

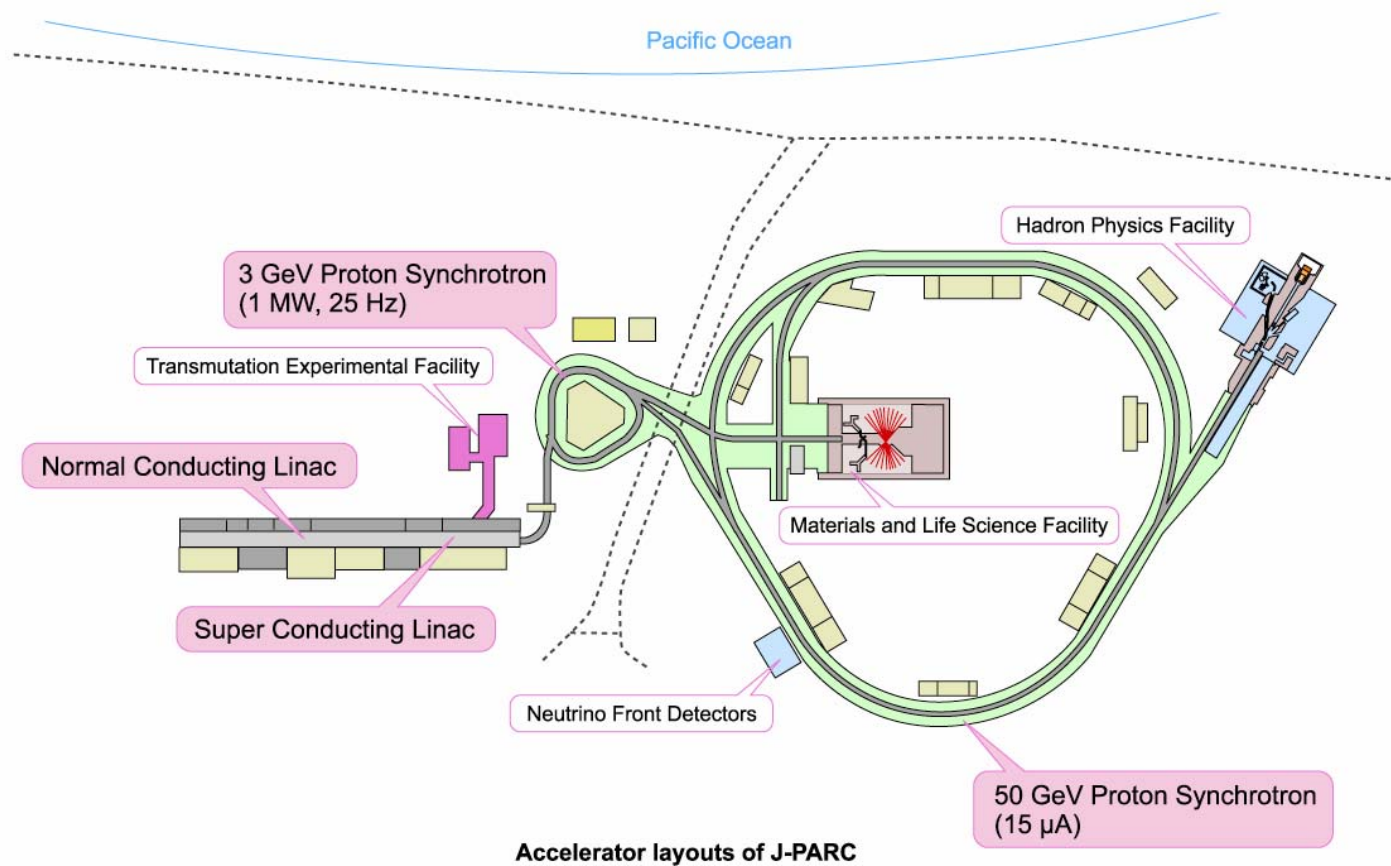
J-PARC 加速器の現状

小関忠

KEK 加速器研究施設

1. J-PARC加速器の概要
2. リニアックのビームコミッショニング
3. RCSの建設状況
4. MRの建設状況/初期の運転パラメータ
5. まとめ

加速器と実験施設



第1期の加速器構成:

リニアック(400 MeV)+ RCS(3GeV) + MR(40 GeV)

実験施設:

物質生命科学実験施設(MLF) ; RCS ビーム利用

ハドロン実験施設、ニュートリノ実験施設 ; MR ビーム利用

第2期

ビームエネルギー増強

リニアック;600 MeV, MR;50 GeV

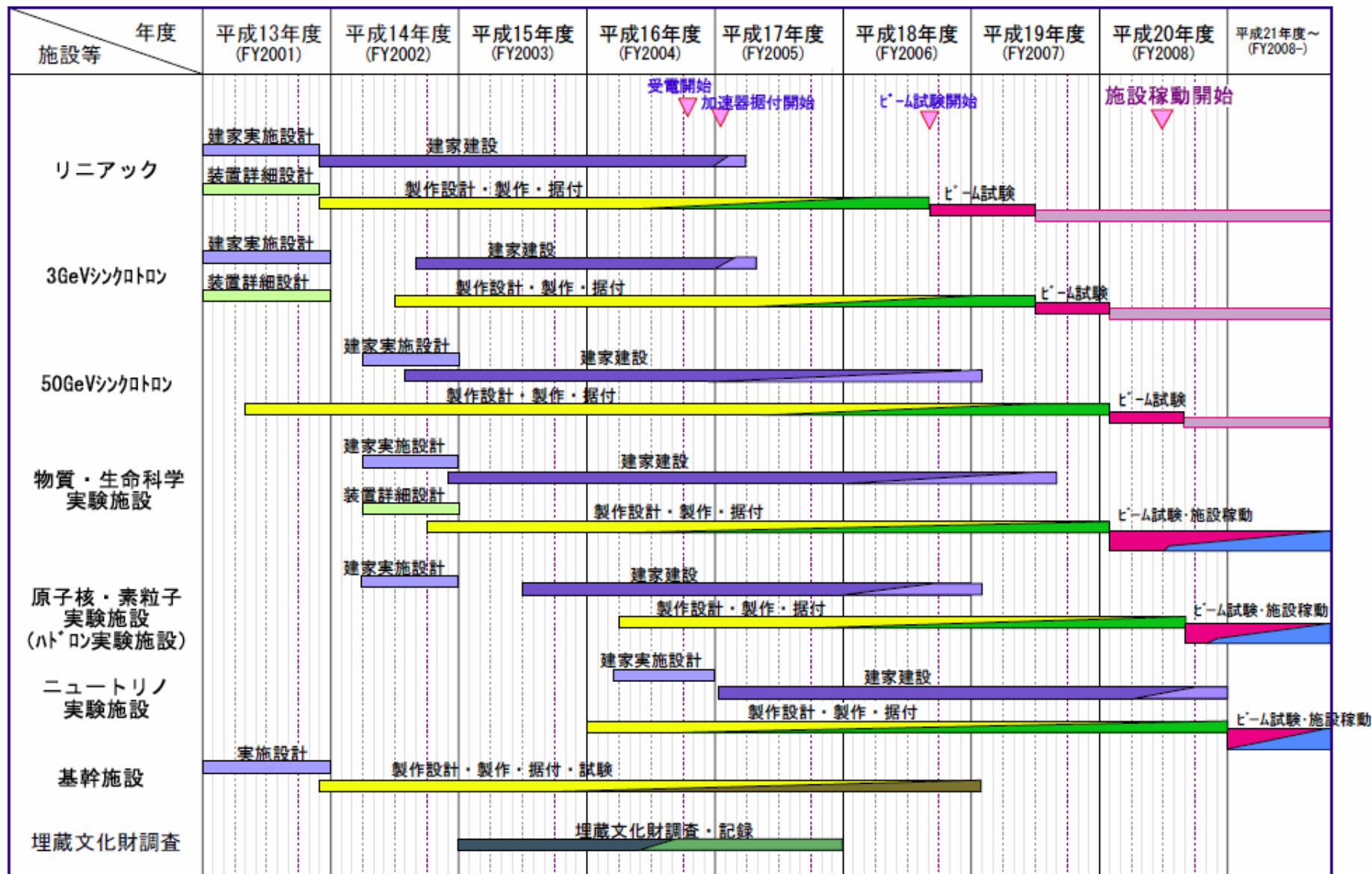
ハドロン実験施設拡充

加速器駆動核廃棄物処理システム;

リニアックビーム利用

建設スケジュール

J-PARC建設計画大工程表



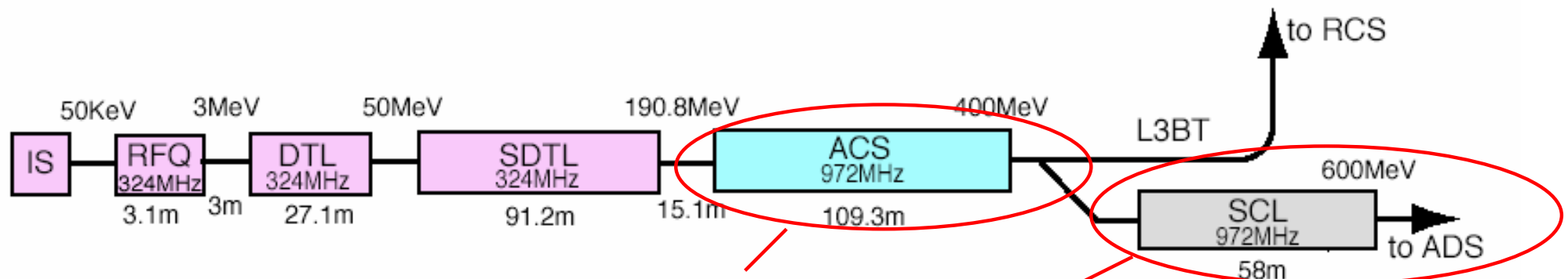
Bird View Photograph, Nov. 2006



Linac overview

- **Ion Source:** volume production type
- **RFQ:** pi-mode stabilized loop to eliminate effects of deflecting field
- **DTL:** 3 tanks, electro-quadrupoles are installed in DT
- **Separated DTL(SDTL):** 32 short tanks(each tank has 5cells), no quad in DT
- **Annular Coupled Structure (ACS):** good axial symmetry (not installed in Day-1)
- **Superconducting Linac (SCL):** wide aperture, high acceleration gradient (Second phase)

- **Particle:** H⁻ (negative hydrogen)
- **Energy:** 181 MeV (Day-one)
400 MeV (with ACS)
- **Peak current:** 30 mA @181MeV
50 mA @400 MeV
- **Repetition:** 25 Hz (RCS Injection)
50 Hz(2nd phase)
- **Pulse width:** 0.5 msec

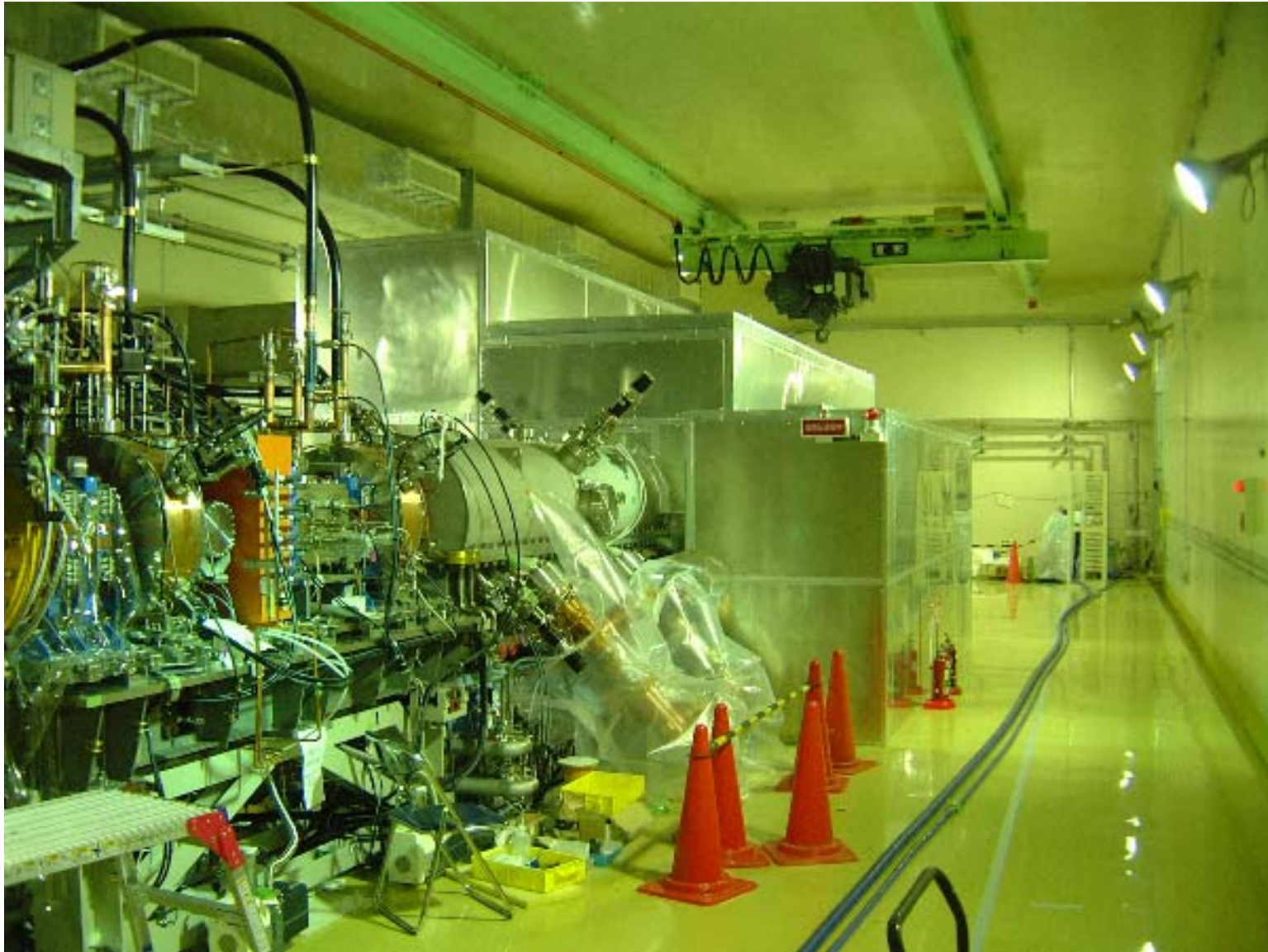


First phase, but not installed in Day-1

Second phase

Linac components

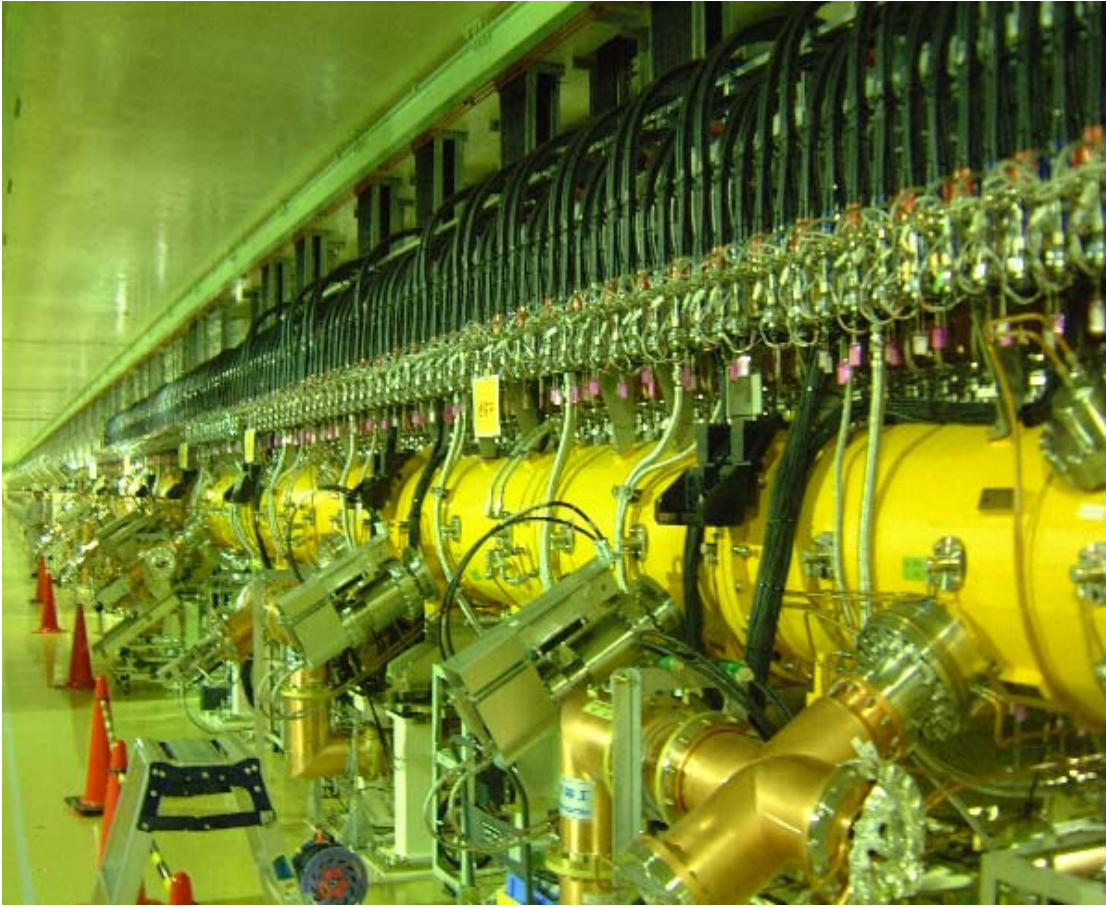
Front-end part



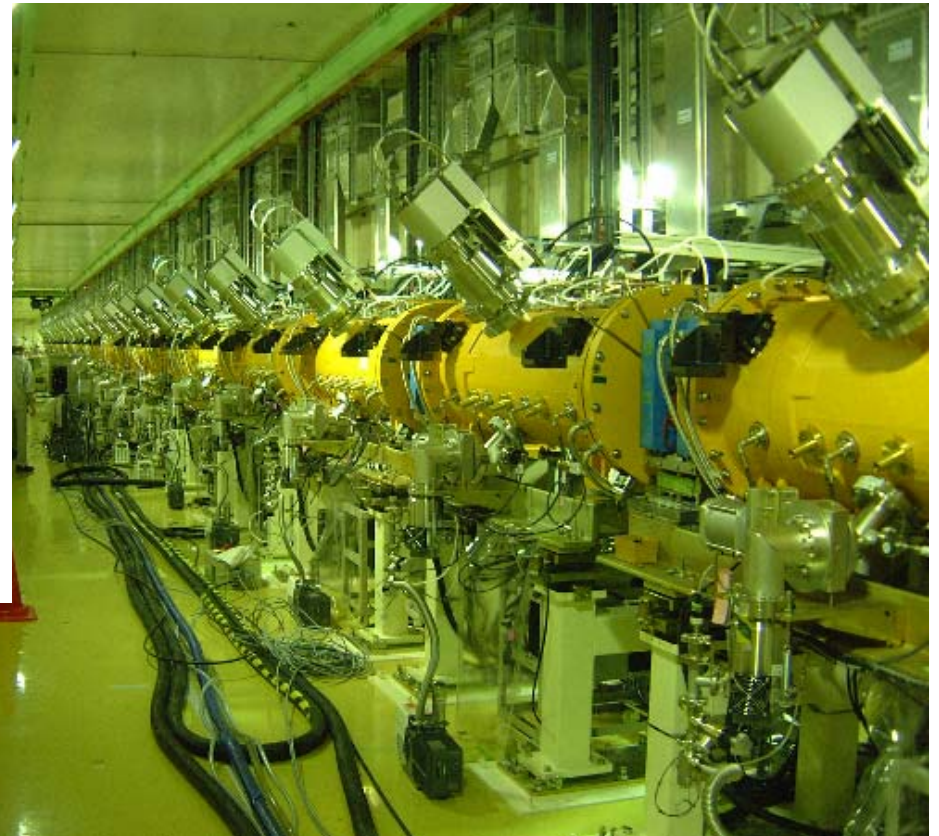
Ion source, LEFT, RFQ, MEFT (with 2 choppers , 2 bunchers and BM)

Linac components (cont.)

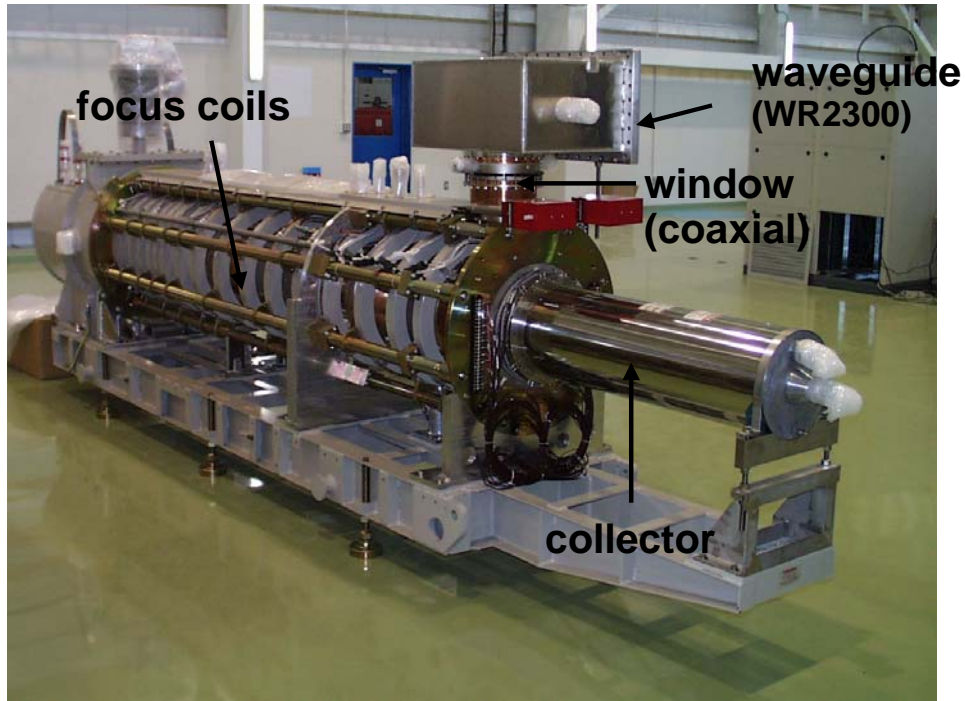
DTL (27m)



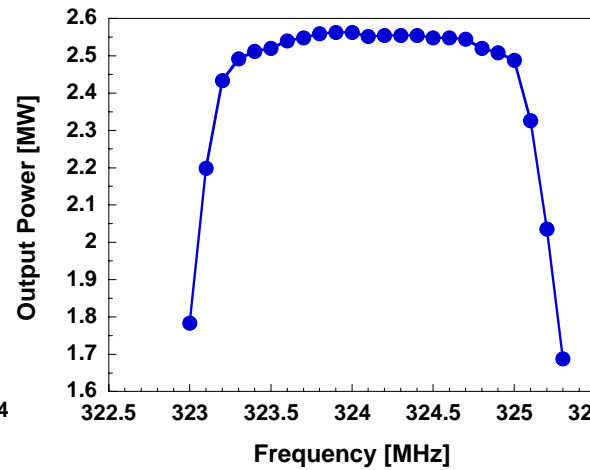
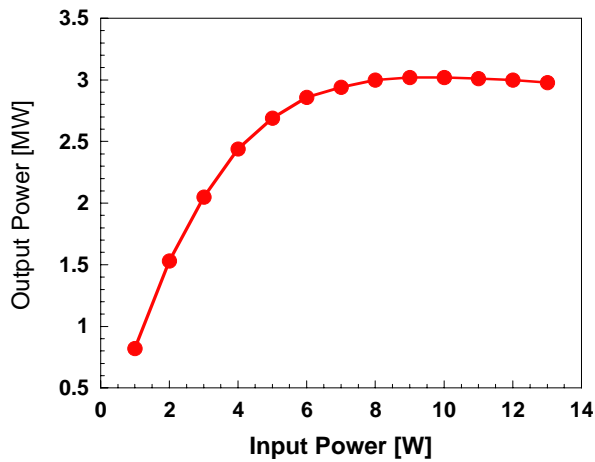
SDTL (84 m)



324MHz Klystron



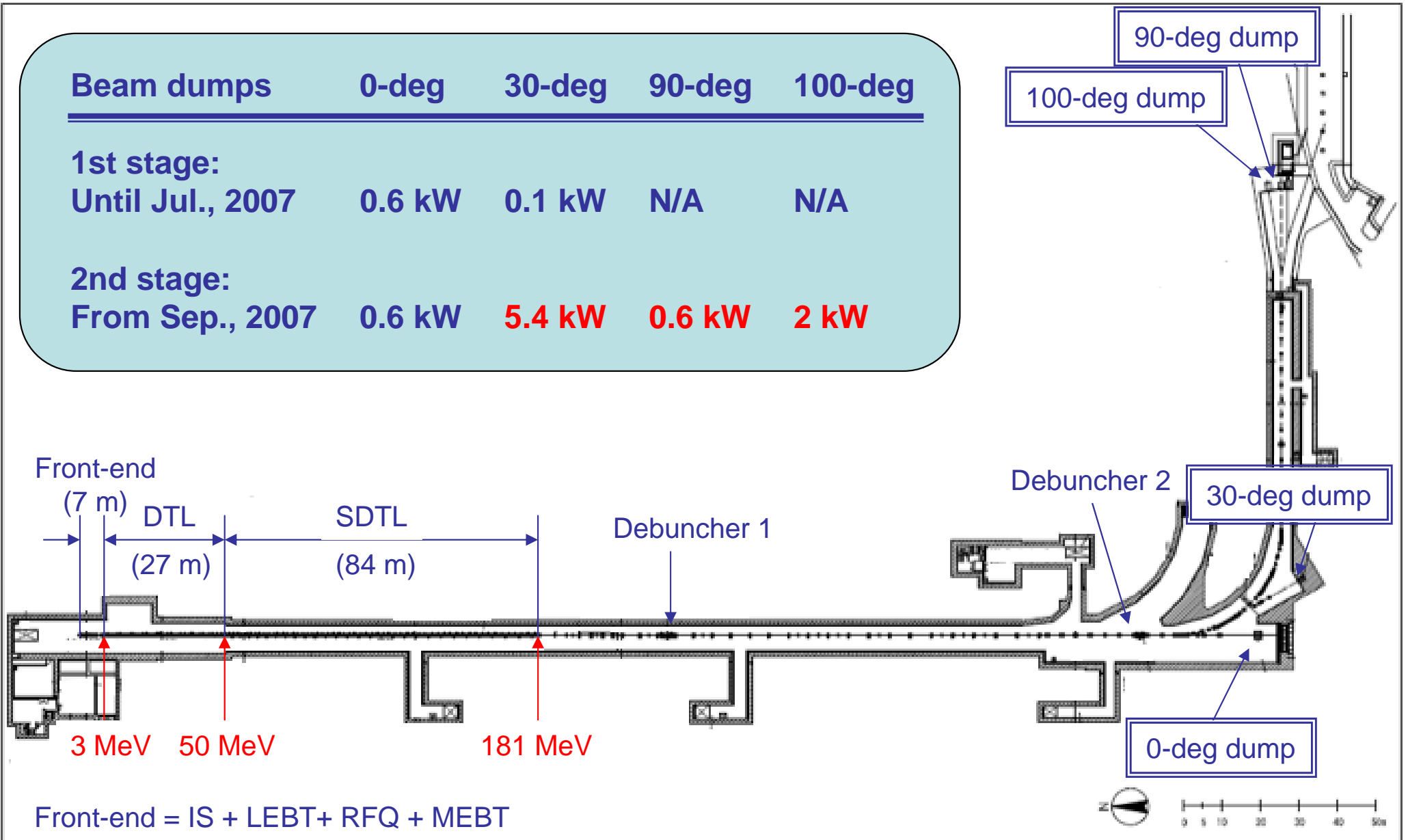
Peak Power	2.5 (max. 3.0) MW
Pulse Width	650 μ s
Repetition	50 Hz
μ -Perveance	1.37 A/V ^{3/2}
Gain	50 dB
Efficiency	55 %
Beam Voltage	105 (max. 110) kV
Beam Current	45 (max. 50) A
Mounting Position	Horizontal
No of Klystron	23=20+3(spare)



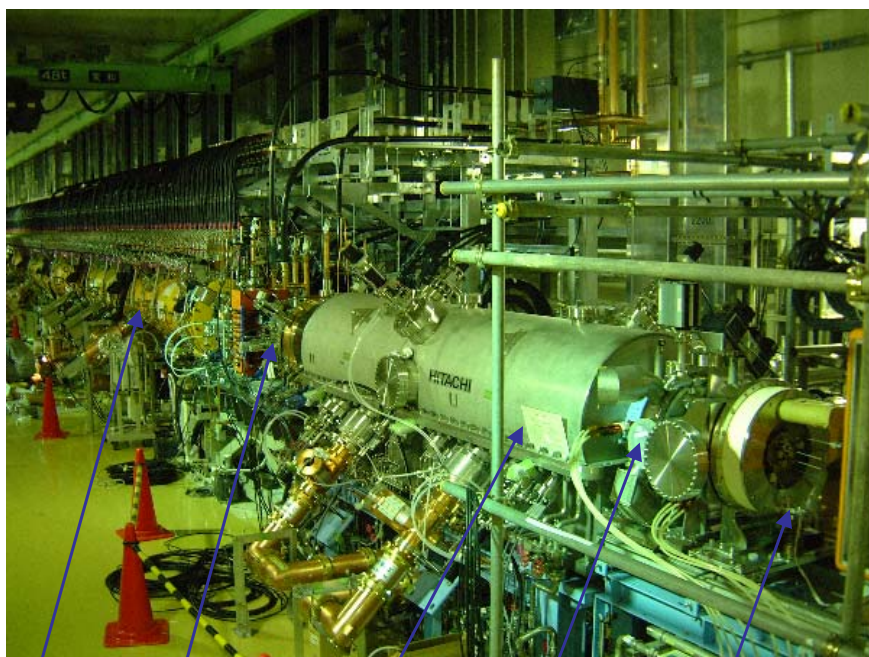
Beam commissioning schedule of linac

- Oct., 2006 ~ : Off beam commissioning
- Nov. 20, 2006~ : Beam commissioning (1st stage)
- Sep., 2007 ~ : Beam commissioning (2nd stage)

Beam dumps	0-deg	30-deg	90-deg	100-deg
1st stage:				
Until Jul., 2007	0.6 kW	0.1 kW	N/A	N/A
2nd stage:				
From Sep., 2007	0.6 kW	5.4 kW	0.6 kW	2 kW



Commissioning history of linac



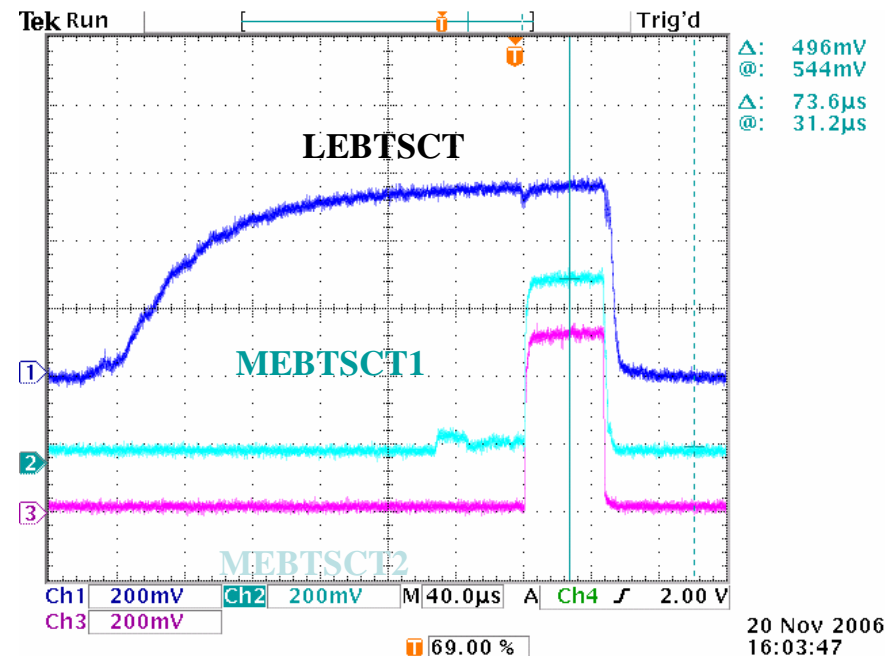
DTL

MEBT

RFQ

LEBT

Ion Source



Beam Current vs. Time

Nov. 20th: First beam from RFQ, 3 MeV, 5 mA, 50 μ s, 5 Hz

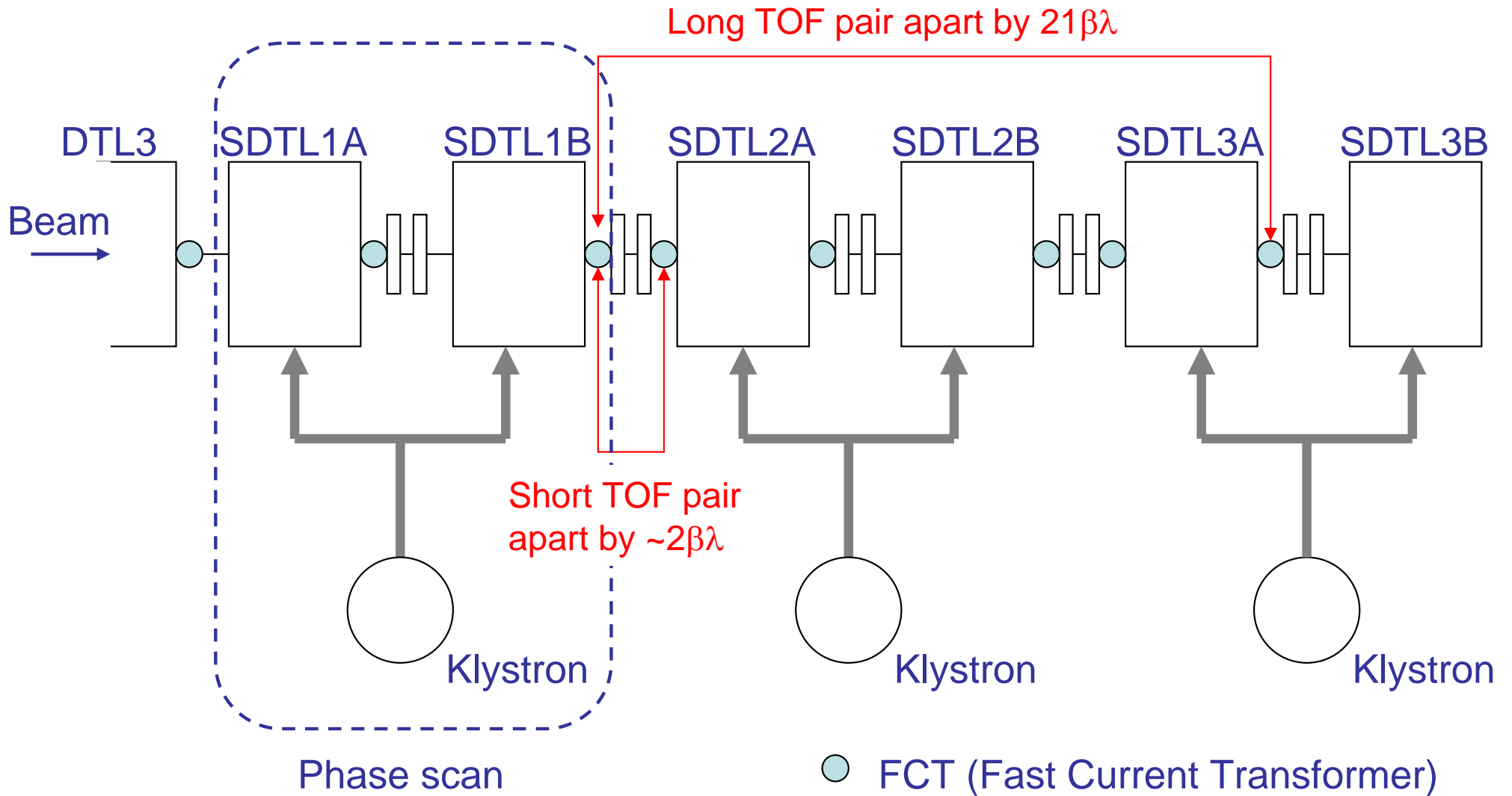
Dec. 19th: First beam form DTL1, 20 MeV, 5 mA, 20 μ s, 2.5 Hz

The operation from IS to DTL1 has been already demonstrated in KEK in 2004.

Dec. 20th: First beam from DTL3, 50 MeV, 5 mA, 20 μ s, 2.5 Hz

Jan. 24th: First beam from SDTL, 181 MeV, 5 mA, 20 μ s, 2.5 Hz

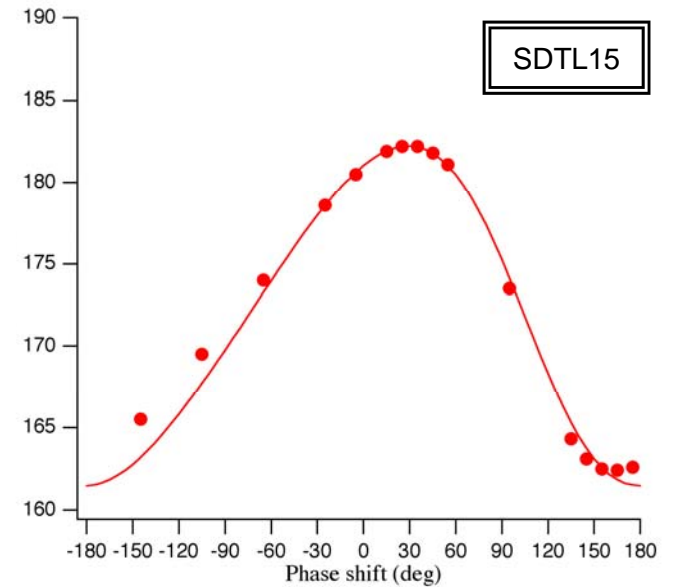
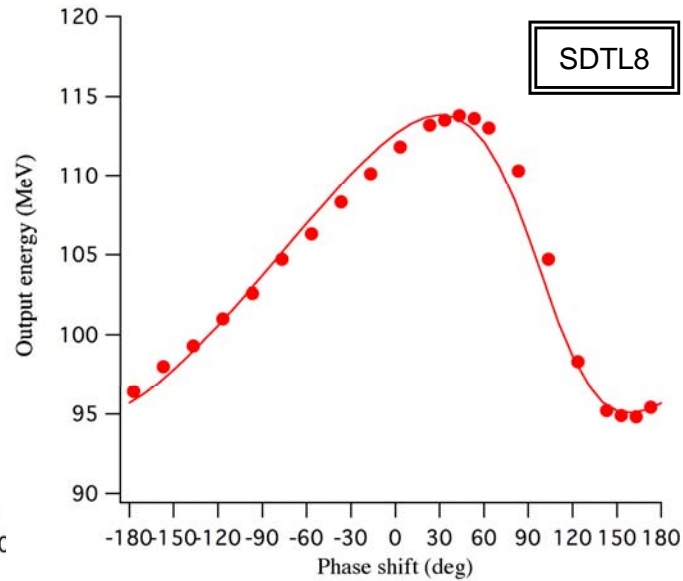
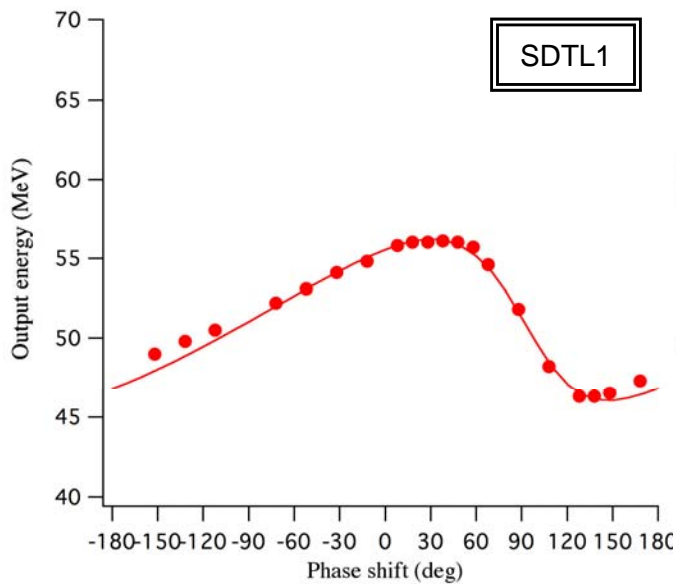
FCT pairs for SDTL tuning



Short and long TOF pairs are prepared for each klystron.

Short TOF pair is utilized to avoid miscounting of wave numbers in the long pair.

1st trial of SDTL phase scan

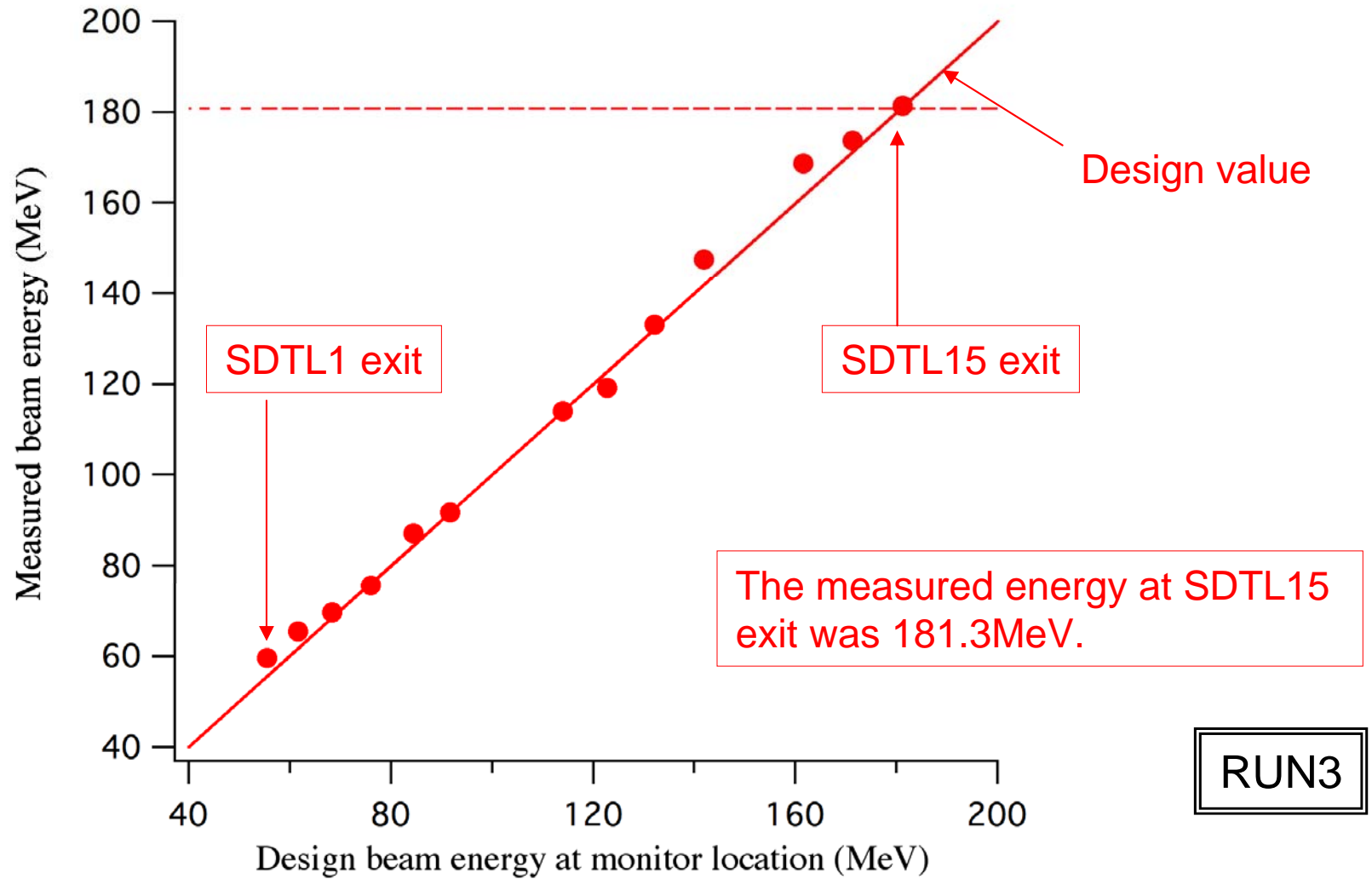


Lines: simulation, Filled circles: measurement

RUN3

- While the SDTL tuning is still rough, 181-MeV acceleration has been achieved without notable beam loss.

Energy profile for the 1st 181MeV acceleration



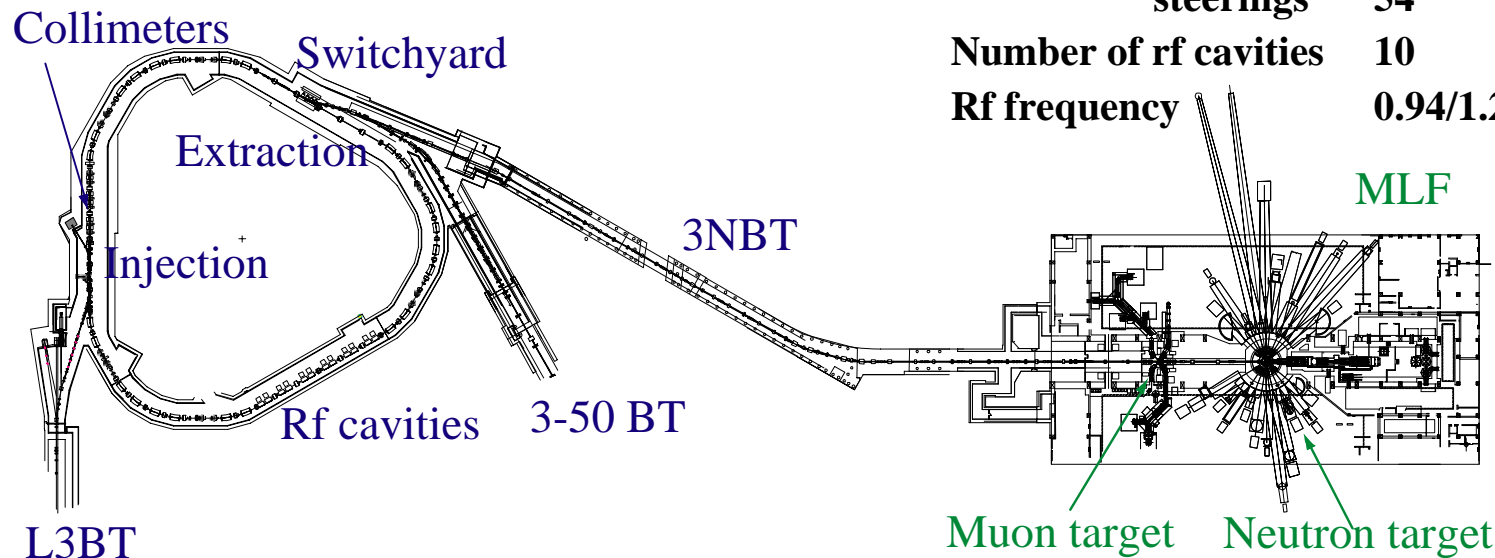
RCS(Rapid Cycling Synchrotron) overview

- Three fold symmetry, three dispersion free SS.
- Rapid cycle of 25 Hz
- Multi-purpose machine:
Neutron/muon source and booster of the MR.
Two beam transport lines

3NBT:transport line to the MLF

3-50BT: transport line to the MR

Circumference	348 m
Superperiodicity	3
Repetition rate	25 Hz
Injection Energy	181 MeV/400 MeV
Extraction Energy	3 GeV
Harmonic number	2
Transition γ	9.14
Typical tune	6.72, 6.35
Transverse emittance	
Injection beam	6 / 4 π mm-mrad
Painting	216 π mm-mrad
At extr. for MR	54 π mm-mrad
Number of dipoles	24
quadrupoles	60 (7 families)
sextupoles	18 (3 families)
steerings	54
Number of rf cavities	10
Rf frequency	0.94/1.23-1.67 MHz



Installation and test operation of main magnets



電磁石：B、Q、S電磁石据付ほぼ終了。全磁石にセラミックダクトを設置。現在、精密アラインメント中。3月末までに終了予定。

電源： Q電磁石全数(7ファミリー)の個々のAC通電試験終了。現在、B電磁石電源の試験中。4月以降、全ファミリーの同時通電開始。

磁場測定

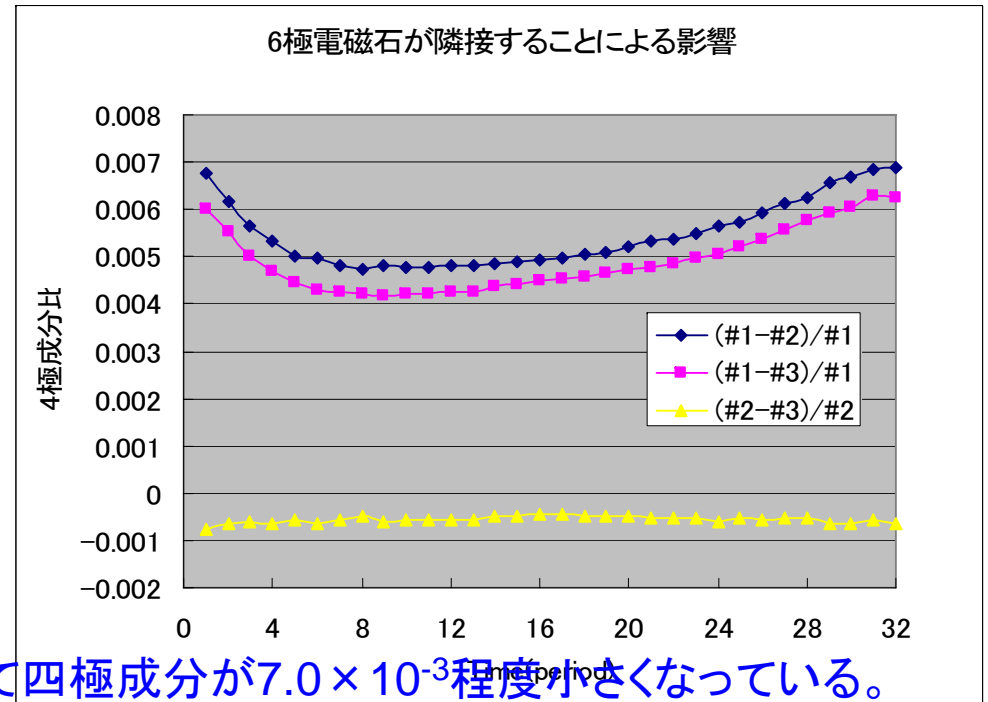
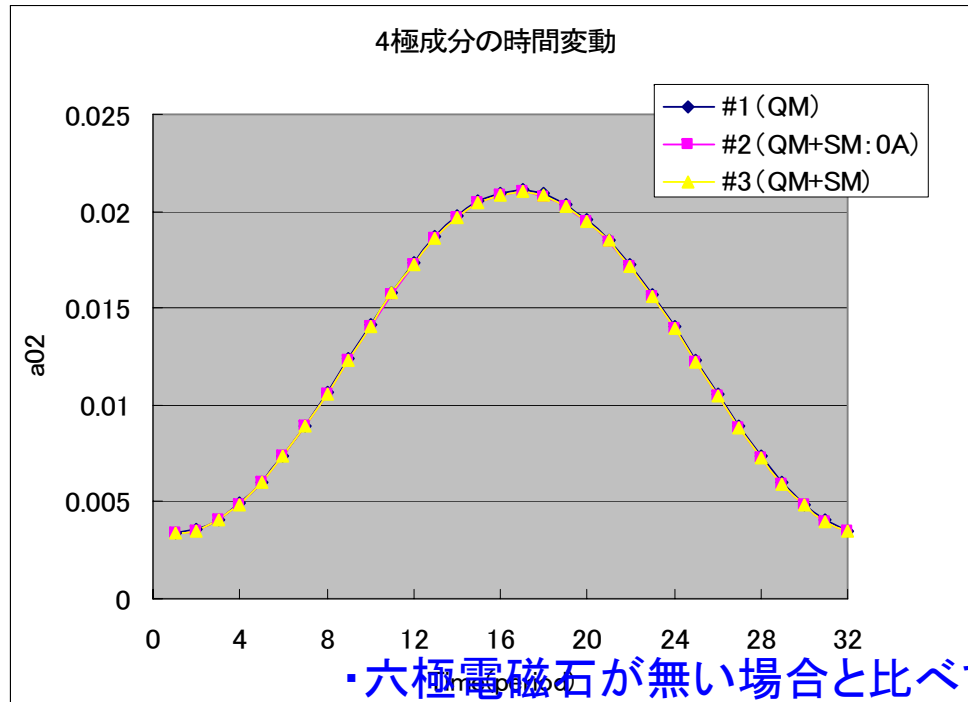
大口径の電磁石が近接して設置→磁場の干渉が生じる。 実際の組み合わせでの磁場測定を実施。

QFCの場合:

	Core length	Bore/Gap	Field
QFC	500 mm	330 mm	4.46 T/m @3 GeV
SFX	400 mm	330 mm	-13.3 T/m ² @3 GeV
CHN	100 mm	330 mm	0.045 T



四極と六極の干渉 (磁極間距離370 mm)



- ・六極電磁石が無い場合と比べて四極成分が 7.0×10^{-3} 程度小さくなっている。
- ・六極電磁石通電有無の影響は 7.8×10^{-4} 以下と小さい。

RF system



空洞のインストール



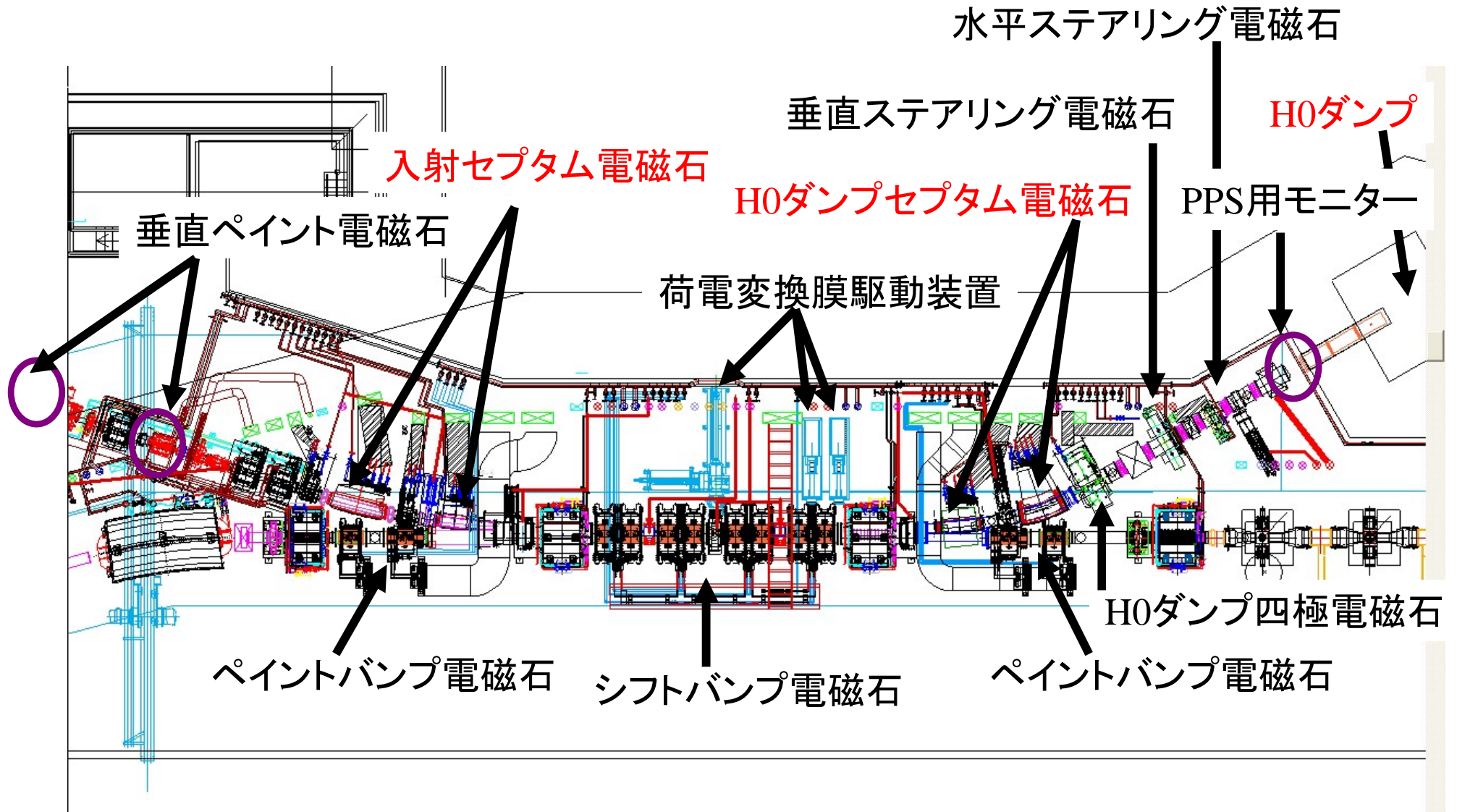
空洞4台のインストールを完了。
残る6台は5～6月。



最終段増幅器のインストール

Beam injection

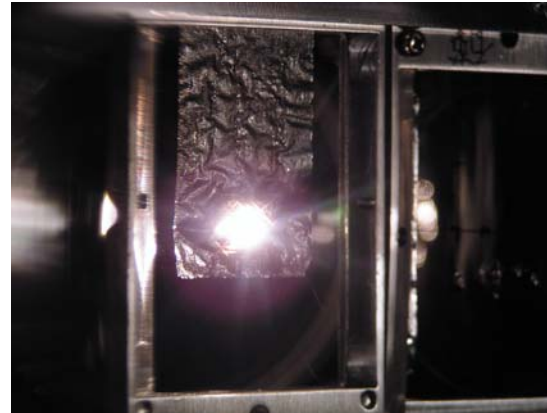
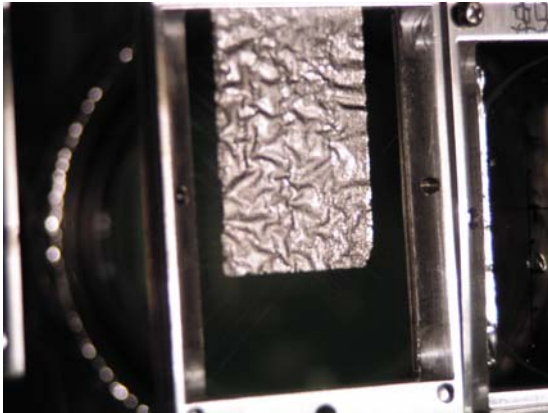
Charge exchange injection, Painting injection



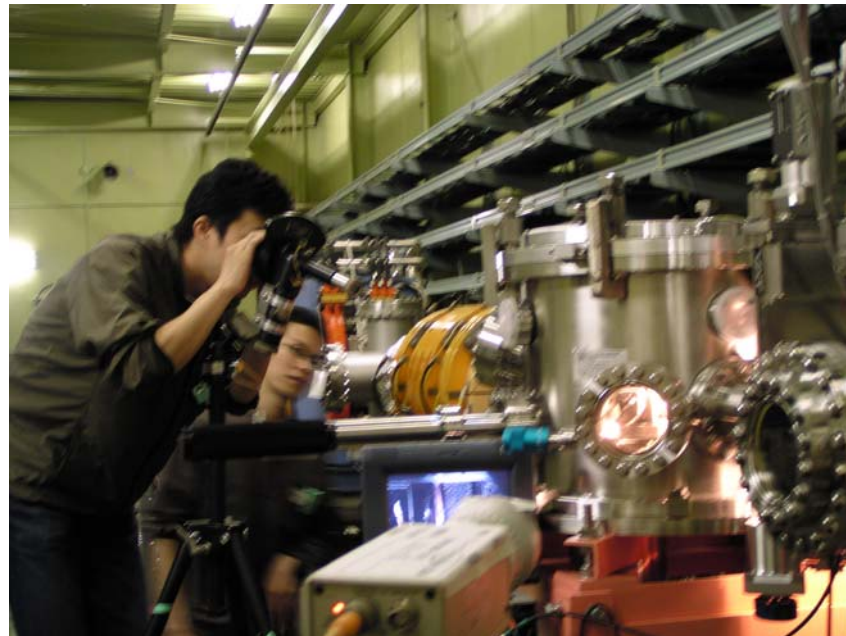
長寿命荷電変換foil

Hybrid Boron mixed Carbon (HBC) stripper foil の開発研究

KEK-PS 前段加速器(コッククロフト)を用いた負水素イオンビームの照射試験



H-ビーム、650 keV、DC200 μ A、の連続照射試験(foil温度 \sim 1800 $^{\circ}$ C)を行う。
さらに東工大においてNe⁺の照射試験を行う。



照射チェンバーとfoilの温度測定

京大、阪大グループによる支援あり。

Comparison of the foil lifetime

Foil Experiments by DC Beam during April~July, 2006.

Foil	Sugai HBC			Commercial Carbon				SNS Diamond			
	290	460	350	307	388	330	428	300 (#538)	533 (#539)	317 (#537)	433 (#540)
Thickness ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)											
dc beam	Ne ⁺	H ⁻		H ⁻		Ne ⁺	H ⁻	Ne ⁺		H ⁻	
Duration (total sum)	4/1 ↓ > 100hrs ↓ 6/9	5/26 ↓ 6/9 ↓ 30hrs	6/22 ↓ 7/23 ↓ 100hr21min	5/26 ↓ 90min	5/26 ↓ 4hr20min	6/14 ↓ 30min	6/22 ↓ 2hr9min	6/13 ↓ 6/14 ↓ 16hrs	6/14 ★ ↓ 10min	6/21 ↓ 6/22 ↓ 10hr31min	6/7 ↓ 104min
Ave. Current (μA)	2.5	220	135~225	250	100~200		125~145	2.5	2.5	120~175	
Ave Heat Deposit.(W)	8	36.1	22.1	26.5	21.5		21.3	8	8	17.4	
Meas'd Temperature (Celsius degree)		1900~ 2100	1642~ 1920				1993~ 2013			1850~ 2000	
Sandwiched by SiC fibers (10 $\mu\text{m}\phi$)	Yes	Yes	Yes					Yes			
Figure #	○		○					○	○	○	○
Comments			Crack and turnup at sides, many small holes	big hole	concave toward beam direction		small hole	Tantalum 0.1mm- thick masking Si substrate	Ta-mask (0.1mm)	Ta-mask (0.1mm) , Si substr. partly hit by beam, back bending to the beam direction	Si substrate broken by H ⁻ beam hit

Ne⁺: TIT Van de Graaff 3.2MeV, beam core size~6mm ϕ

H⁻: KEK Cockcroft-Walton 650keV, beam core size~5mm wide x 3mm high

Injection/extraction sections



Injection bump magnet



Extraction kicker chamber (5 kickers)



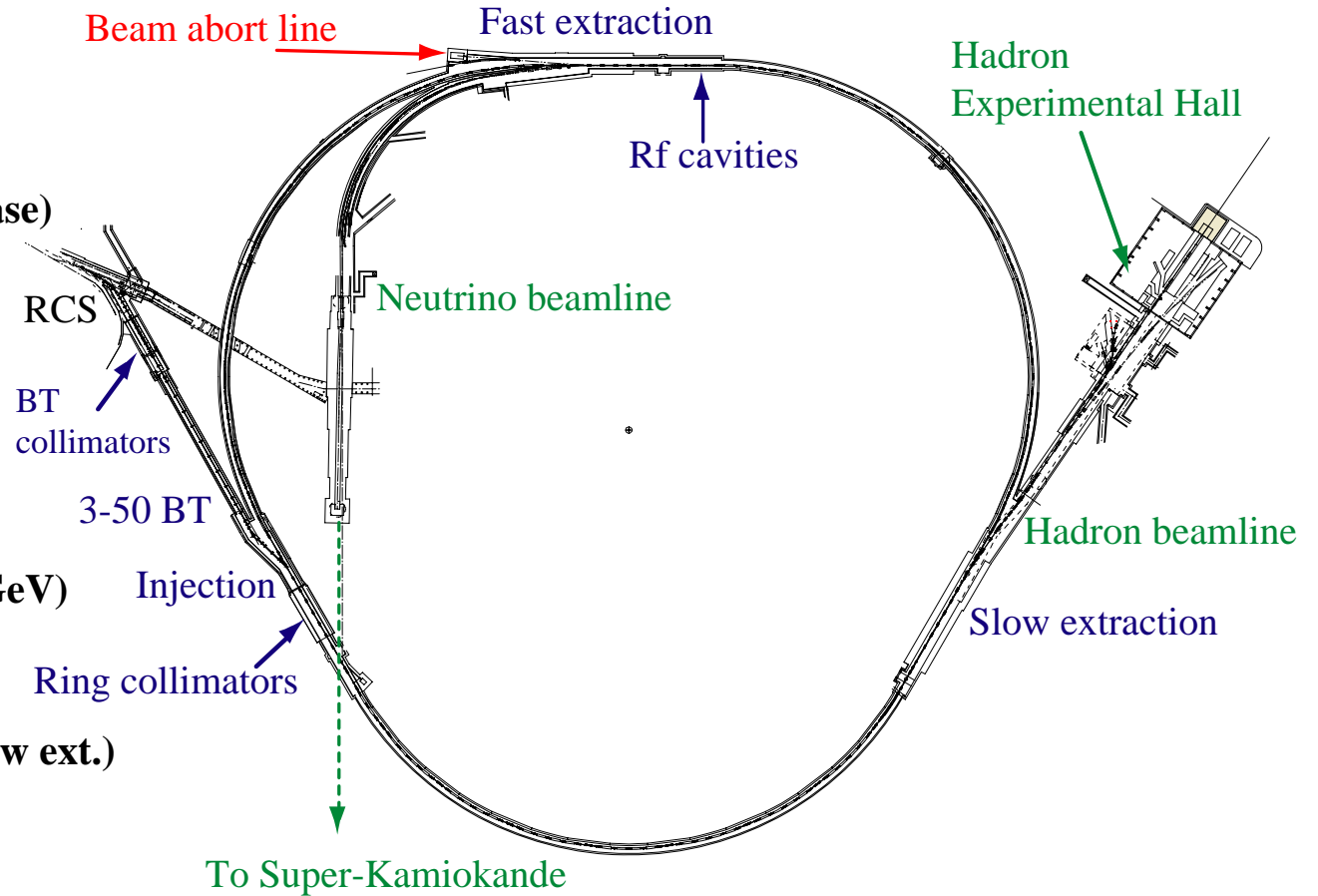
Beam collimator

QuickTimey C2
TIFFAia@kC>CuAj eLI&EvEcEO&aEÄ
Ç™Ç±ÇÄEsENE'EEÇ%a@ÇEÇZÇ%Ç...ÇÖIKöVÇ-ÇiAB

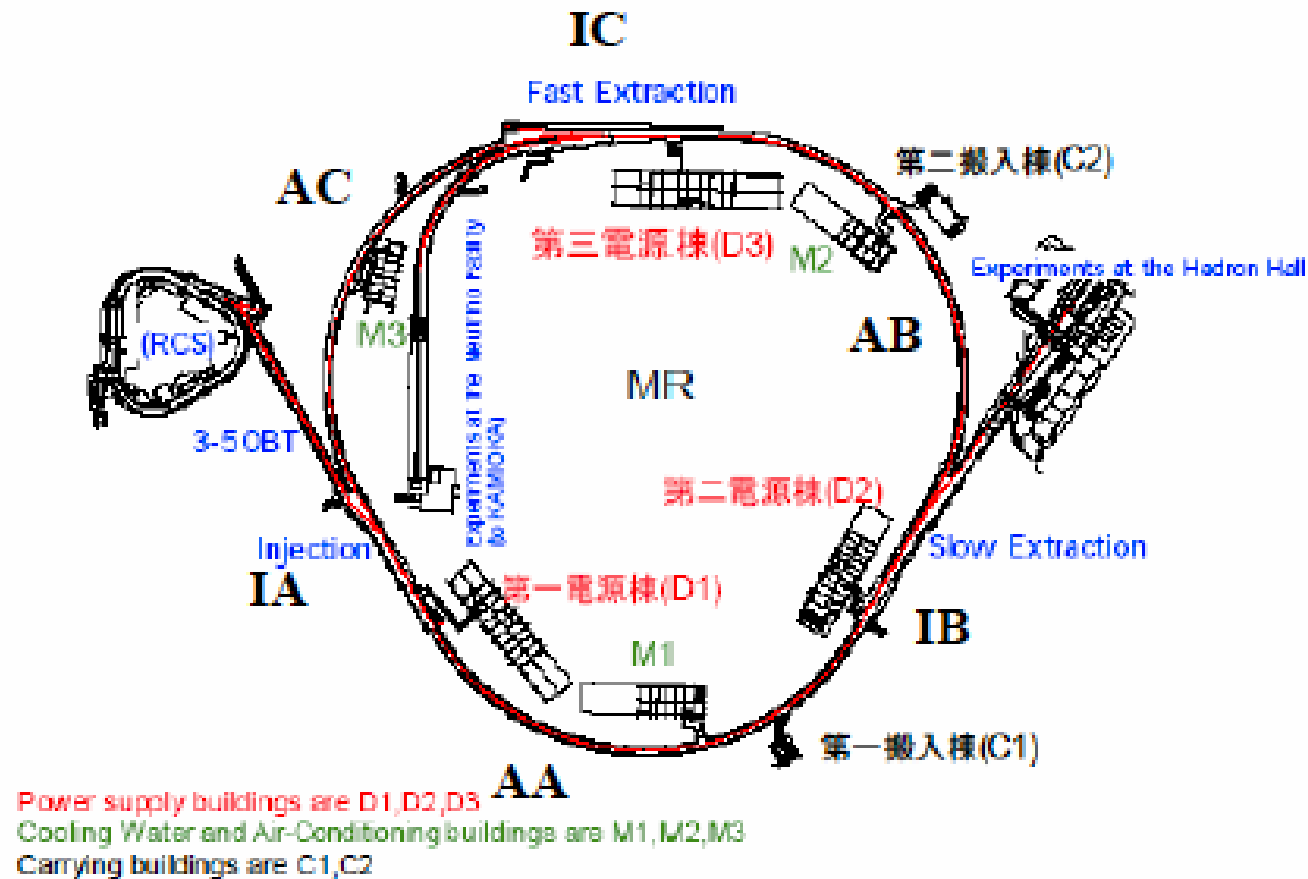
Switchyard

MR(slow cycling Main Ring synchrotron) overview

Circumference	1567.5 m
Superperiodicity	3
Repetition rate	0.3 Hz
Injection energy	3 GeV
Extraction energy	30 GeV (Day-one) 50 GeV (Second phase)
Harmonic number	9
Number of bunches	8
Transition γ	j 31.7
Typical tune	22.4, 20.8
Transverse emittance	
At injection	54 πmm-mrad
At extraction	10 πmm-mrad(30 GeV)
Number of dipoles	96
quadrupoles	216 (11 families)
sextupoles	72 (3 families)+8(slow ext.)
steerings	186
Number of rf cavities	6 10 (Second phase)
Beam power	0.75MW at 0.3 Hz, 50 GeV



Construction status of MR

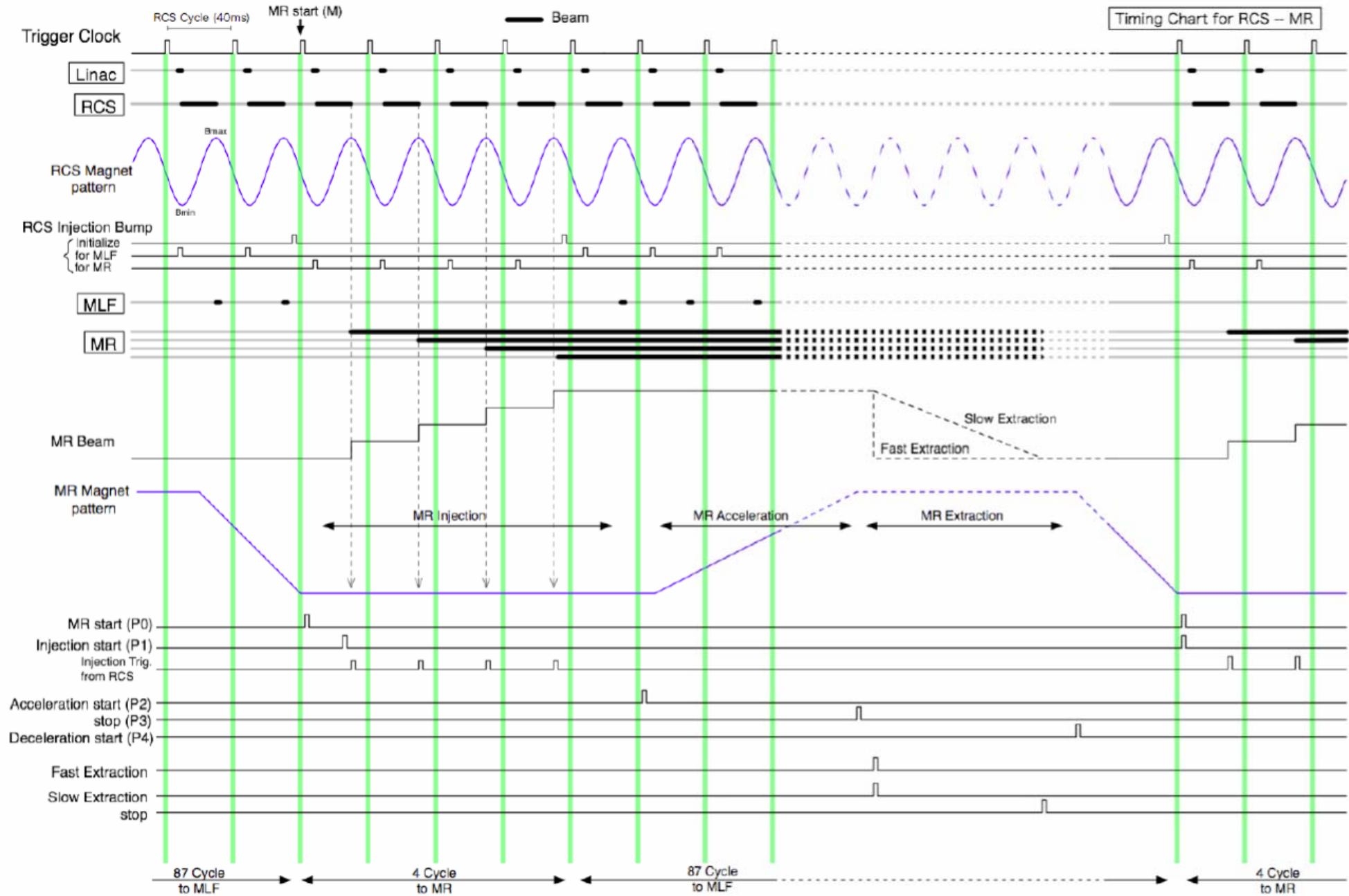


Civil construction of the accelerator tunnel has been completed at the end of June 2006.

Status of Installation

- | | | |
|----------------------------|---|-----------------------------|
| 1. Main Magnets | → | Arc-C,B and IC, 3-50BT |
| 2. Vacuum・BPM | → | Arc-C center、Arc-B progress |
| 3. Alignment | → | Arc-B, C finish |
| 4. Power supply (D3,D2,D1) | → | D3(50%)、D2(30%)、D1 (30%) |
| 5. Wiring | → | just start |

J-PARC加速器のタイミングチャート



Installation status (3-50BT)



BT collimator ($\sim 54\pi\text{mm.mrad}$)

QuickTimey C²
TIFFAILZWAj 0LiEñEçÉOÉaÉÁ
Ç™Ç±ÇÄsENE' EÉÇ%á@ÇÉÇZÇ¼Ç...ÇÖiKónÇ-ÇiÁB

Slope downstream of BT collimator

Installation status (MR)



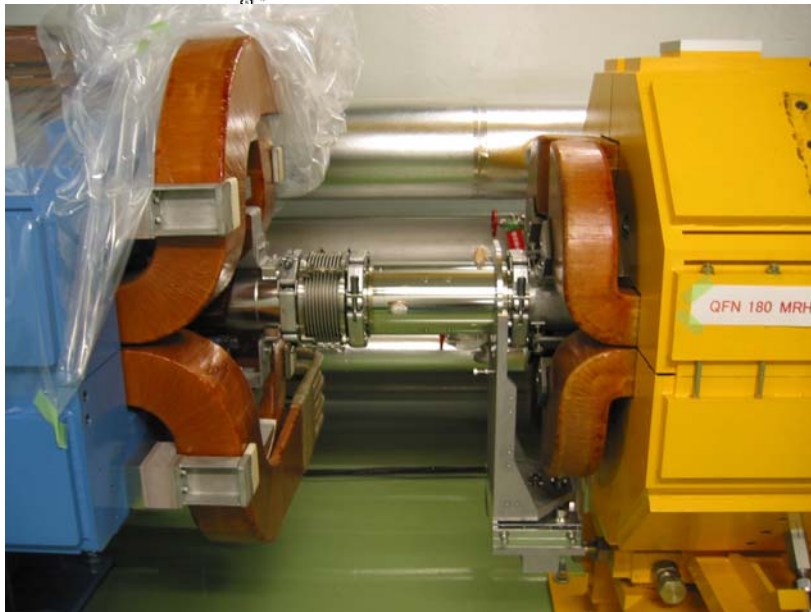
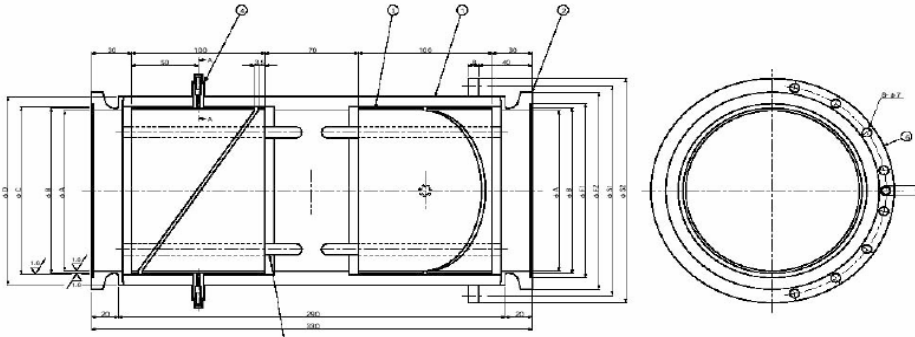
**Dipoles and quadrupoles in
Arc-C**



Vacuum evacuation test at Arc-B

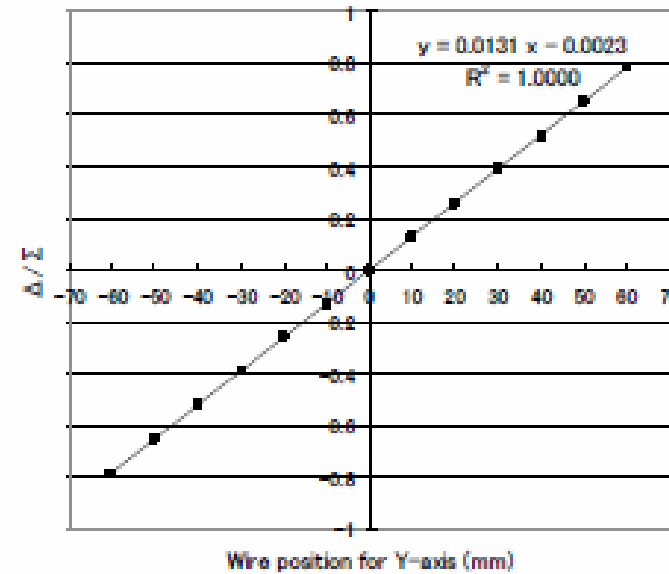
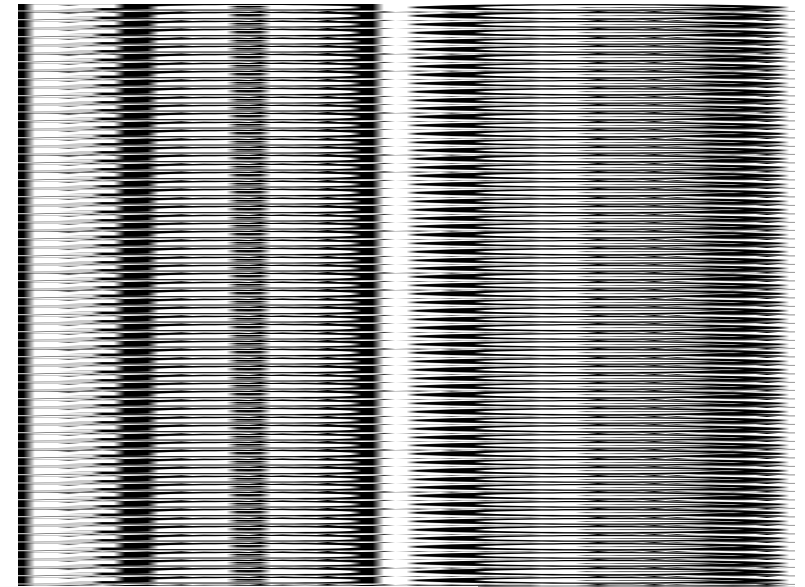
BPM

Pickup: Electrostatic Diagonal cut



Qの磁極端版に取り付けたサポートで固定

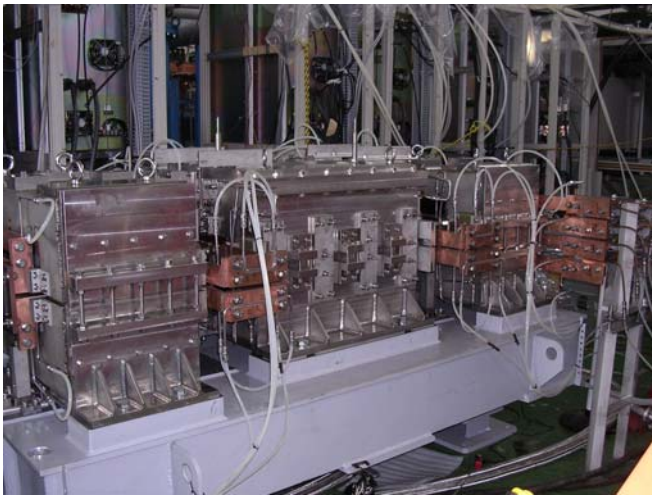
電極の校正
-ワイヤー法-



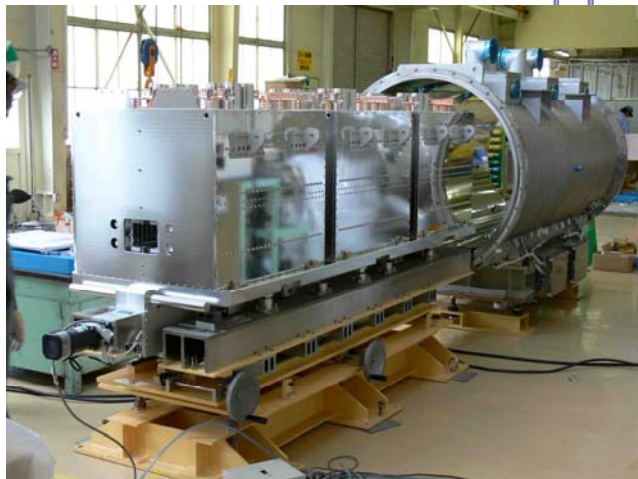
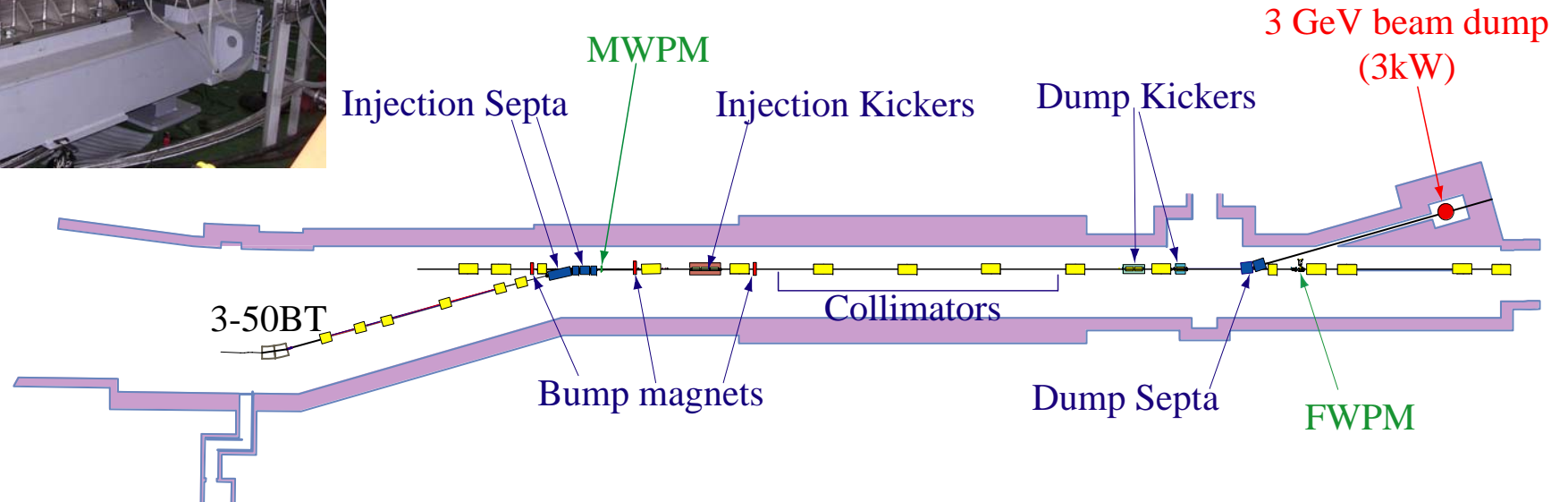
$\sigma \sim 50\mu\text{m}$

標準タイプ186台の校正を終了(東北大、東大、京大、RCNPグループのご協力に感謝)。
現在、インストール作業が進行中。

Injection devices



入射セプタムII(対向磁場セプタム)
長時間耐久試験中。
Alternative(うず電流型セプタム)も進行中。



入射キッカー
磁場測定、長時間試験



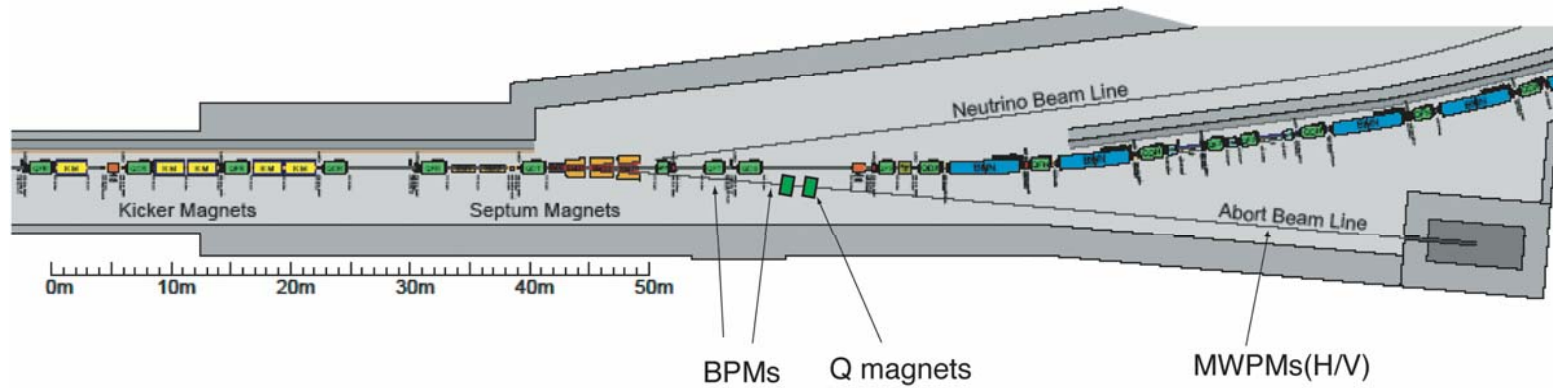
入射セプタムI
予備試験済み。今後、専用電源での長時間試験



ダンプセプタムI
周回側の磁気シールド強化

Fast extraction devices

5台のキッカー、8×2台のセプタムで取り出しビームはリング内側に、アボートビームは外側にけり出す。

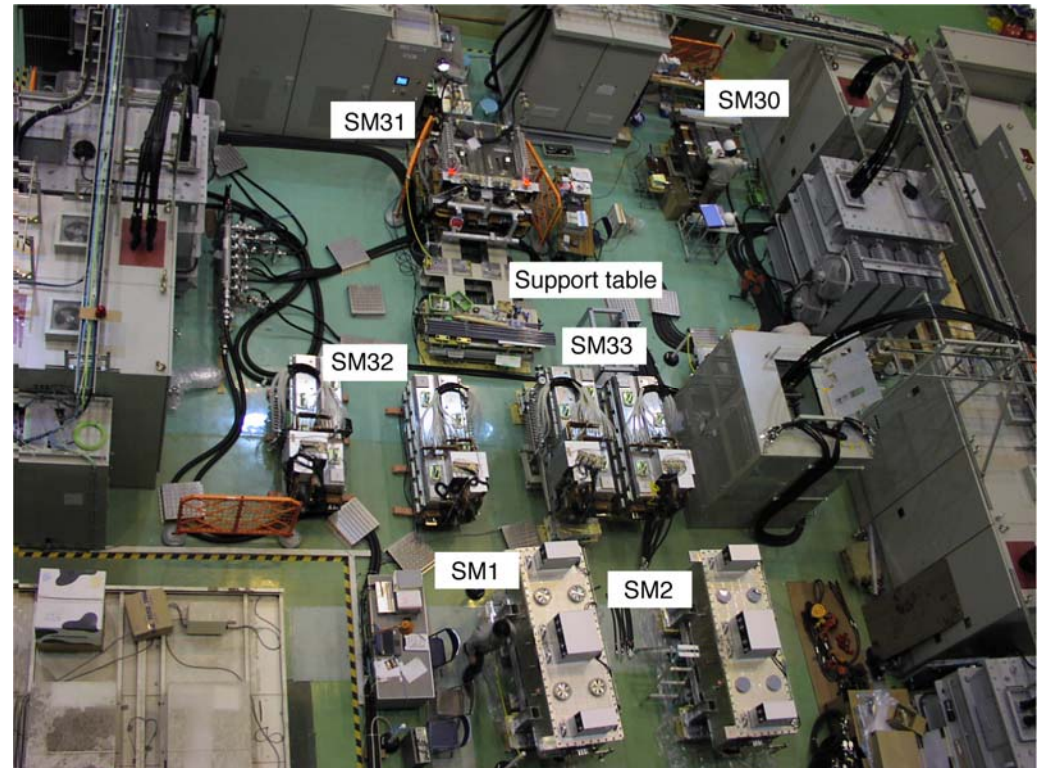


速い取り出しキッカー



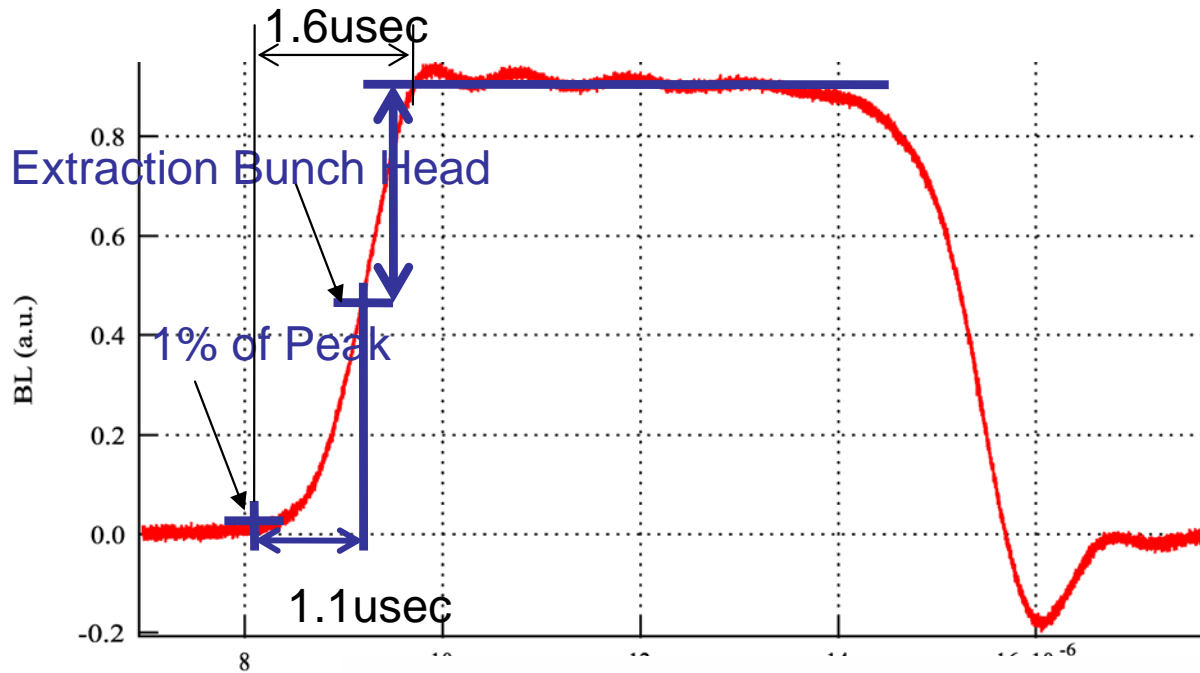
- ・立ち上がり
- ・キッカー内放電

速い取り出しセプタム



- ・SM1, 2のコイル支え用セラミックカラーの損傷

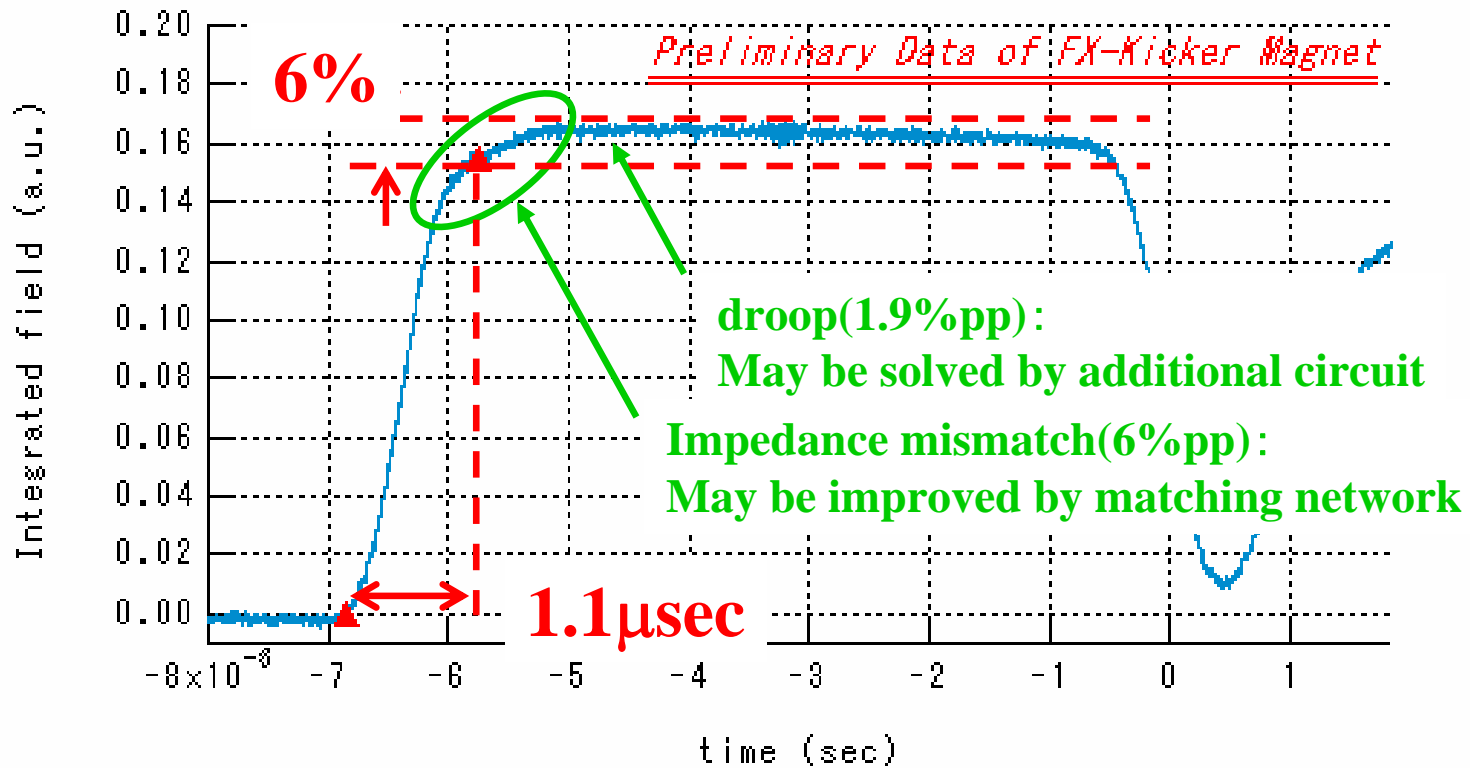
Slow rise time of the kicker magnet



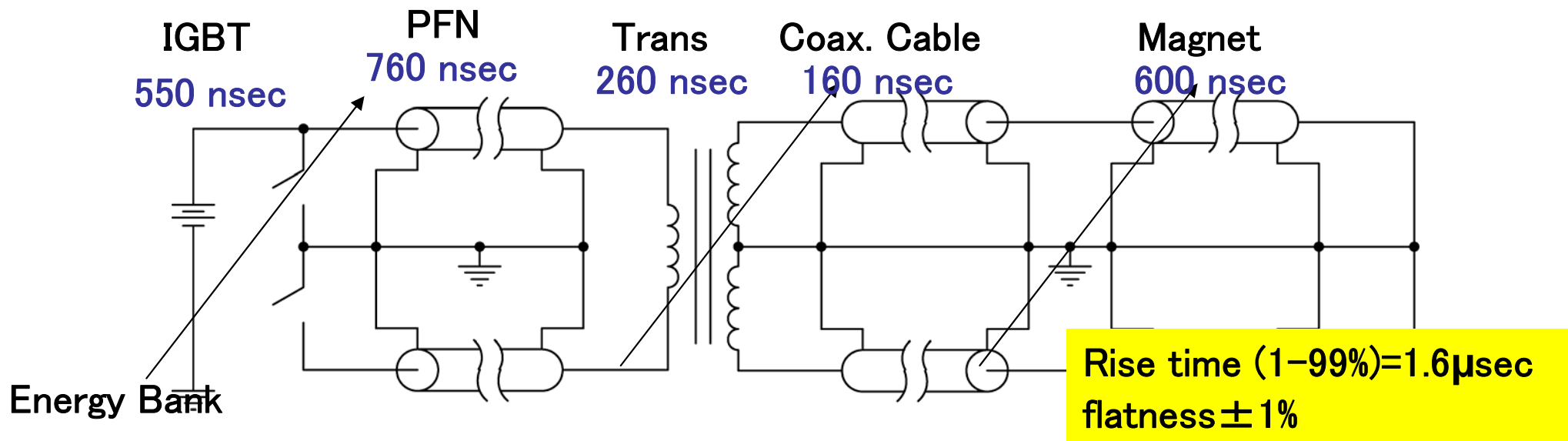
requirement

Rise time	<1.1 μ sec
flatness	1%

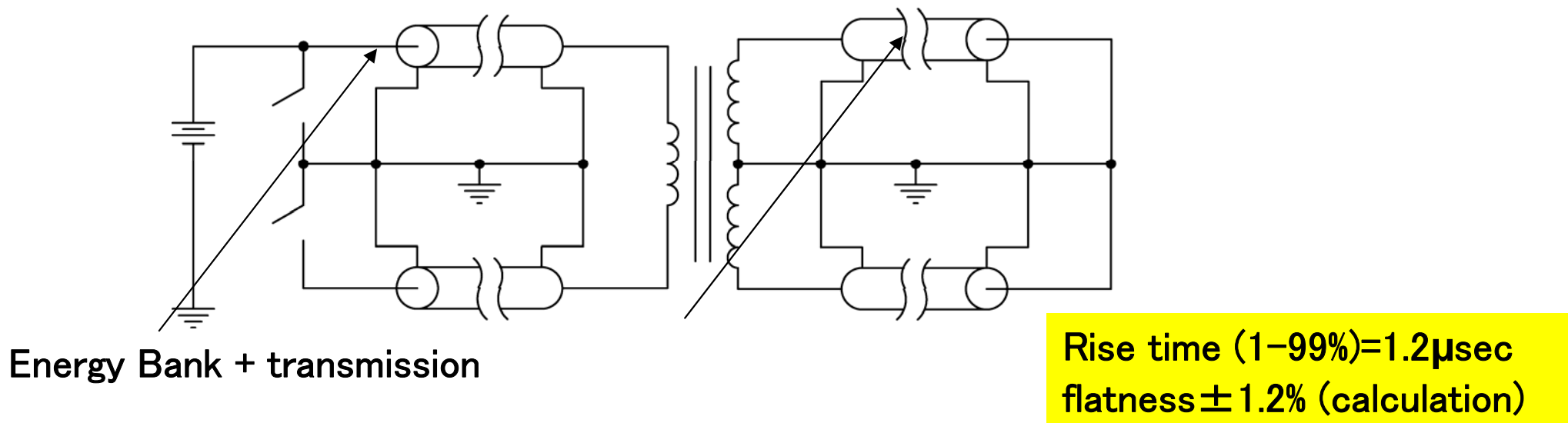
- ・電源の回路構成機器ごとの立ち上がり時間を測定。
- ・構成の見直しによる立ち上がり時間の改善



回路構成の見直し

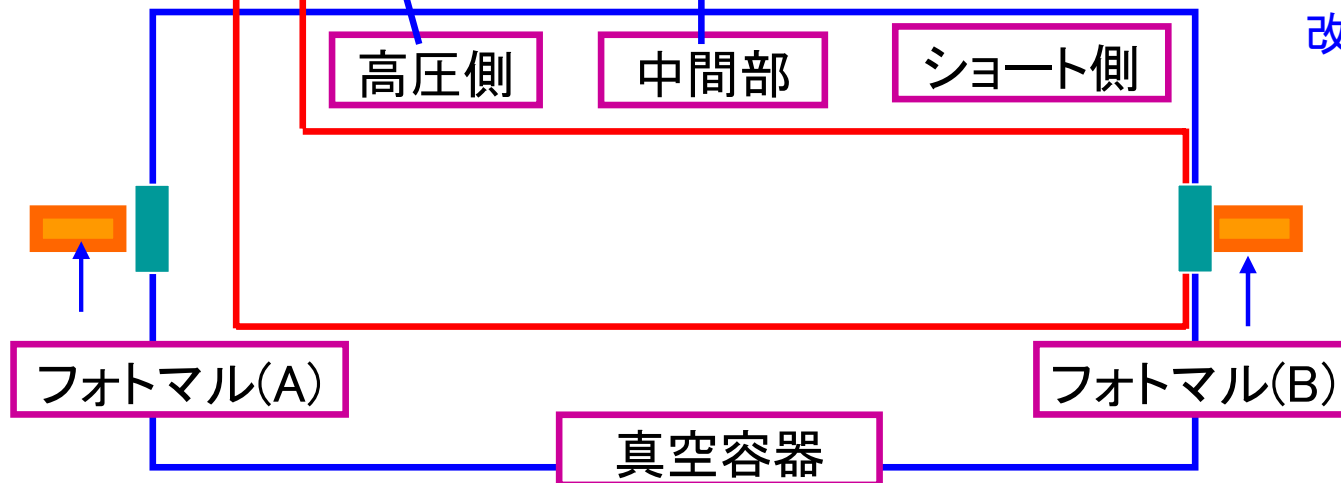
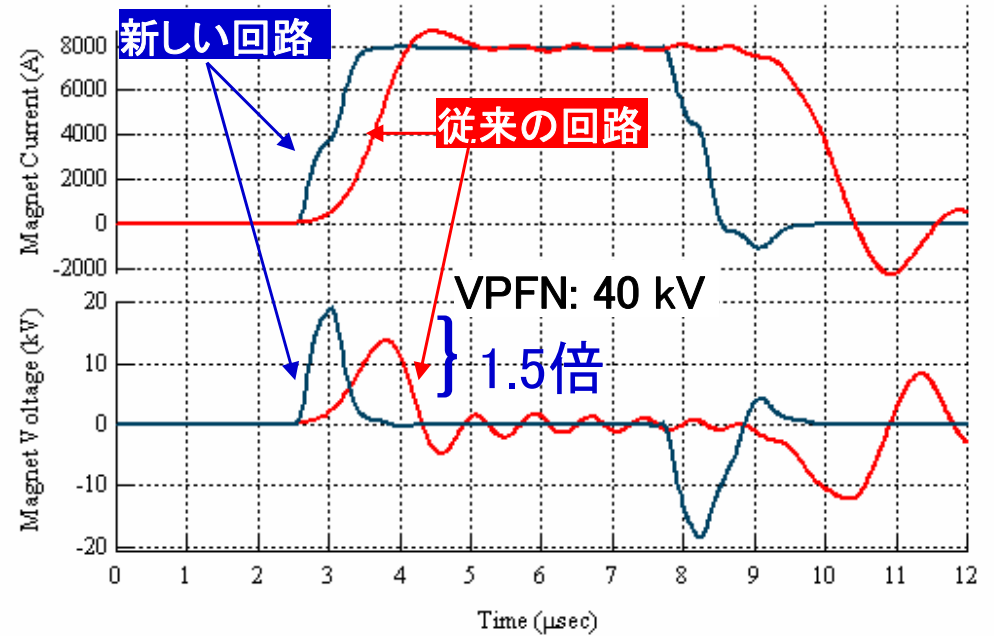
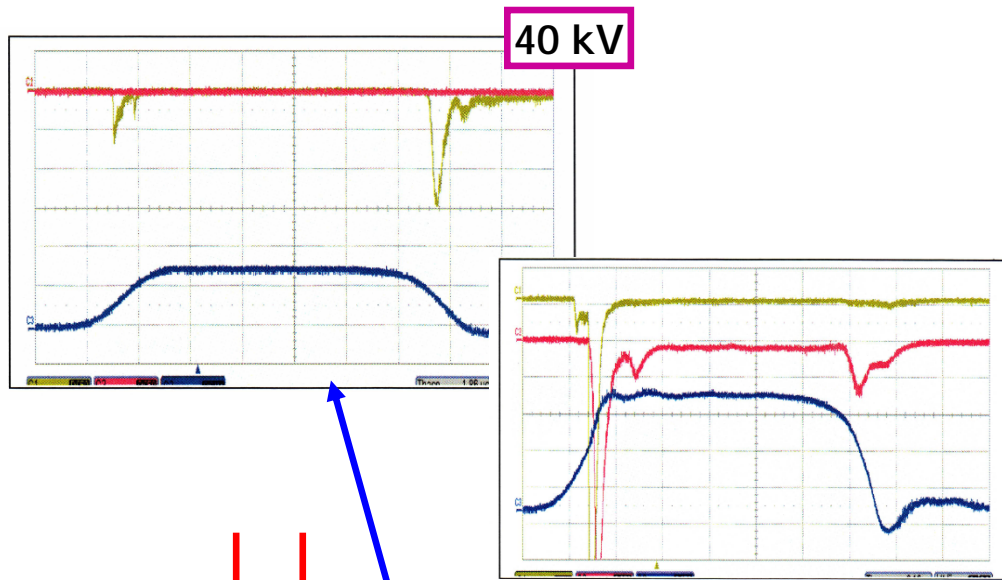


IGBT 550 nsec PFL (PFN) 160 nsec Trans 260 nsec Magnet 600 nsec ⇒ **remove PFN**



運転時に観測されるキッカー内放電

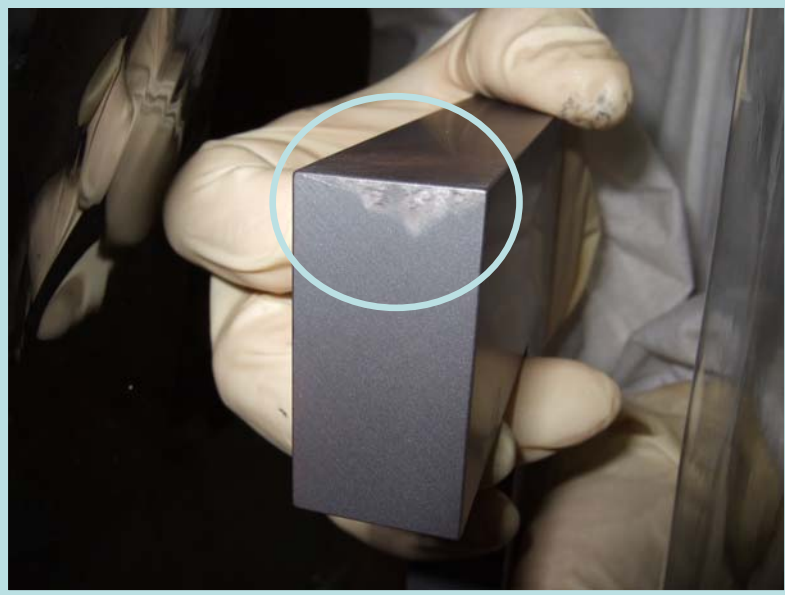
フェライト・電極に発生する電圧(計算結果)



改造後は改造前に比べて1.5倍に。

放電は立ち上がり時間の改善によって悪化

キッカー解体



フェライト端部、セラミック絶縁台座の端部面取り0.5 R→ 2Rに。
電極板端部の面取り3R→5Rに。最初の1台は5月に試験する。

遅い取り出し

- ・2007年度の単年度契約で以下の機器を製作
- ・仕様書の準備を終了。

Electro-static septum: R&D

Thin septum magnets, 1.5 mm, 3.5 mm, 7.5 mm : R&D

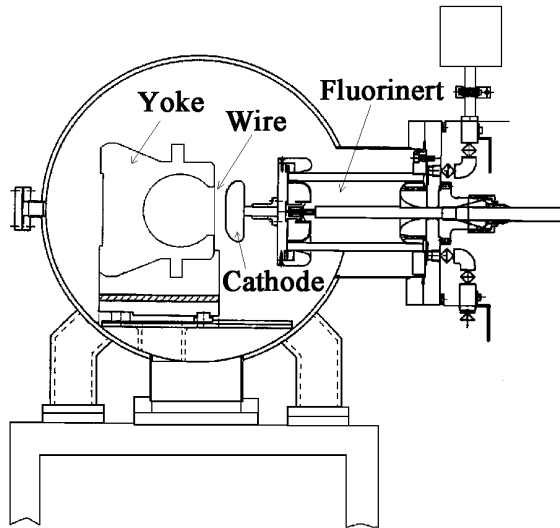
Strong field septum magnets, : fast extraction

Shift bump magnet: conventional

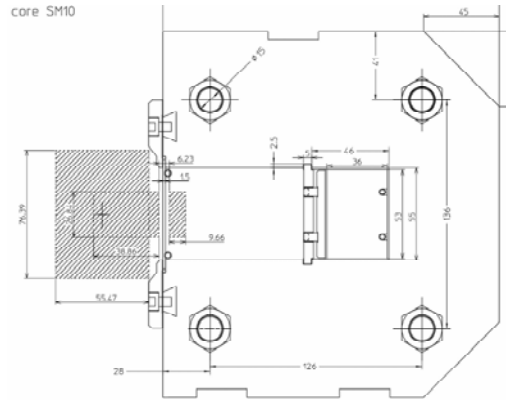
Power supplies; existing/conventional

MRのビームコミッショニング開始後、2008年の夏期停止期間中に設置予定。

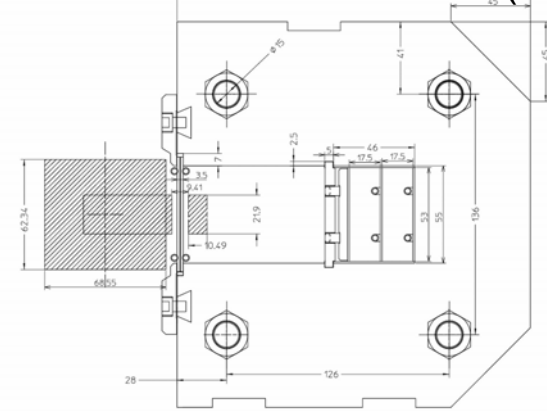
静電セプタムESS(2台)



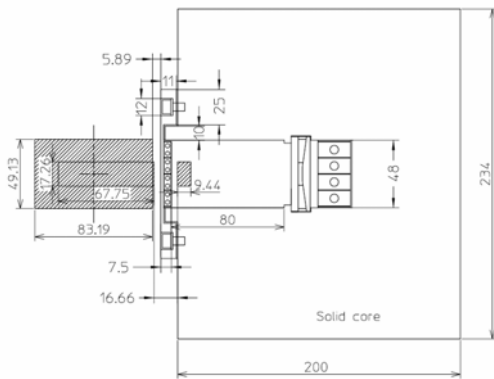
低磁場セプタムSM10(1台)



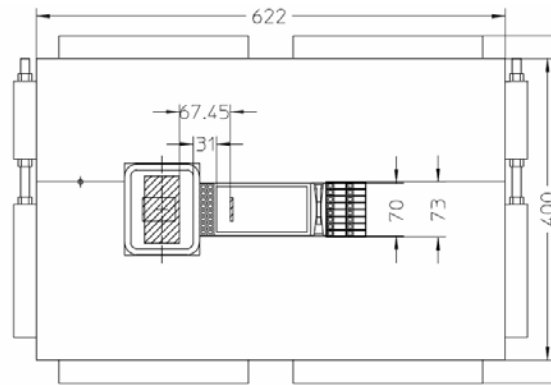
低磁場セプタムSM11(1台)



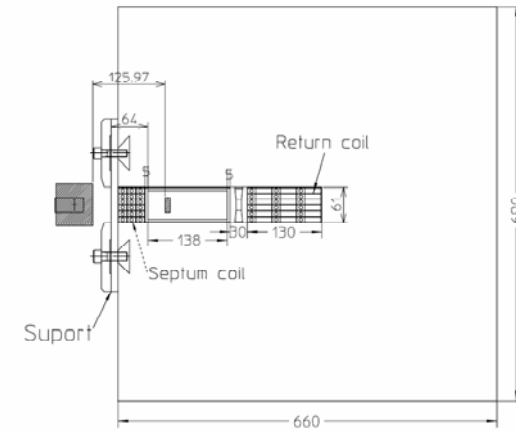
中磁場セプタムSM2(4台)



高磁場セプタムSM30,31(2台)



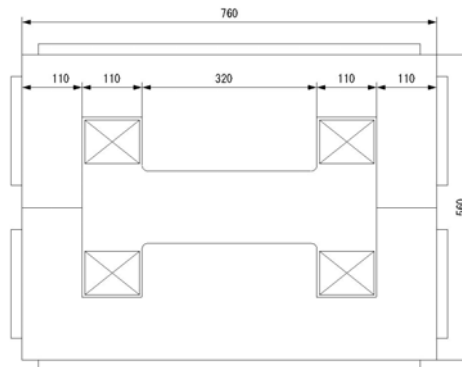
高磁場セプタムSM32,33(2台)



共鳴6極磁石(8台)



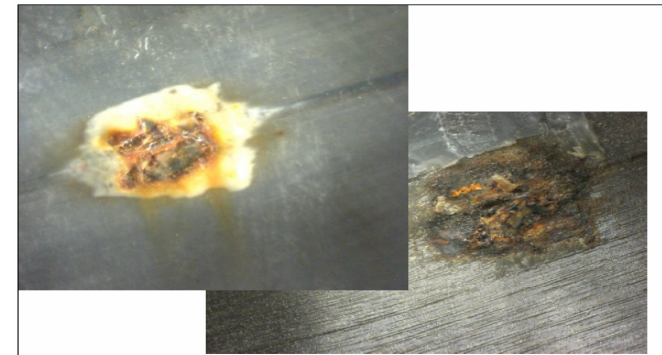
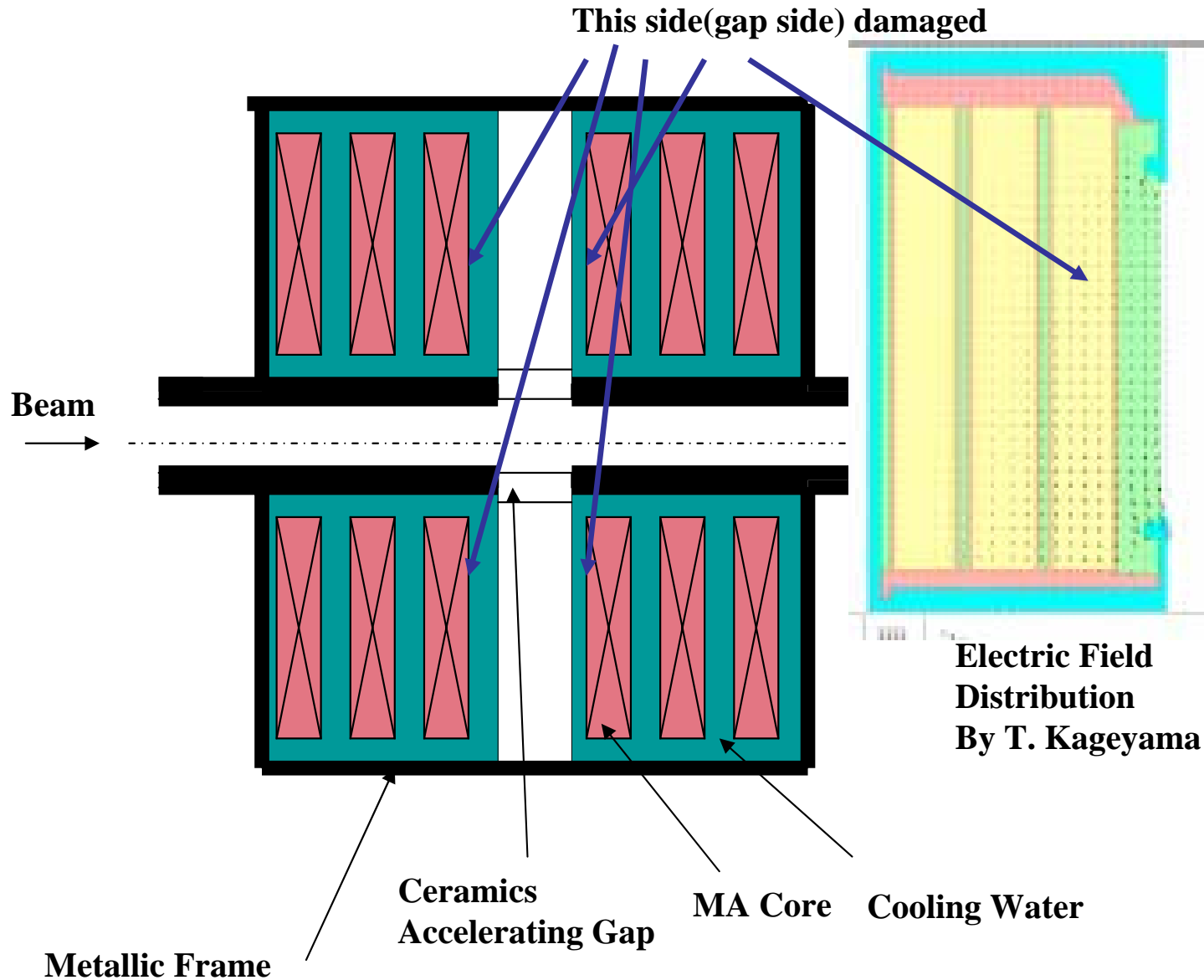
バンプ磁石(4台)



リングrfの状況

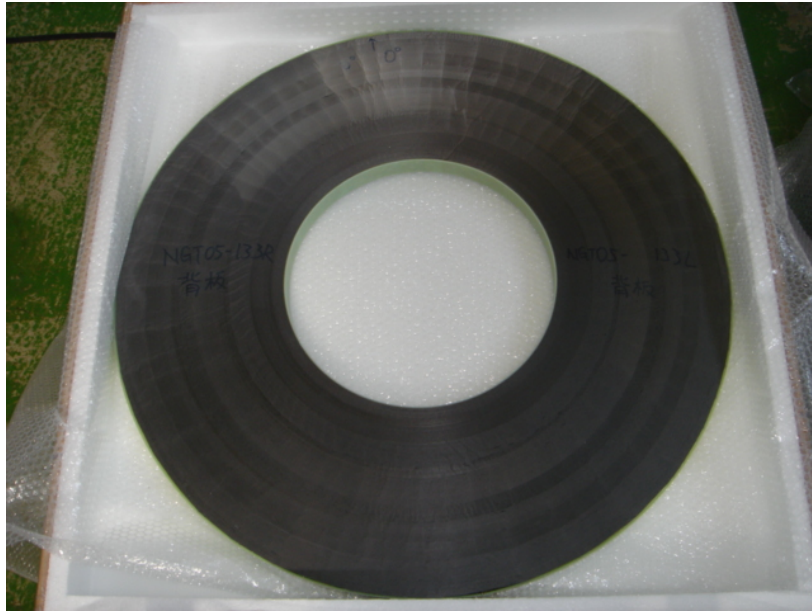
- ・ $\lambda/4$ 対向型空洞(3連で1タンク)
- ・ 磁性体にMA(magnetic alloy) : 高い高周波磁場のもとで μQ が変化しない。
体積当たりにより高い高周波電力を投入できる。~25kV/mが可能。

J-PARCでの問題点: 大電力運転でコアに損傷が生じる(特にギャップ側)。



- ・ 電場による損傷
- ・ コアの層間絶縁不良

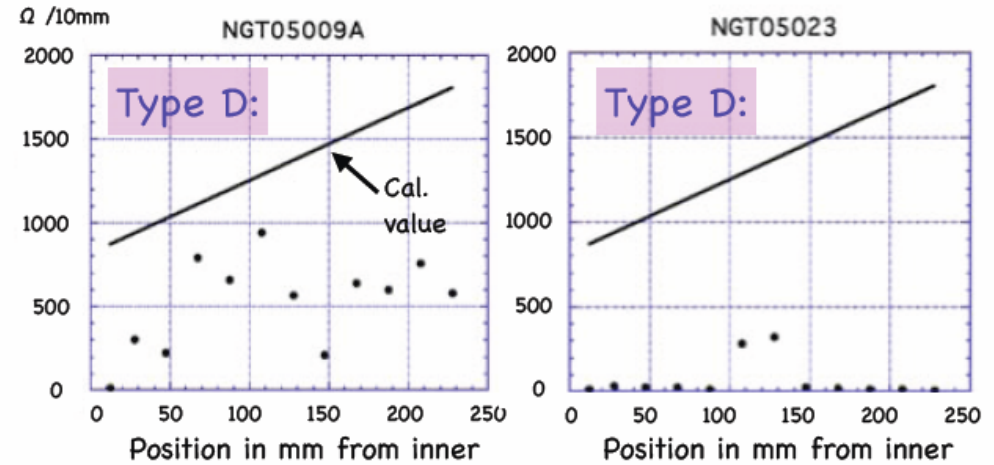
コアの製造工程の見直し



軟磁性材のテープにSiO₂の絶縁皮膜を塗布したのち巻き付ける。

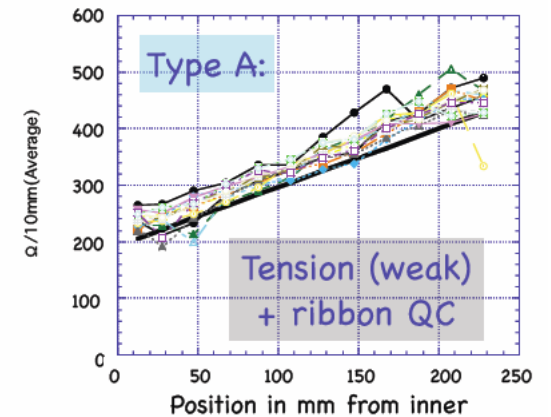
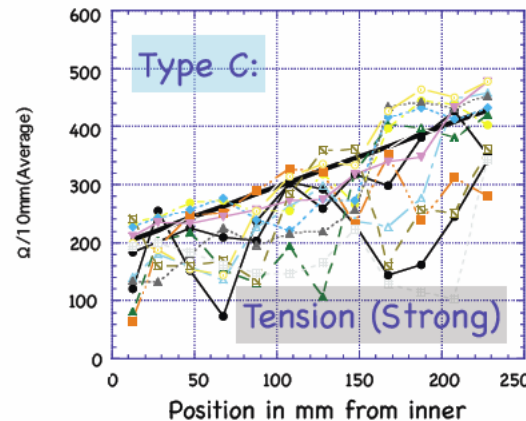
- ・コアの巻き方を変更
Vertical winding → horizontal winding
- ・リボンのQC
R>70%、表面のゴミ除去など
- ・カットコア(MR)切断面処理を変更
WJ+ドライ研磨

Vertical Winding

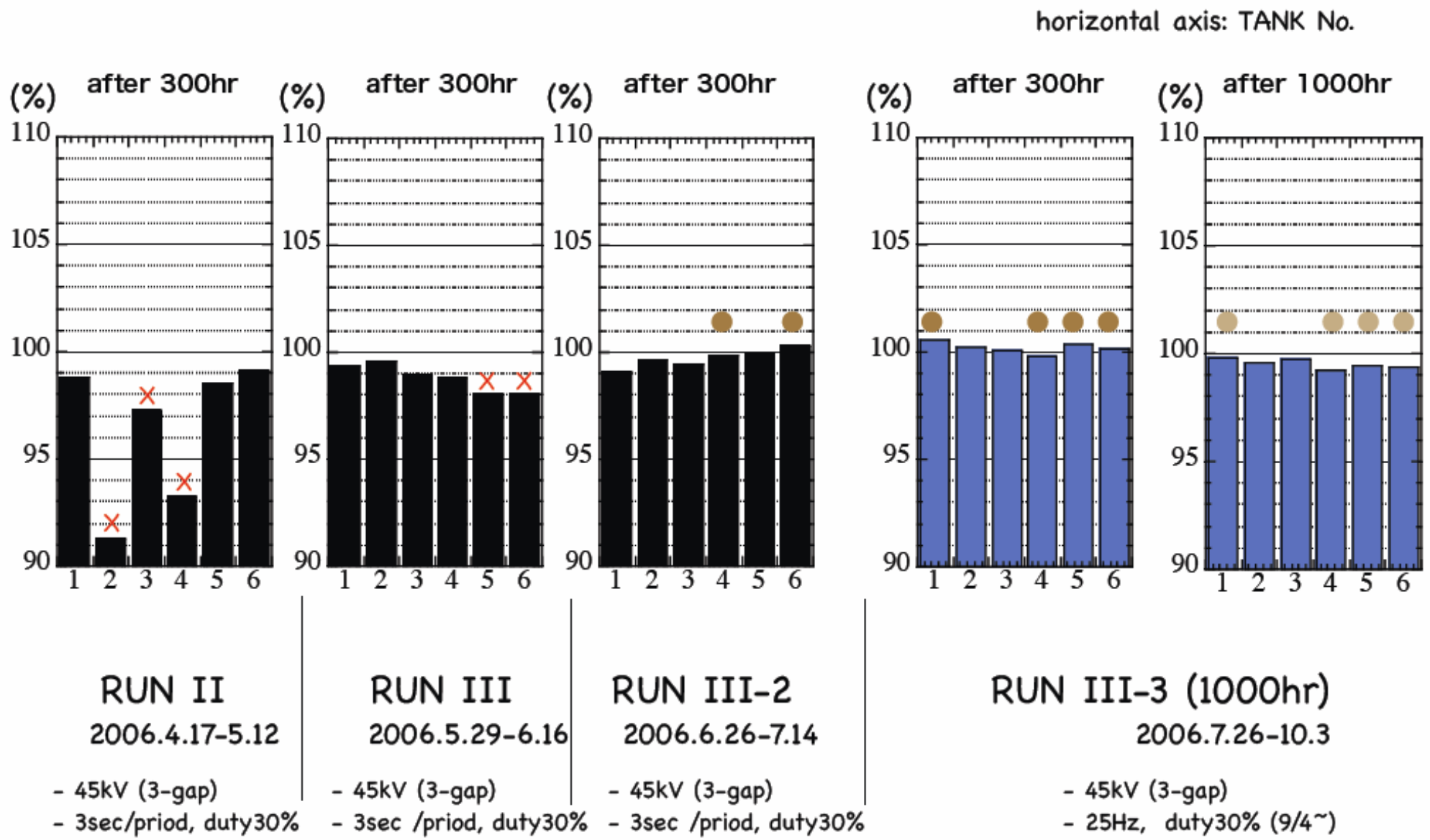


Tension (Strong)

Horizontal Winding



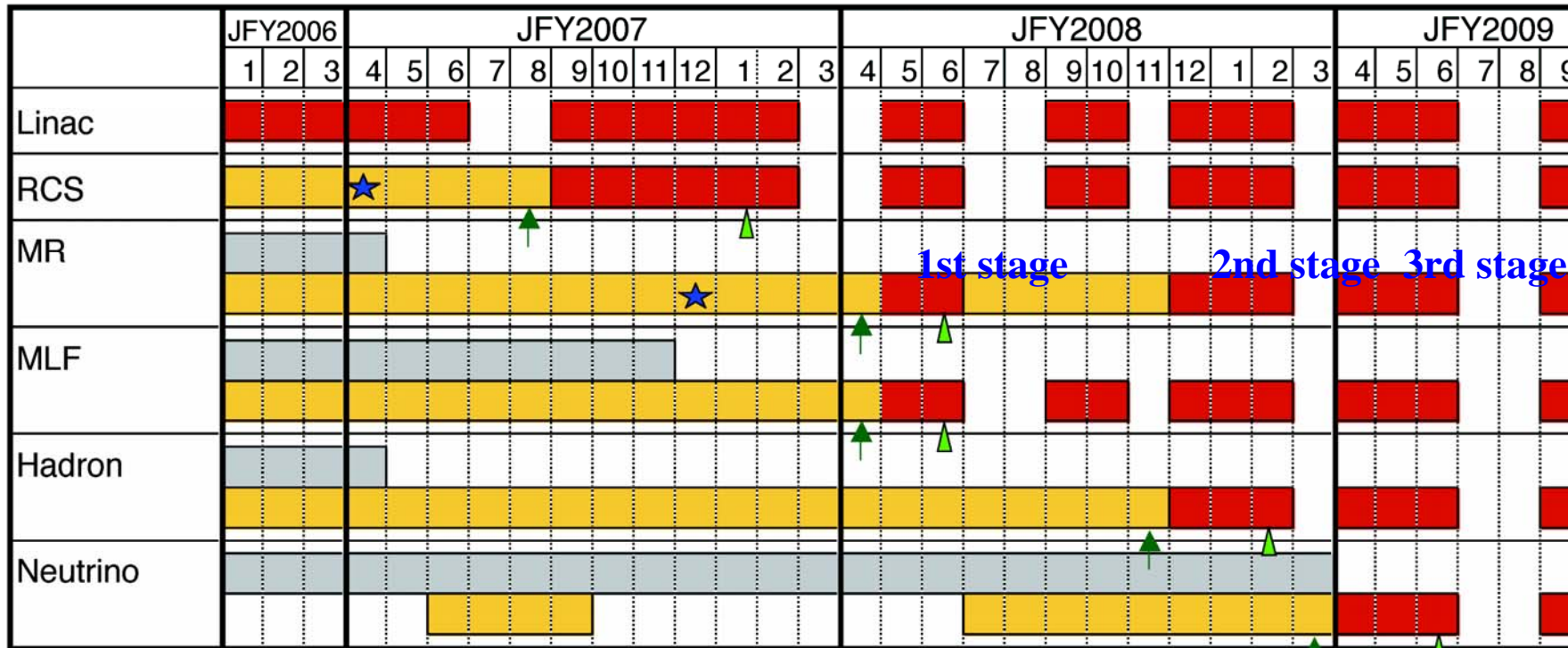
RCS用アンカットコアの長時間通電試験



X: A damaged core found in the tank

Schedule of construction and commissioning

- not official -



[Red Box] Beam

[Yellow Box] Installation / Off beam commissioning

[Grey Box] Building construction

[Blue Star] Start of off beam commissioning

[Green Up Arrow] Government inspection of PPS

[Green Triangle] Government inspection of radiation shield under beam operation

2007年9月: RCSビームコミッショニング開始

第1段階(07年9月~08年3月) 入射調整、閉軌道確立、rf捕獲、加速、25 Hz運転

第2段階(08年5月~) MR/MLFへのビーム供給、ペインティング入射、ビーム強度増強

2008年5月: MRビームコミッショニング開始

第1段階(08年5月~6月) 入射調整、閉軌道確立、rf捕獲、(加速)

2008年7月~11月: 遅い取り出し機器インストール、NUビームラインの超伝導電磁石ほかインストール

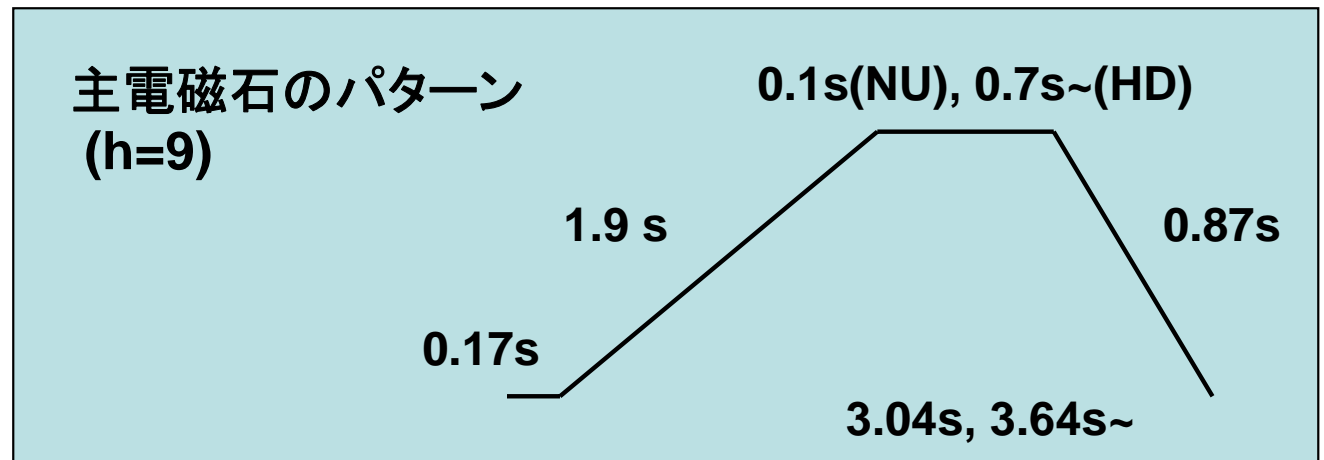
第2段階(08年12月~09年2月) 加速、遅い取り出し、HDビームライン立ち上げ

第3段階(09年4月~) 速い取り出し、NUビームライン立ち上げ

Parameters of MR on day-one

Injection energy	3 GeV
Extraction energy for HD	30 GeV
Extraction energy for NU	30 GeV
Typical repetition period	3.04 sec (NU), 3.64 sec~ (HD)
Injection	0.17 sec
Acceleration	1.9 sec
Flat top for HD	0.7 sec (typical)
Flat top for NU	0.1 sec
Reset	0.87 sec
Harmonic number	9
Number of bunches	probably 6 * (due to the rise time of Fx kicker)
Number of rf cavities	6

***If we can solve the kicker problem, the number of bunches is 8.**



Initial operation and intensity upgrade plan

Tuning for the HD users

Extracted beam power will be increased gradually keeping a low beam loss criterion (For example, ~ 100 W).

Requirement from the T2K collaboration

Up to the **2010 summer shutdown**, 0.1MW operation for $>10^7$ sec (several months) is required in order to publish the first result of the long baseline experiment with large impact.

Initial intensity upgrade plan in the MR

The way to increase intensity without hardware replacements is to **increase repetition rate**. The repetition rate is limited by the power supplies of the main magnet system. The maximum repetition rate is **0.5 Hz (~ 2.0 sec) for 30 GeV**. (Seven rf systems are preferable for safety margin.)

$E=30$ GeV, $h=9$ (6 bunches);

Rep=2.0 s: $P_{MR}=0.1$ MW for $P_{RCS}=0.17$ MW

Rep=3.0 s: $P_{MR}=0.1$ MW for $P_{RCS}=0.25$ MW

まとめ

リニアックは2006年11月からビームコミッショニングを開始し、181MeV運転を達成した。今後はビーム強度増強を進める。

RCS/MRは機器のインストールが大詰め。

RCSは2007年4月からオフビームコミッショニング、9月からビームコミッショニング。

MRは2007年12月からオフビームコミッショニング、08年5月からビームコミッショニング。

J-PARC 加速器の建設にご協力いただいている以下の実験グループの方々に感謝いたします。

東北大・田村グループ

東大ICEPP・山下グループ

京大・中家グループ、(旧)齋藤グループ

阪大RCNP村松グループ

素核研有志の方々