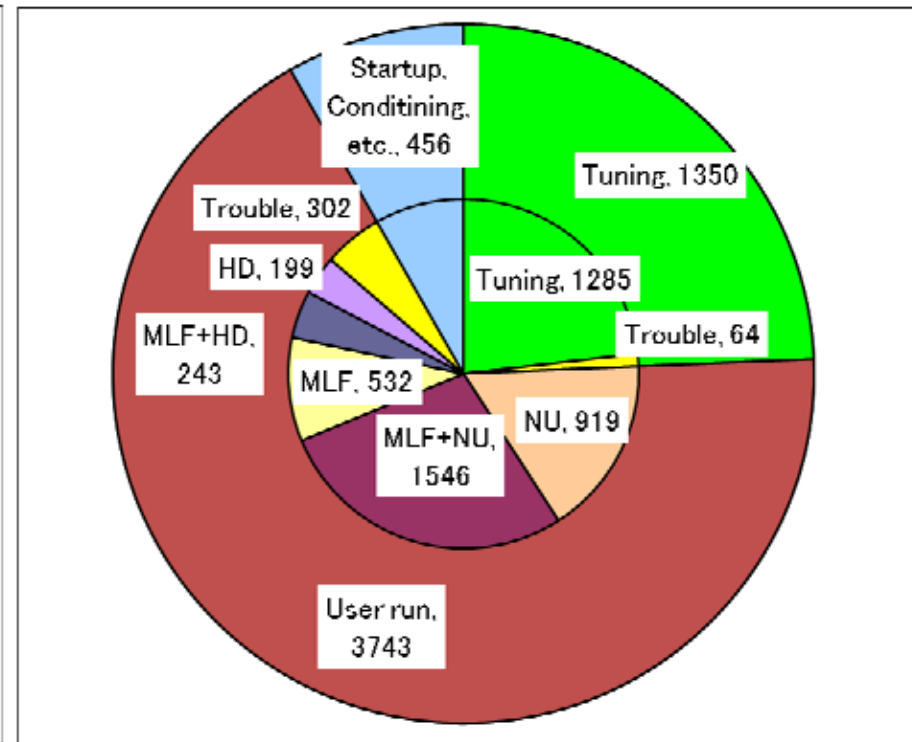
主電磁石電源の電流リプルに起因する**取り出しビームのスパイク構造が問題**となっている。

スピンフィードバックシステムと横方向高周波システムの導入で改善しているが、今後もさらにそれらを強化する必要がある。

運転実績

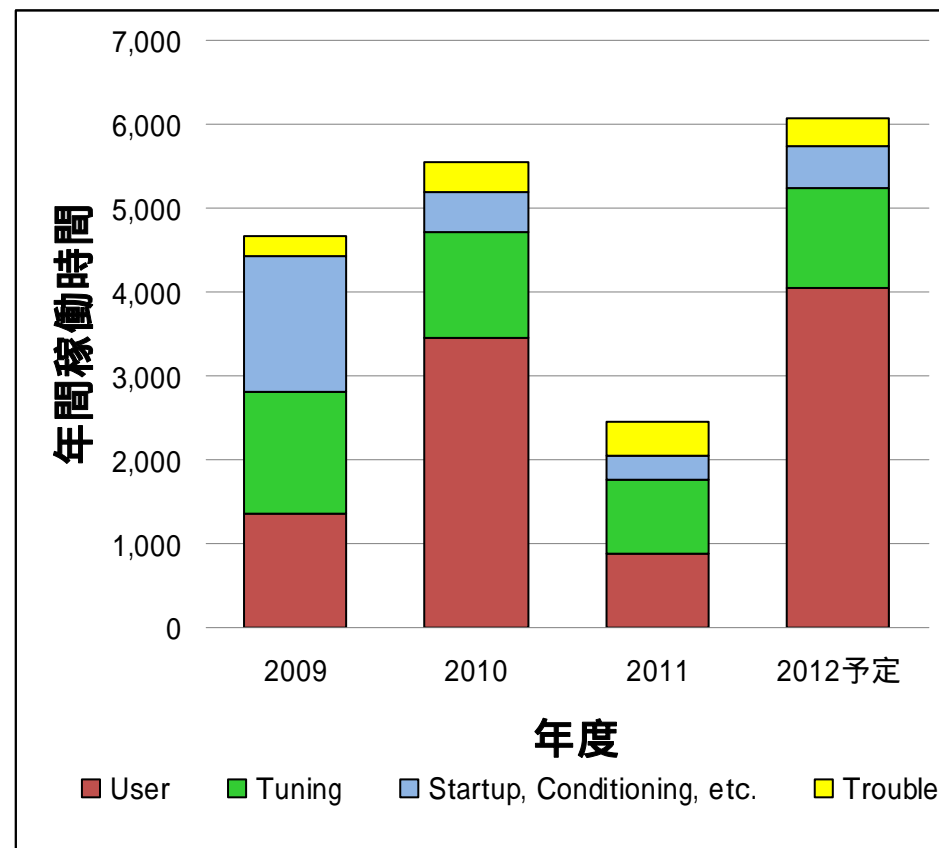
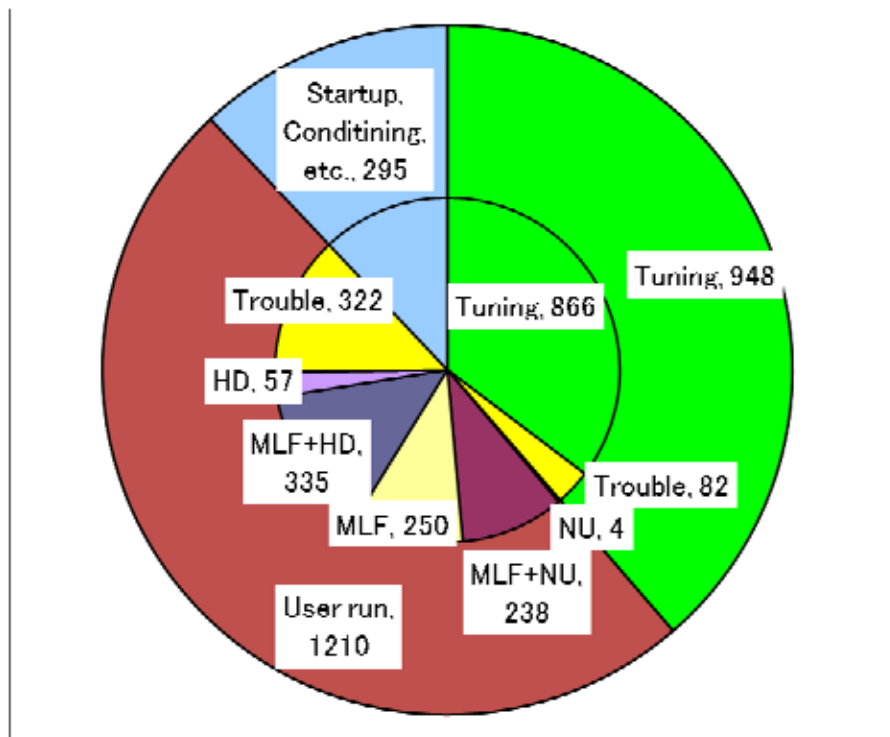


2009(H21)年度 4,672時間中の統計
 ユーザー供給 1,504時間
 内 トラブル 135時間 (9.0%)
 RFQ不調によるコンディショニング時間が長かった



2010(H22)年度 5,550時間中の統計
 ユーザー供給 3,743時間
 内 トラブル 302時間 (8.1%)

運転実績



2011(H23)年度 2,455時間中の統計
 ユーザー供給 1,210時間
 内 トラブル 322時間 (26.6%)

2012年3月22日4:10から3月31日24:00まで、ユーザー供給がクライストロン電源故障で停止と評価

年間稼働時間の推移

2011年度は震災により12月より再開
 2012年度は8サイクル運転、TuningとUser供給時間中、6%のトラブルを仮定

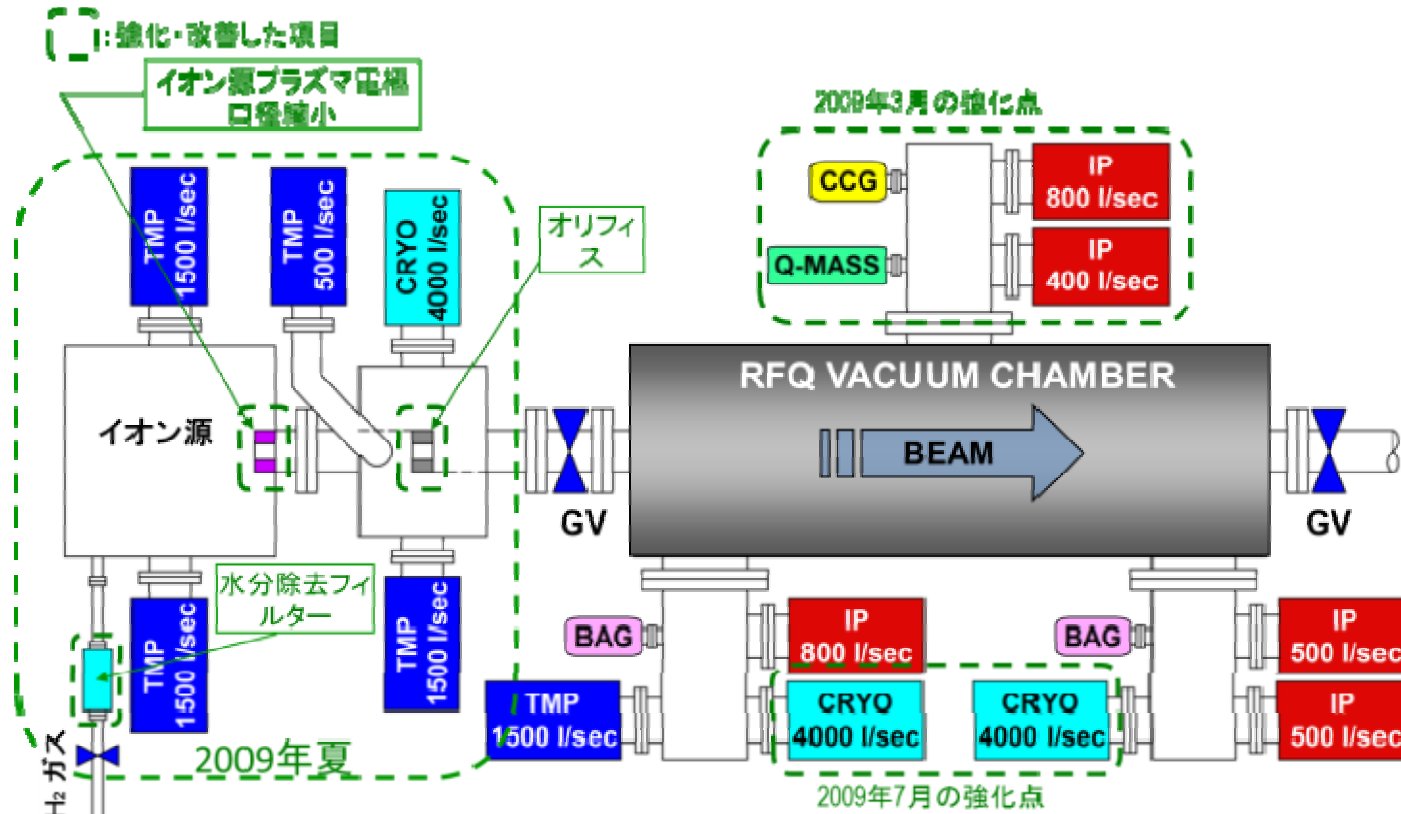
運転後の課題

- ◆ RFQの放電問題
- ◆ ビームロスの低減
- ◆ 運転時間・稼働率の向上

RFQの放電問題と対策



2008年秋, RFQの放電で連続運転が耐えられない問題が顕在化した
 これに伴い、RCS(MLF)のビームパワーも20kWに抑えられた
 2009年夏に真空システムの向上、その後のコンディショニング(高周波による電極表面の清浄化)により性能が徐々に回復し、現在に至る
 また、バックアップRFQの製作を行い、類似の事象に備えた



- ① 上流からのガス流入を抑制。
- ② 水成分除去フィルター追加。
- ③ 粗排気系のオイルフリー化

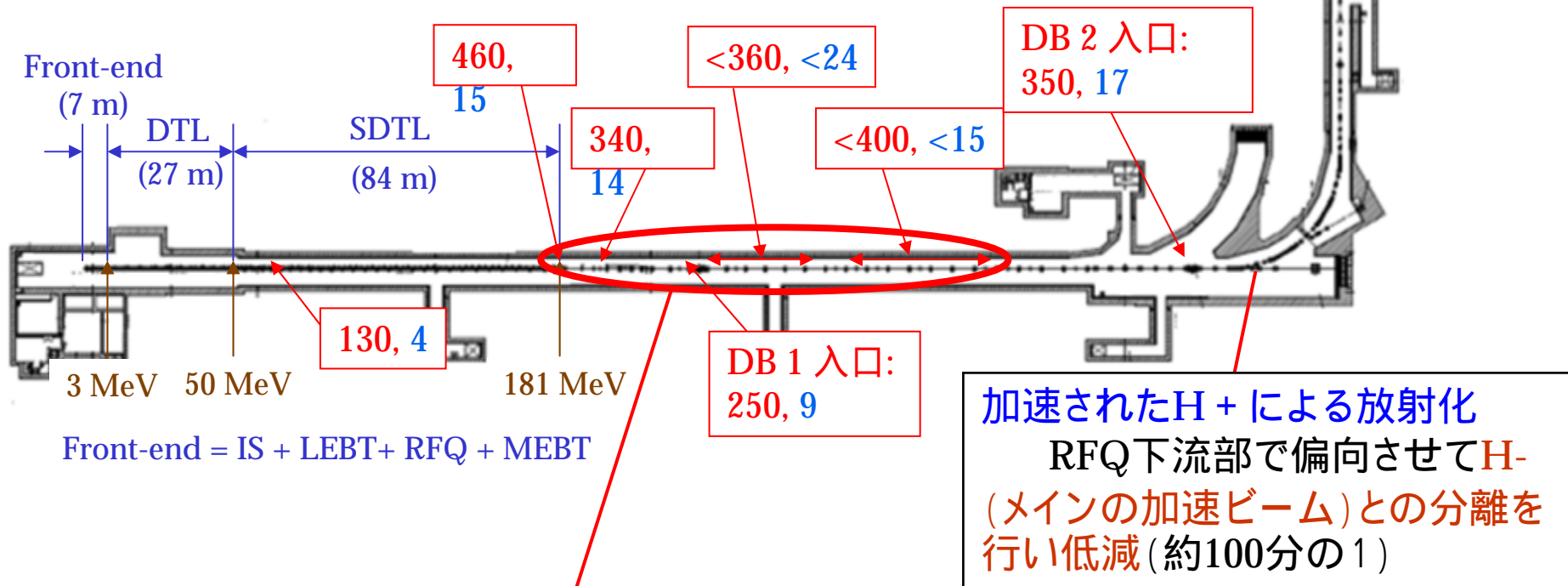
RFQ 排気量 [l/sec]: 3,300 ⇒ 12,500

イオン源排気量 [l/sec]: 6,000 ⇒ 9,000

リニアックでの残留放射線量



リニアックでの残留放射線量 (Feb. 10, 2011)
 - 220-kW@RCS (13kW@linac) ビーム運転停止 4時間後の測定
 赤: 表面線量、青: 表面から30cm位置での線量
 Unit: $\mu\text{Sv/h}$



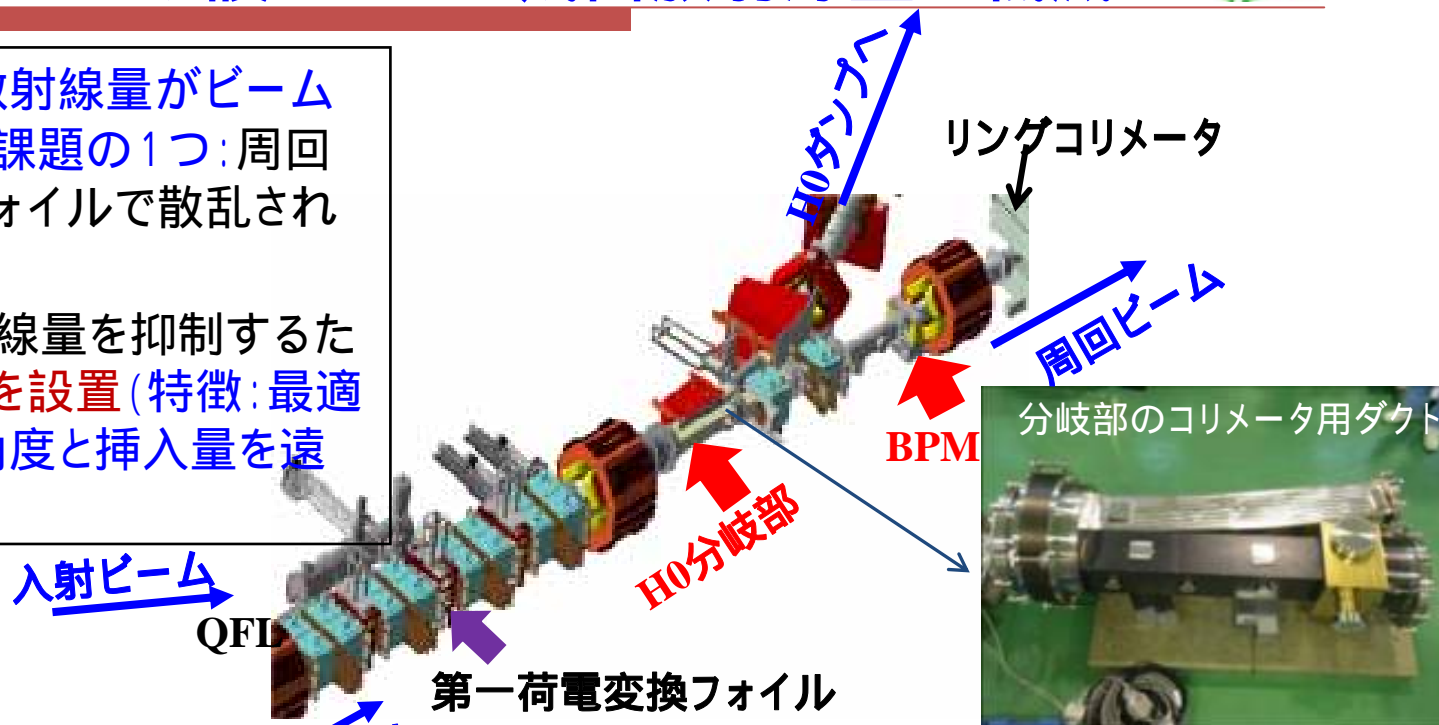
将来のエネルギー増強部分に広くロスが分布
 真空ポンプを追加設置してビームロスを低減(H-と残留ガスとの反応でロス)
 SDTL部やその下流部では効果無 更なる調査、改善の予定

RCS入射部コリメータ設置による残留放射線量の低減



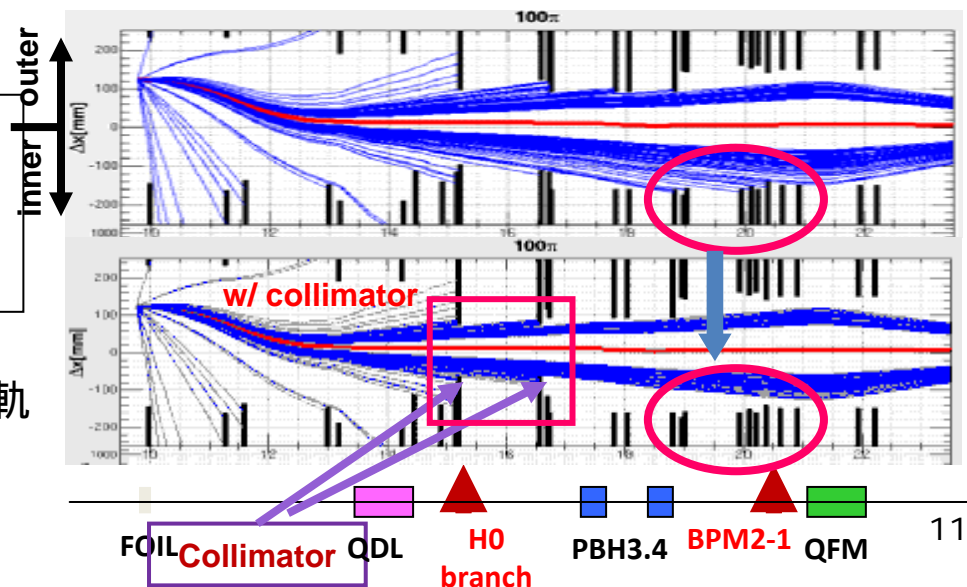
RCS入射部の残留放射線量がビームパワー向上の大きな課題の1つ: 周回ビームが荷電変換フォイルで散乱されることによる。

ロスを局在化し、線量を抑制するため、**新規にコリメータを設置** (特徴: 最適に調整できるように角度と挿入量を遠隔操作可能)



結果: 入射部の線量 (120kW換算時)
 2~3 0.2 mSv/h (約10分の1に低減)
 今後のビームパワー増強に有効

入射部コリメータの効果を評価するビーム軌道計算(上: コリメータ無、下: 有)
 コリメータを入れることで、BPM部にビームが当たらずロスが低減される

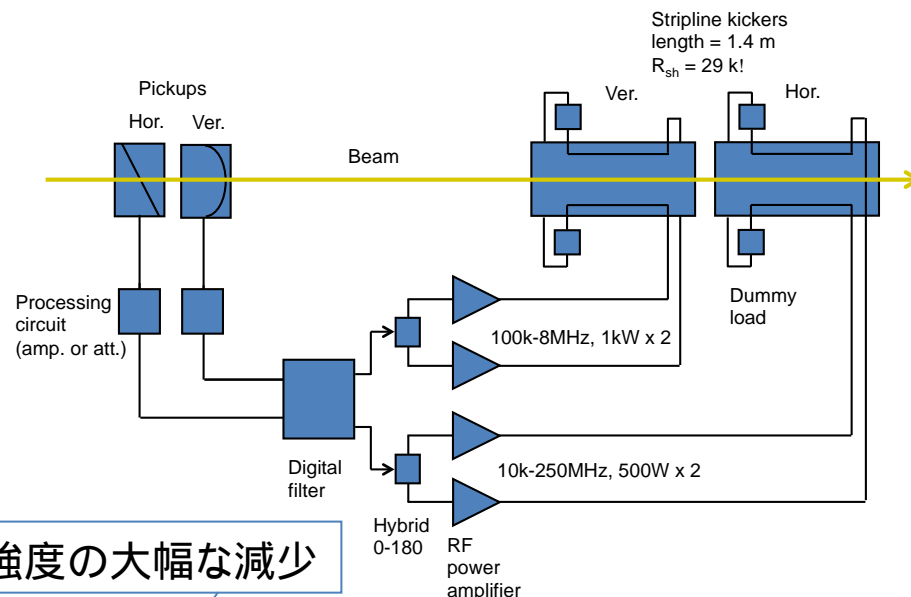


MRでのビームロス・線量の低減(1/2)

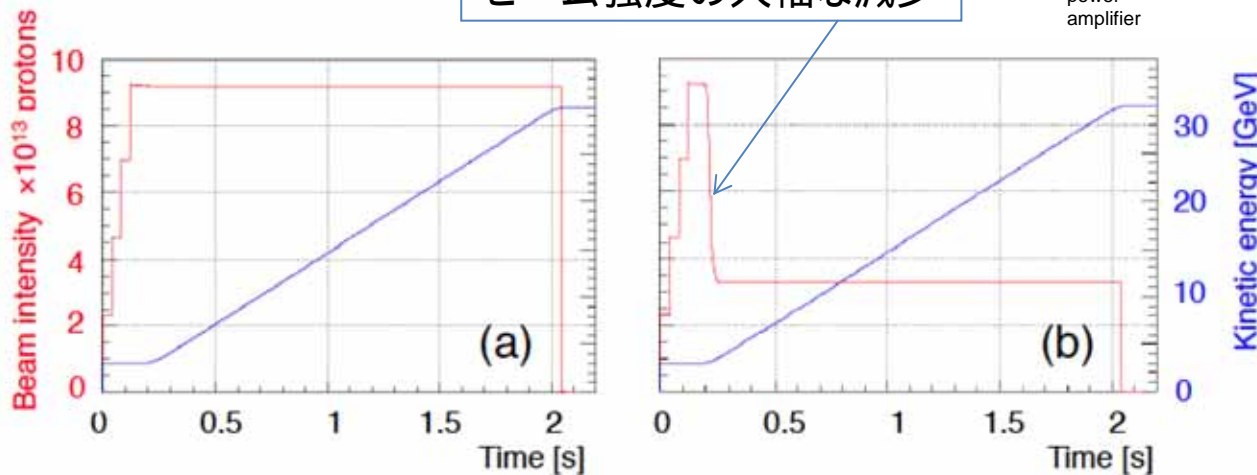


ビーム不安定性によるビーム損失を避けるためにバンチ毎フィードバックシステムを導入

MRの中には8個のバンチ(陽子の塊)が周回しているが、バンチ1個1個の振動をピックアップで検出し、個々のバンチに対して補正を行うシステム



ビーム強度の大幅な減少

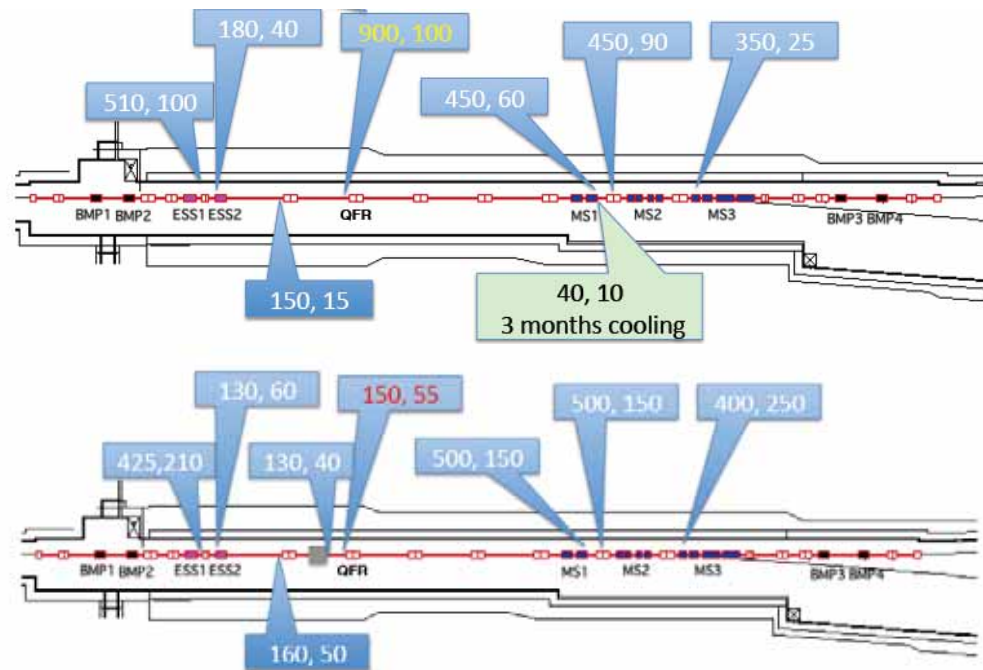


MR中の陽子数(赤)とエネルギー(青)の時間変化:(a)バンチ毎フィードバックシステム有り、(b)無し
フィードバックが無い場合、不安定性によるビーム強度の大幅な減少(損失)が認められる

MR でのビームロス・線量の低減 (2/2)



静電セプタムからの散乱による下流の電磁石の残留放射能レベルが遅い取り出しの
パワーを制限する1つの要因であり、低減するためにコリメータを設置



コリメータ設置前(上)と後(下)の残留放射線量
900 μ Sv/hが150 μ Sv/hと、約6分の1に低減

その他、コリメータの容量増強(450 W 2 kW)、一部のダクトのチタン化等が進行中

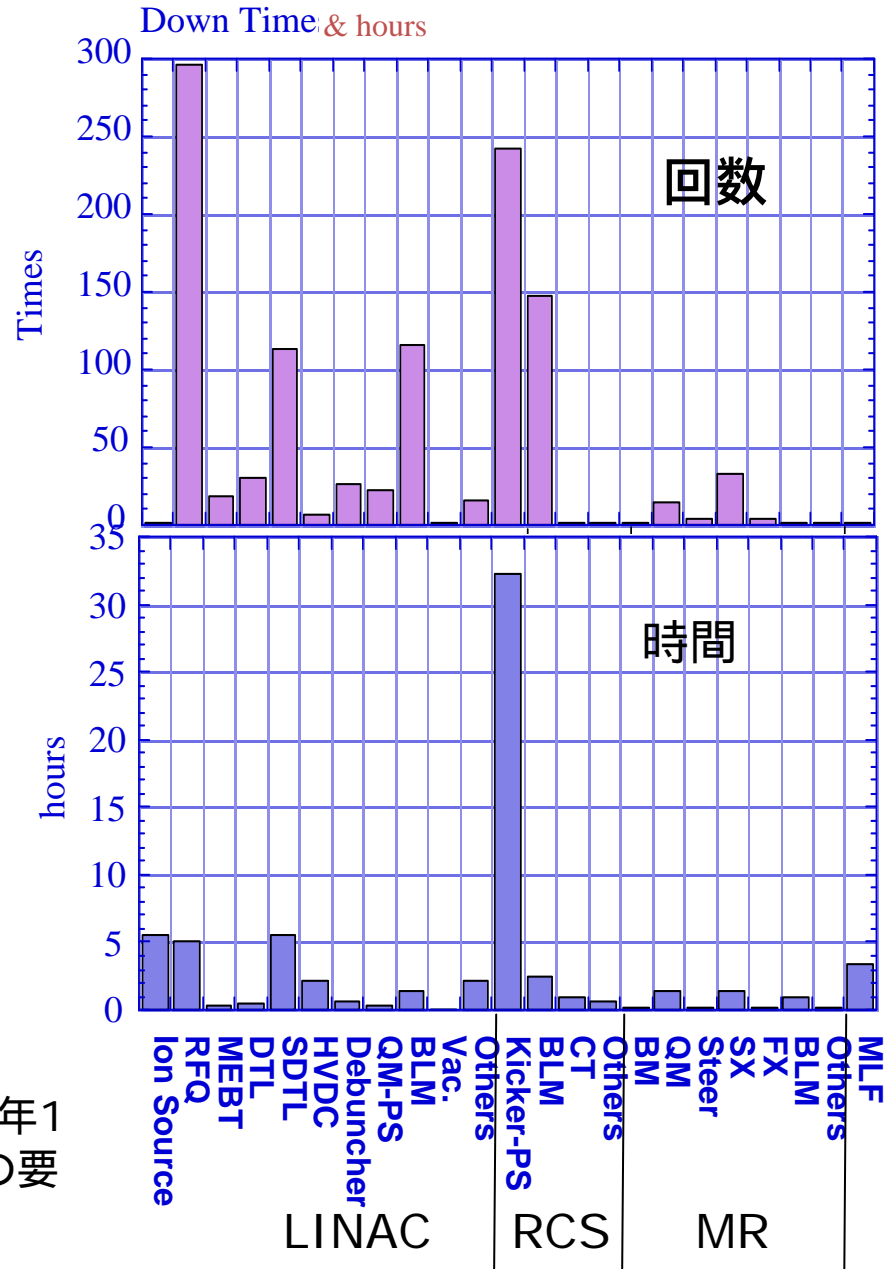
運転時間・稼働率向上への努力



運転時間や稼働率向上への努力を継続的に実施

- 稼働率向上の例: RCSキッカのビーム停止要因の改善(2009年末)
- 運転時間向上の例: イオン源連続運転時間の向上と交換時間の短縮

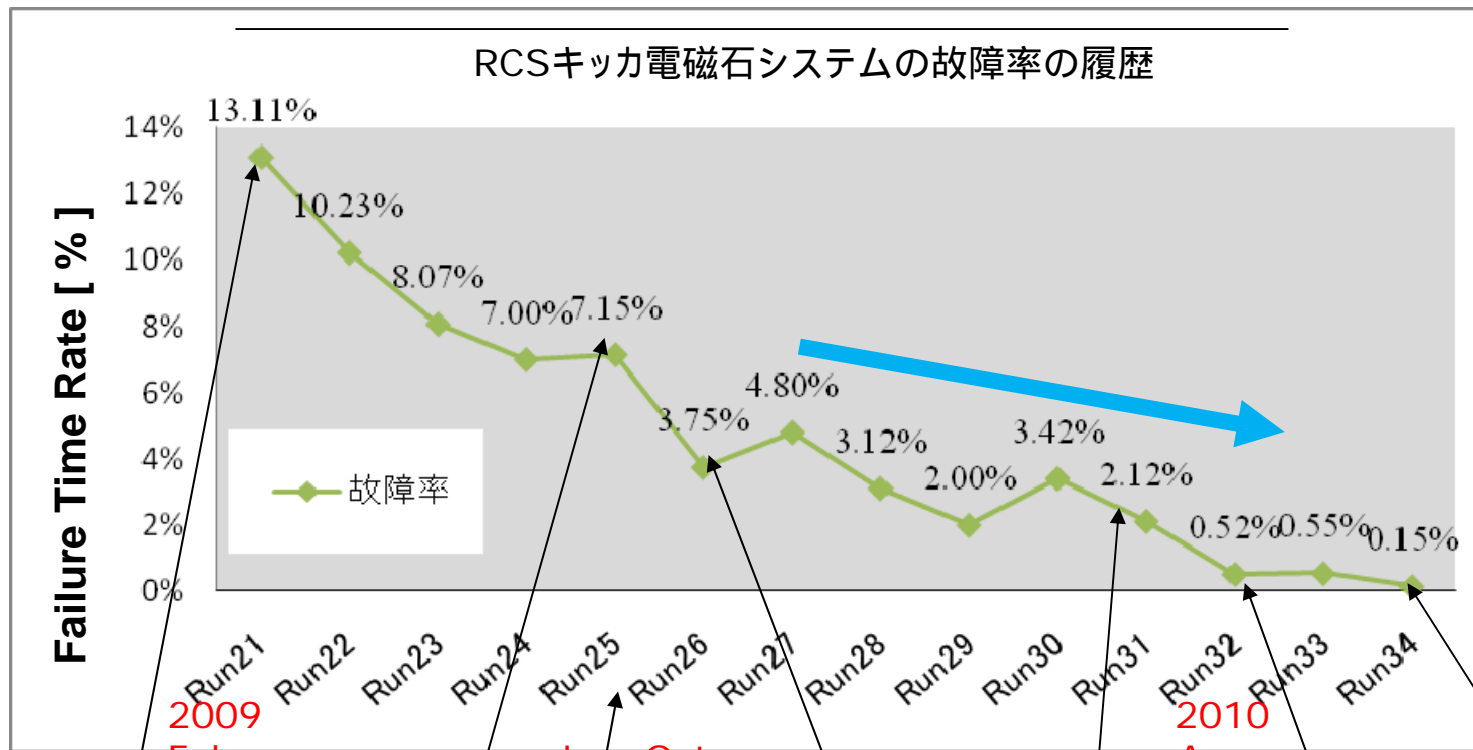
2009年11月から2010年1月までのビームトリップの要因と時間



稼働率向上の例: キッカー電磁石の安定化



要因を分析し、電源に使っている電子管(サイラトロン)の調整に係る多くの改善を施すことで100分の1への減少を実現



・コンディショニング、及び、レンジング開始
・リザーバ電圧の最適化

6月中旬からドリフト自動補正開始

夏の間中古の球の再コンディショニング実施

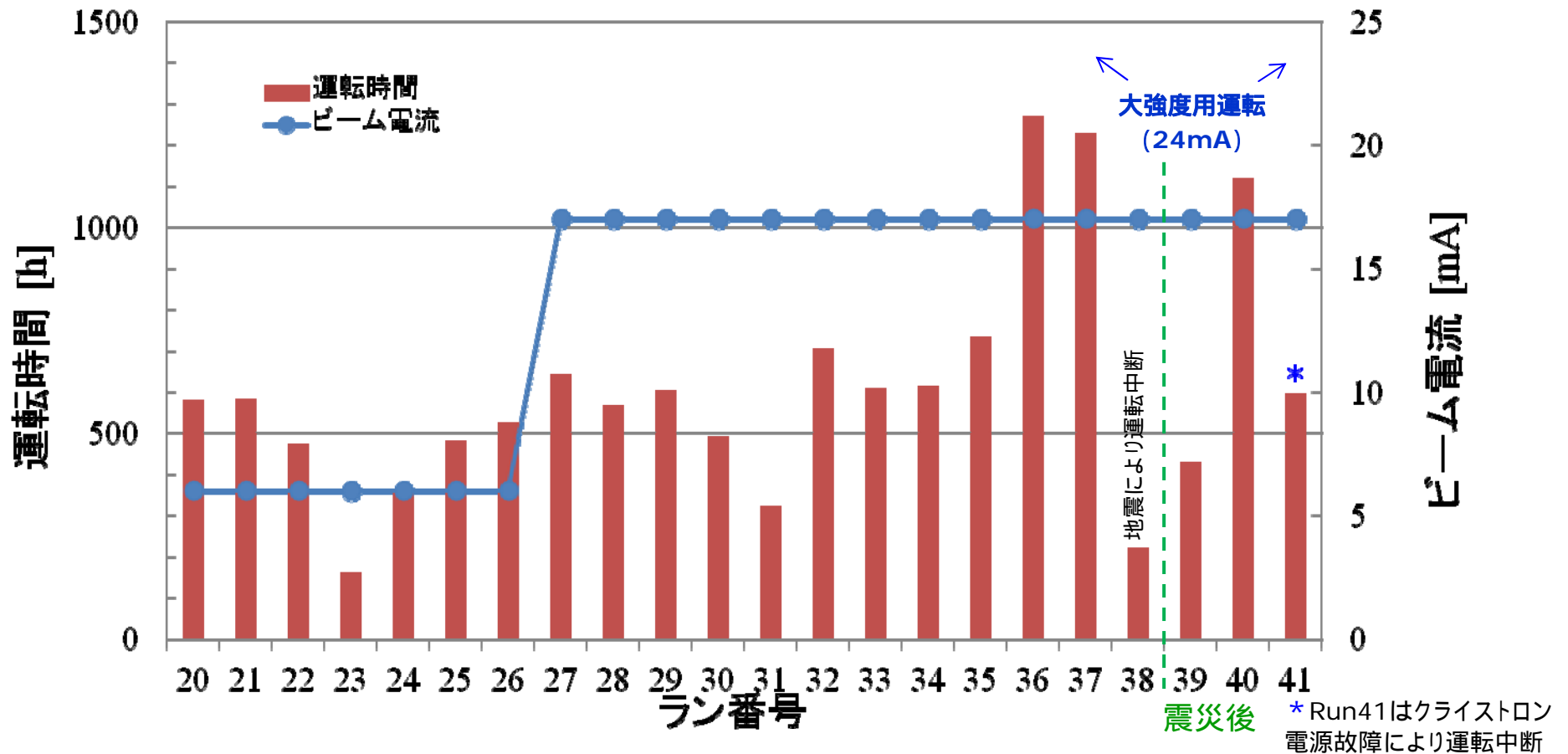
カソードヒータ電圧調整開始 (ドリフト抑制)

ドリフトする球の寿命により、徐々に新品に交換

ドリフトする球がなくなった。

立上時間 (エージング) の短縮化

運転時間向上の例: イオン源の連続運転の長時間化



- ラン#27より、ビーム電流を6mAから17mAに増加、ラン#37、41は大強度試験のため24mA運転を実施。
- ラン#36より50日の連続運転を開始。17mA時は1,000時間以上の連続運転を実証。
- イオン源保守(交換)時間: 従来3日要していたものを、交換部品のユニット化等により2~1日に短縮。

長時間の連続運転、保守時間の短縮で運転時間向上

加速器の性能向上

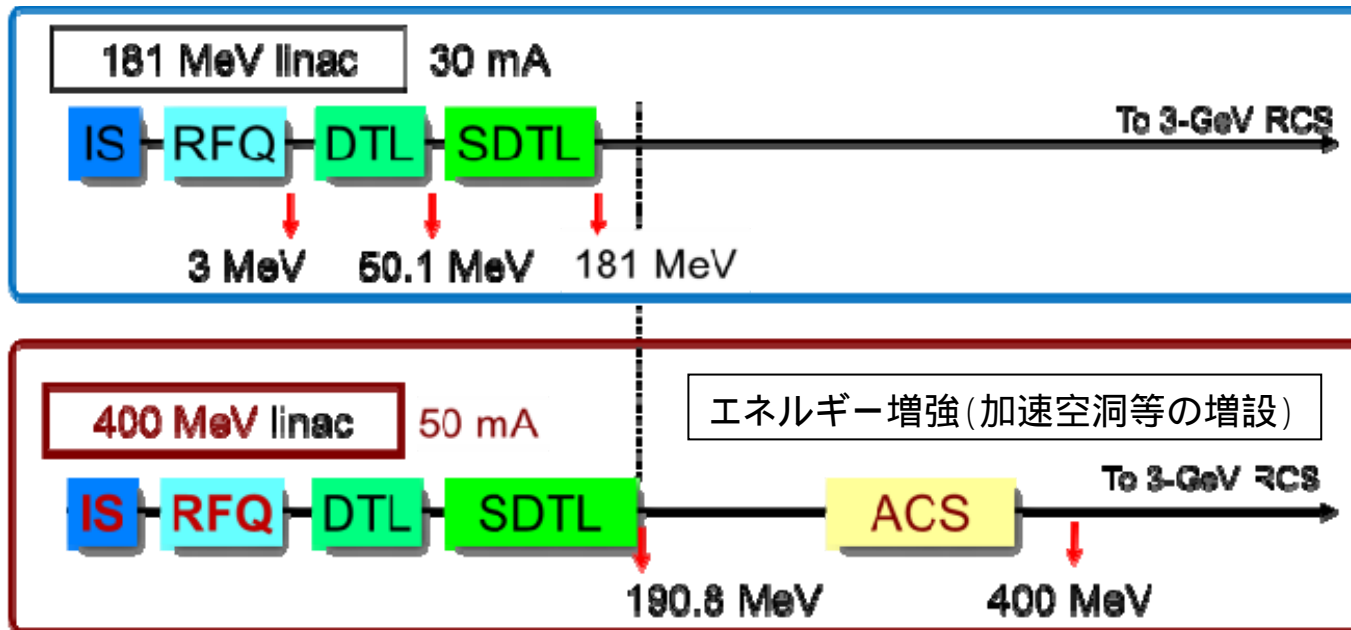
- ◆ リニアックのエネルギー増強
- ◆ ビーム電流増強
- ◆ メインリングの性能向上

予算措置済

リニアックの性能向上



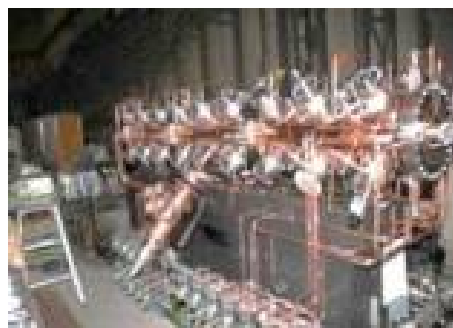
- J-PARCの当初設計強度 (1MW@RCS、0.75MW@MR) を実現するには、リニアックの**エネルギー**は400 MeV、**電流**は50mAが必要。



ビーム電流向上:
性能向上したイオン
源、RFQに交換



イオン源



RFQ



ACS型加速空洞

RCSの性能向上



1MWに向けて

1. 入射パルス電源の整備
 - 1-1 バンプ電源 (400MeV入射のための増強)
 - 1-2 可変偏向電磁石電源 (ビーム整形用)
2. ビームロス低減
 - 2-1 補正四極システム (ビーム軌道制御)
3. 高周波加速空洞機器 (加速電圧安定化)

- ビーム安定化に向けて
1. ビームモニターの高度化
 2. 荷電変換フォイルの長寿命化

1-1 バンプ電源



1-2 可変偏向電磁石電源

ビーム
(MLF/MRへ)

入射部

出射部

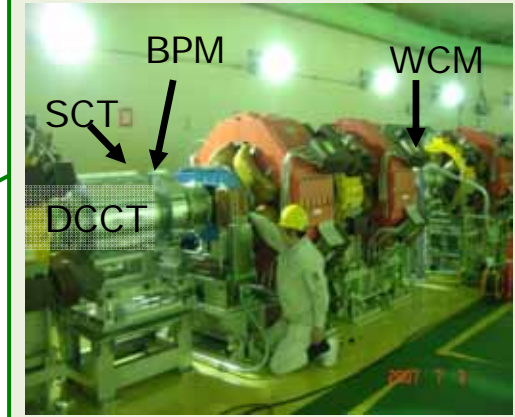
高周波加速部

ビーム
(リニアックから)

2. 荷電変換フォイル



1. ビームモニター



2-1 補正四極システム



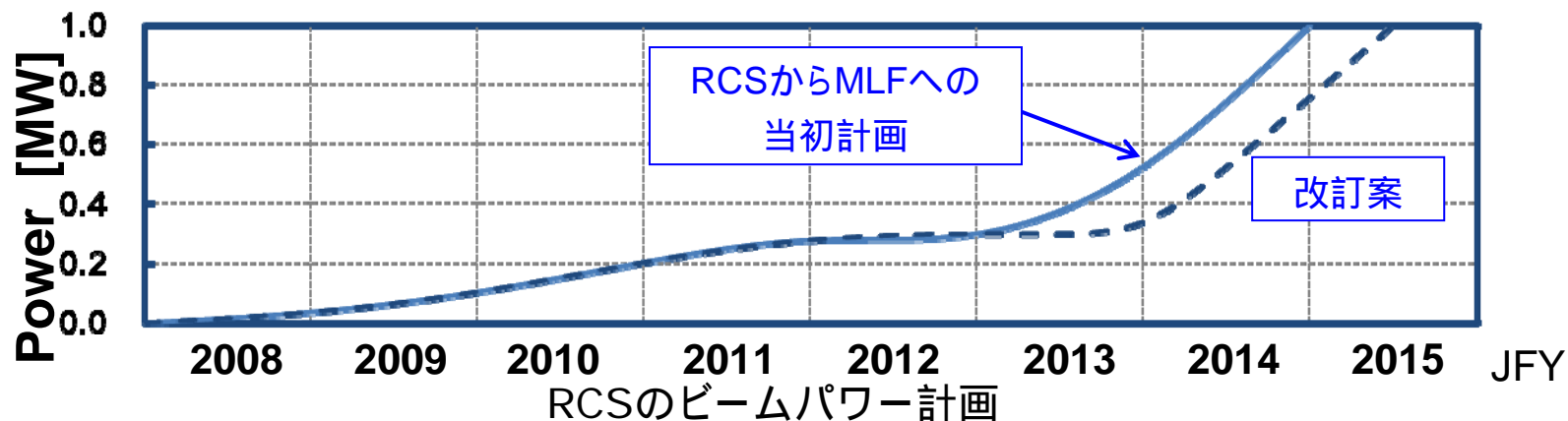
3. 高周波加速空洞機器



リニアック、RCSのパワー増強計画



年度	~2011	2012	2013	2014	2015	2016
		400MeV入射準備	400MeV入射開始	大強度運転	1MW出力への目途	1MW安定運転への目途、1MW以上の可能性検討
供用ビームパワー (最大パワー)			~300kW	300kW以上	~1MW (1MW)	~1MW (>1MW)
リニアック400MeV化 (リニアック加速空洞等、RCS入射対応)		製作、試験	据付、調整	利用運転、1MW出力化		
リニアック大電流化 (RFQ、イオン源)		R&D、製作、試験				
ビーム安定供給 (ビーム診断、荷電変換フォイル等)		181MeV		400MeV、1MW		
1MW以上の可能性検討 (大電流・高繰り返し・高エネルギー化等)						



リニアックとRCS増強整備は最先端予算でほぼ充当、2013年度に要据付・調整予算

リニアックエネルギー増強機器の製作状況



製作が完了し、工場に保管されているACS型加速空洞
(2012年3月末現在、21台中19台が完了し、順調に製作が進む)

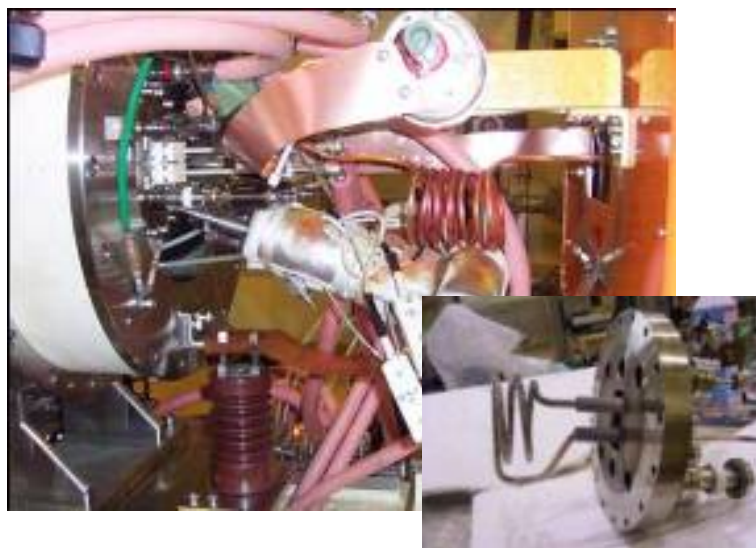


リニアック棟に保管中のクライストロン
(高周波電力を発生する電子管)
(必要数の製作は完了)



順調に据え付けが進む地上部の高周波機器類

リニアックビーム電流増強の開発状況



イオン源の外観と高周波アンテナ(右下)



大電力試験の準備を進めるRFQの予備機

開発中の高周波を用いたイオン源(SNSイオン源グループと協力)

- H- 全電流: 74mAの引出に成功 (目標 60mA)
- エミッタンスが大きく、RFQで加速できる範囲内の電流は60mA程度

課題: エミッタンス向上、セシウム添加量の低減、メンテナンス頻度評価->実用化には継続的なR&D が必要

- ・RFQ(大電流対応機)は予備機の経験を元に製作を進めており、2012年12月に製作完了予定
- ・製作後、大電力試験、ビーム試験を行い、2013年夏、トンネルに据え付ける予定

	#1(現有)	#2(予備)	#3(大電流)
目的	JHF計画用	#1の予備	J-PARC目標達成
電流	30 mA	←	50mA (新設計)
構造	2重構造	1重ロー付構造	←
状況	運転中	大電力試験準備	製作中

MRの大強度化:仕様値750 kWへの道

1. 状況の分析:

- ・実現可能なビームパワーはビームコリメータでのロス(3-50BT, MR)が制限する。
- ・最近のシミュレーションの結果によると、空間電荷効果によるビームロスにより現行の機器では450 kW程度が限界か。

2. 大強度化のシナリオ:

(1) 取り出しビームエネルギーを上げる。

もともとのシナリオ: フライホイールを導入して取り出しエネルギーを50 GeVに上げる

中間評価報告書(平成19年6月)の指摘事項: フライホイールの導入は50 GeVシンクロトロン¹の運転状況を見ながら適切な時期に再度レビューを行い判断することが必要

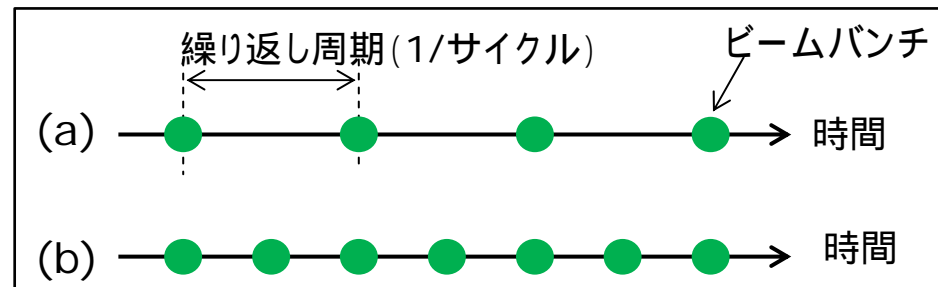
(2) 繰り返しサイクルを上げる

電磁石の飽和の影響や電力の状況を考慮して再検討した結果、(2)を選択する。

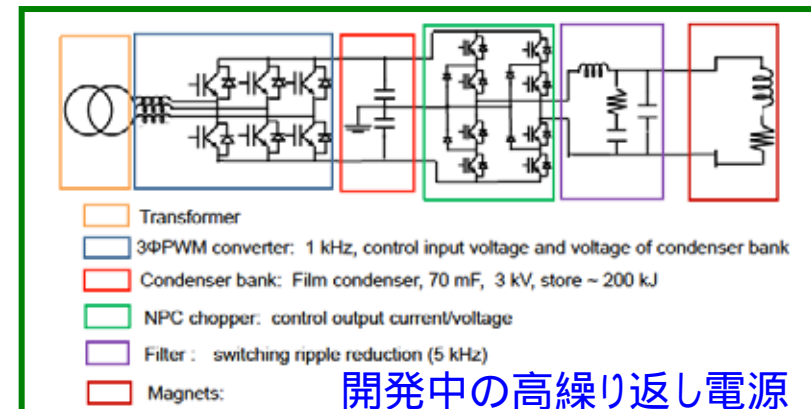
2012年2月の加速器技術諮問委員会で高繰り返し化は支持

3. 必要な項目:

- ・主電磁石電源: 高繰り返し、低リップル(R&Dを実施中) 電源の製作に予算の手当が必要
- ・高勾配高周波加速系: 高インピーダンス空洞(R&Dを実施中)
- ・入出射機器の高度化: 入射セプタム/速い取り出しセプタム電源の交換など(実施準備中)
- ・リングコリメータの大容量化: 現行の0.45 kWから2 kW以上へ(実施中)



(a)から(b)に繰り返し周期を短くする(サイクルを上げる)ことによるビームパワーの向上の概念



MRの大強度化:仕様値750 kWへの道(続き)



大強度化のシナリオとして高繰り返し化を選択する方針については 2012年2月23 - 25日に行われた加速器技術諮問委員会の会合で議論し、委員会からの支持を得た。以下は、Committeeより提出されたレポートの抜粋。

- A MR beam power upgrade based on a reduction of the MR cycle time to 1.28 seconds was presented. It requires a significant upgrade/reconfiguration of the MR power supply systems and a voltage/gradient upgrade to the rf systems. These upgrades could be completed by JFY17. Beam simulations and R&D on hardware developments in support of this upgrade are well developed.
- The Committee agrees that there are significant long-term advantages to this approach.
- This major facility upgrade will be part of a government review during the spring. The budget for the upgrade will be set following this review.
- ***Reducing the MR cycle time from 2.56 to 1.28 seconds with a new MR power supply and high gradient rf cavities would ensure that the design beam power of 750 kW can be reached and also has the potential for a MR performance much beyond 750 kW.***

- ◆ 加速器は、運転開始後、困難な局面はあったものの乗り越え、ビームパワー向上、運転時間や稼働率の改善などの努力の結果、着実に性能を向上し、ユーザーへのビーム供給を行ってきた。

- ◆ 現在は、震災前と同等のビームパワーでユーザーへの供給を可能としている。MR-FXでは改善・調整を進め、震災前以上のパワーも達成した。
ビームトリップ、故障やビームロスなど、震災によるもの、明確に言えないものが多発しており、しばらくはこうした課題を解決してゆく必要がある。

- ◆ 今後5年間の性能向上計画
 - 平成25年夏から秋、リニアックのエネルギー増強や電流向上を図り、MLFへの1MW実現を目指す。
 - MRは電磁石電源の製作、高勾配加速空洞などによる高繰り返し化でのFXパワー向上、コリメータや真空容器の改善などによるSXパワー向上を図る。
 - ビームパワーだけでなく、安定供給の観点からも、継続的な研究開発、予算の手当てが必要である。