



# J-PARC 3-50BT B15D電磁石 の層間短絡

J-PARC BT&MR Group, Masashi J. Shirakata

KEK/J-PARC

THOH06, PASJ16 (31<sup>th</sup> July to 3<sup>rd</sup> August)

京都大学吉田キャンパス

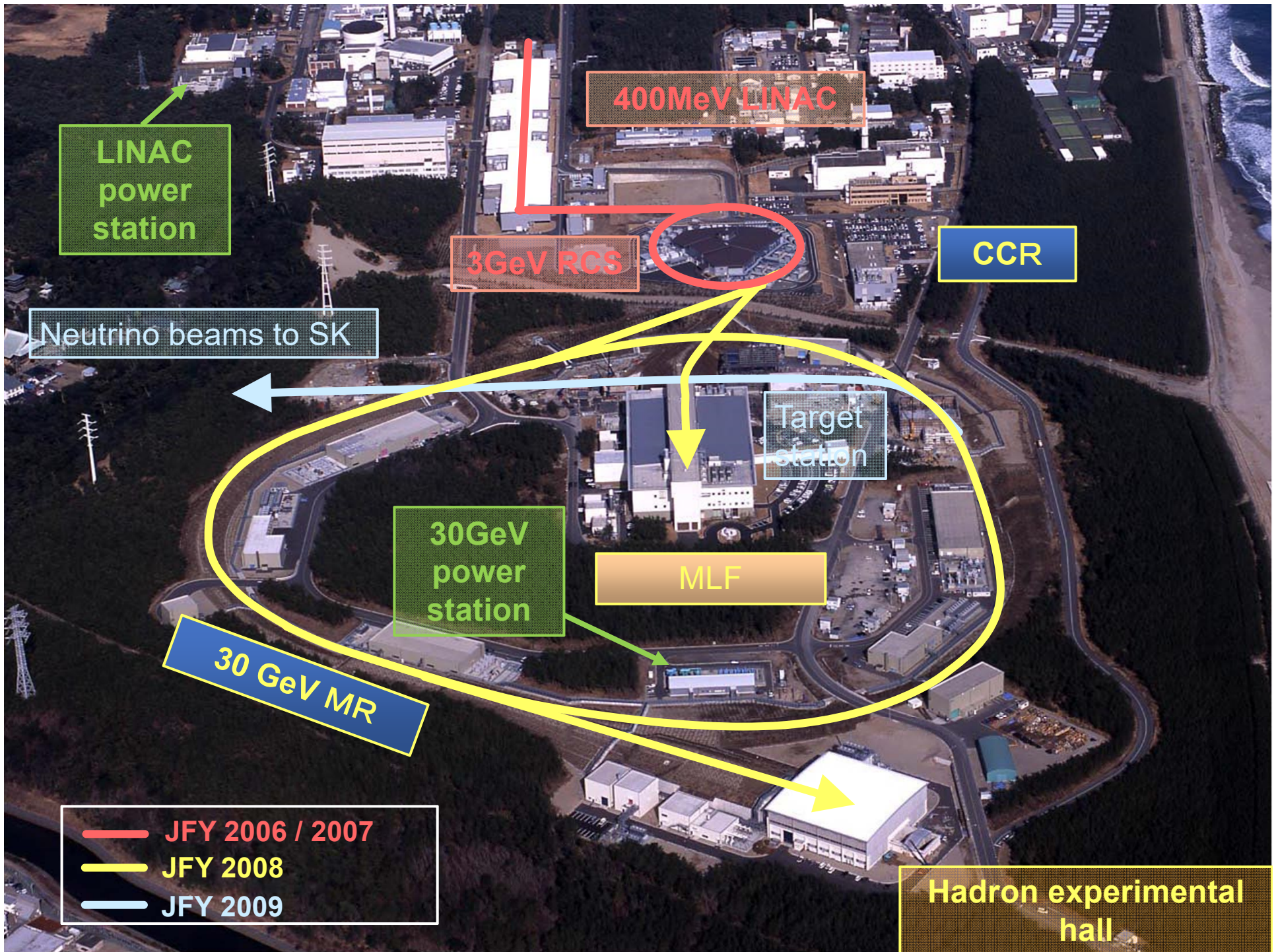
京都市左京区吉田本町36

# Contents

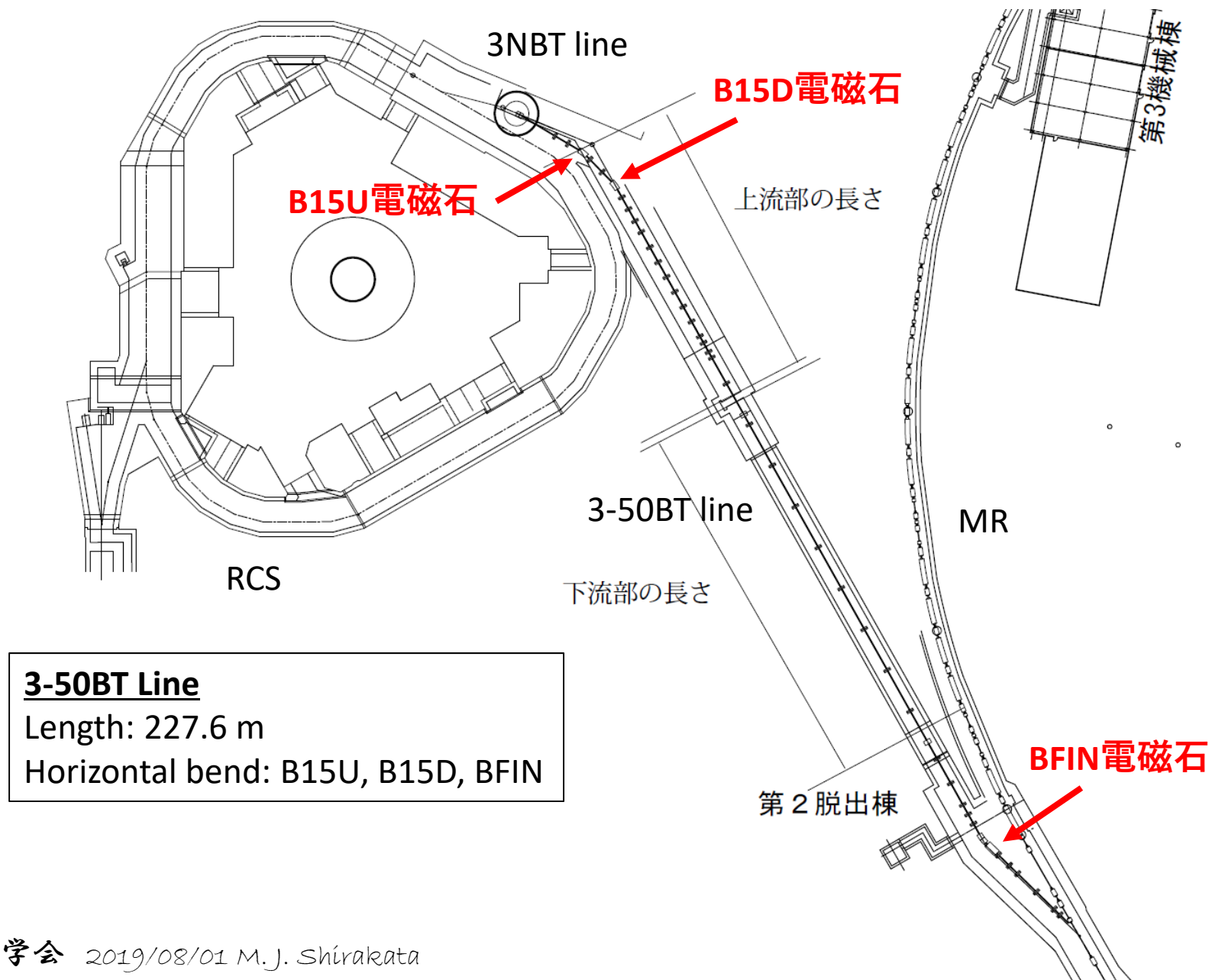
- **J-PARC 3-50BTラインの概要**
- **B15D偏向電磁石の不具合**
  - 不具合発生時の状況
  - 不具合調査
- **対処（7月までの応急処置）**
- **ビーム再開とその後の経過**
- **まとめ**

A stylized logo consisting of several green, fan-like segments arranged in a circular pattern around a central white circle. A blue oval is positioned at the top of the arrangement.

# J-PARC 3-50BTラインの概要

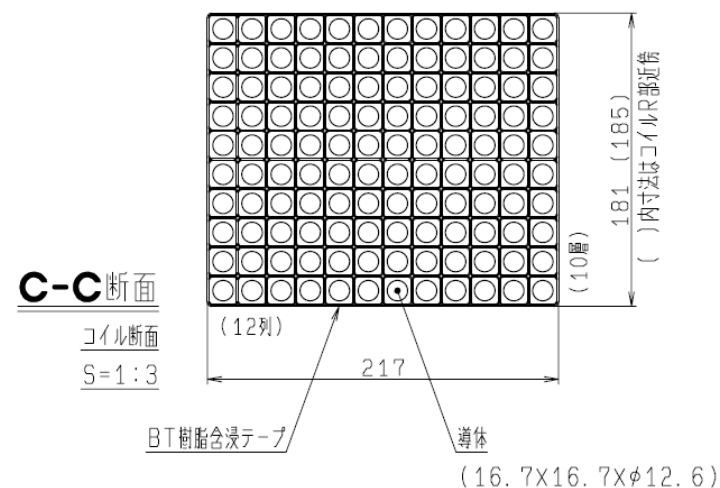


# 3-50Beam Transport Line (3-50BT)



# B15D電磁石とは

3-50BTラインの15度偏向電磁石の**2台目**  
H型二極電磁石  
コイル数： 2（上下）  
重量： 17 ton（鉄芯 15 ton + コイル 1 ton × 2）

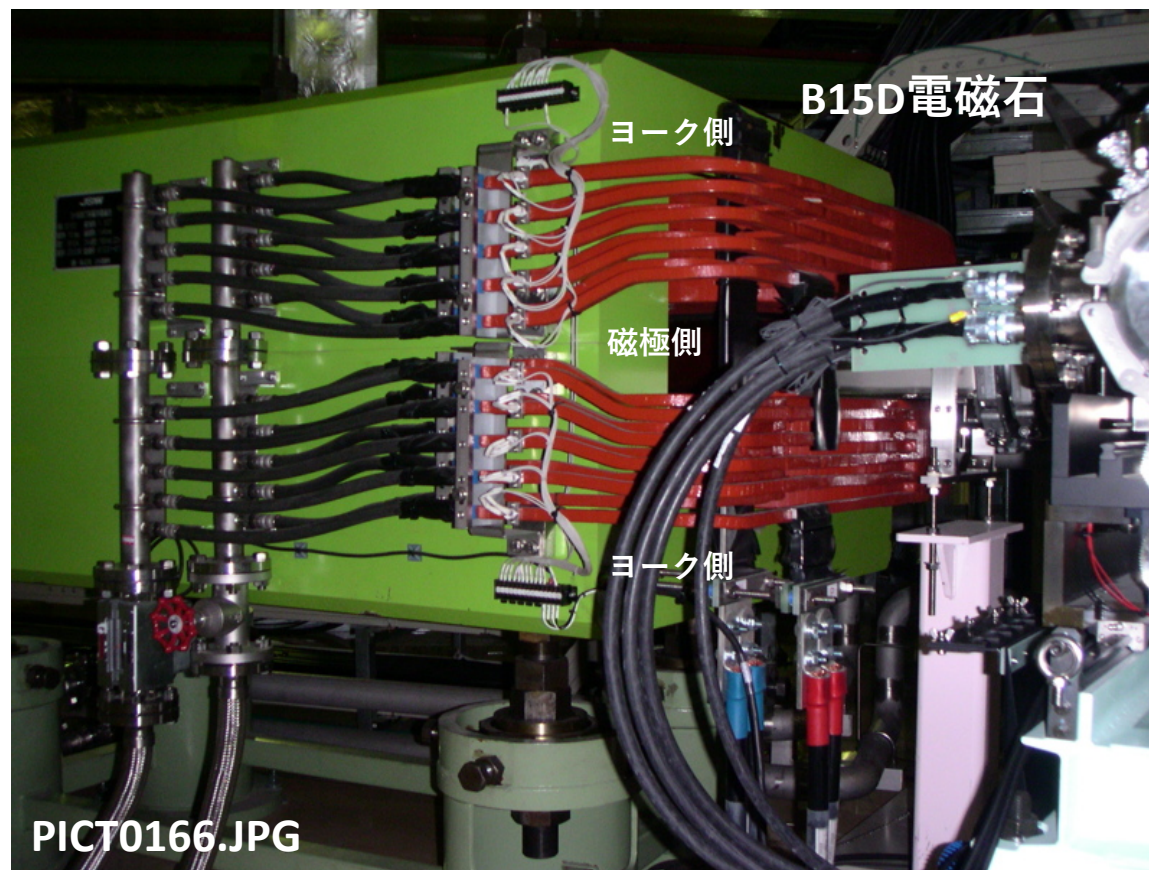


## B15D 偏向電磁石の仕様

インダクタンス： 598 mH  
抵抗： 177.4 mΩ  
ケーブル接続： 325sq 2-pair  
ケーブル抵抗： 22.7 mΩ

使用電流： 750 A  
使用電圧： 120 V

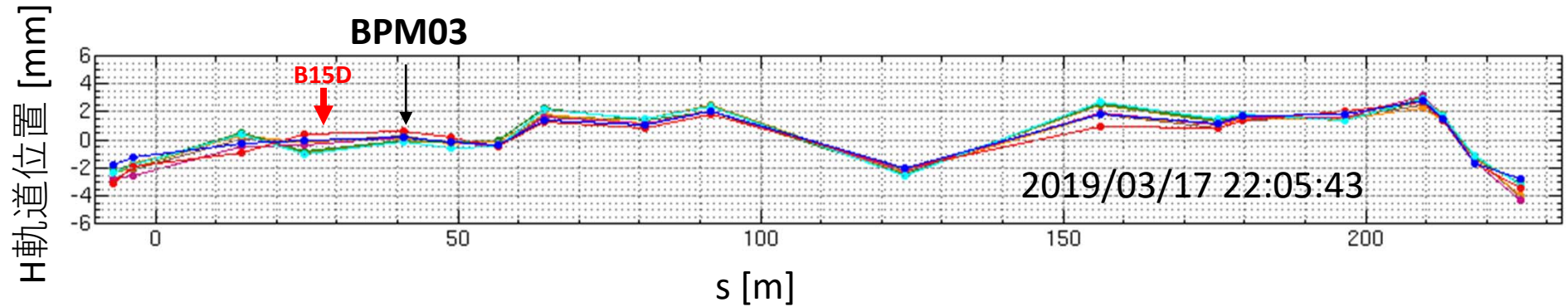
12列2層（1段）毎に口出しがあり、温度スイッチの場所で段間電圧の測定が容易



The background features a large, stylized green shape resembling a fan or a stylized letter 'B' with a fine grid texture. A solid blue oval is positioned at the top center of the green shape. The text is centered horizontally and vertically within the white space of the green shape.

# B15D 偏向電磁石の不具合

# 不具合発生時の状況

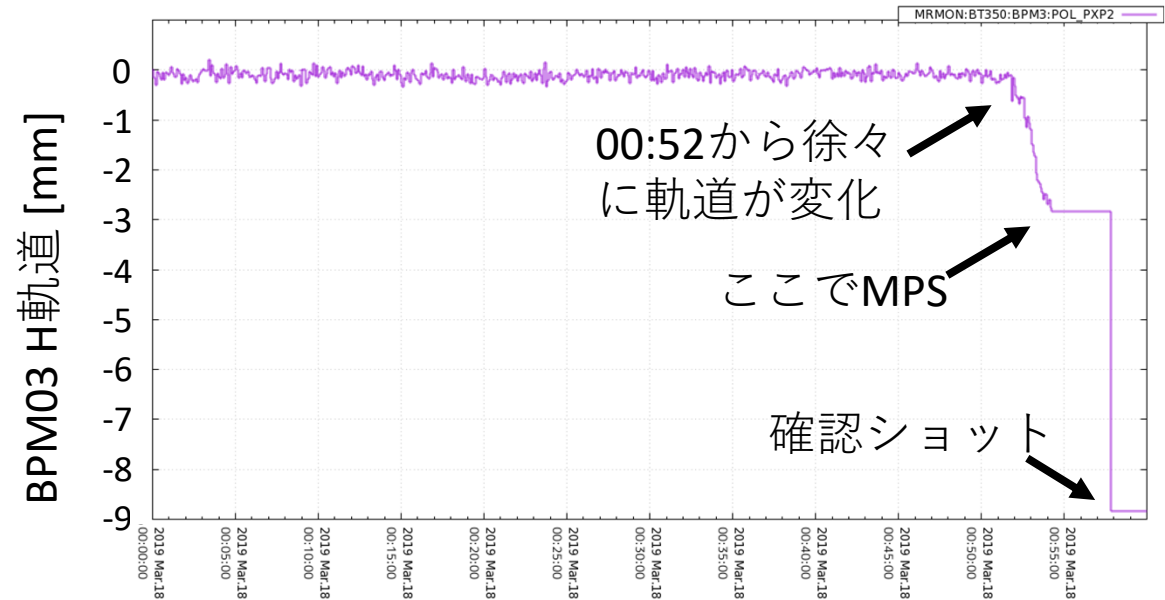


2019年3月18日00:54

MR BLM10でMPSが発報  
軌道を確認したところ、BPM03のところから軌道が左側（MRからみて内側）にずれていた

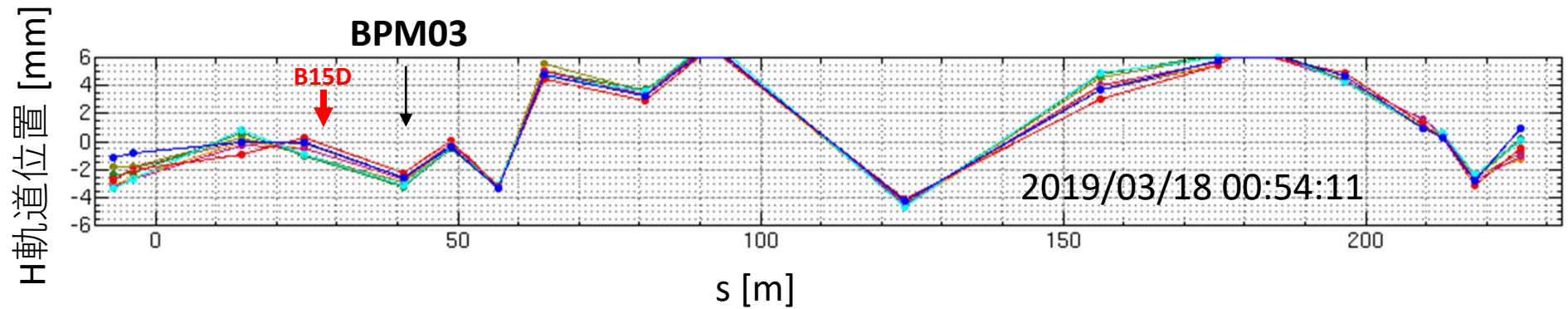


00:57に確認のため1-shot撃ったところ、状況がかなり悪化していたため、運転中止とした





# 不具合発生時の状況

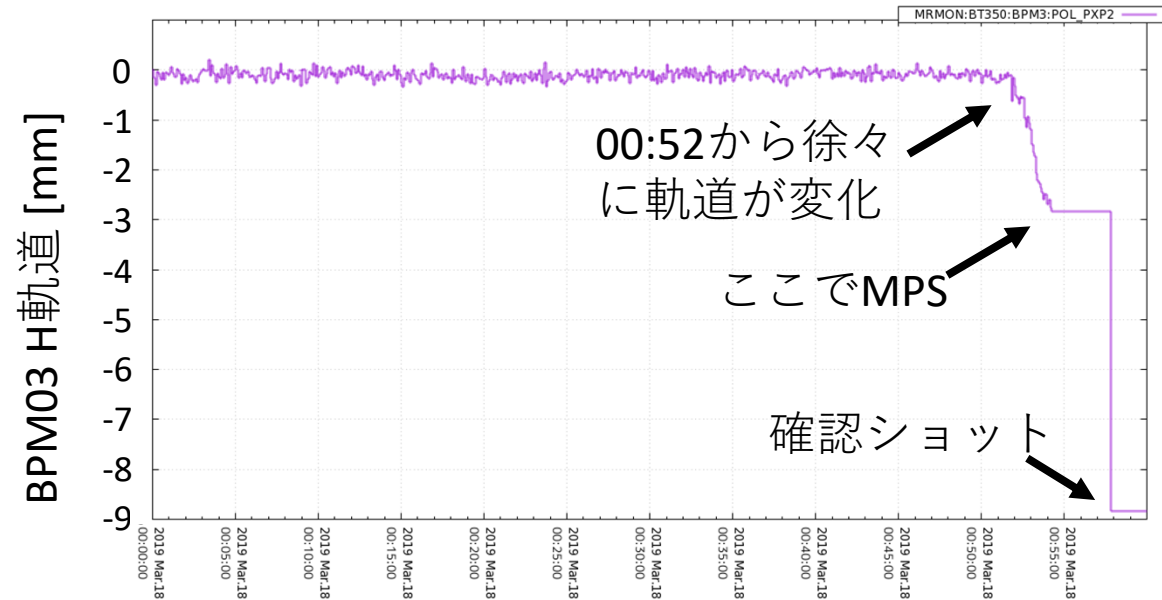


2019年3月18日00:54

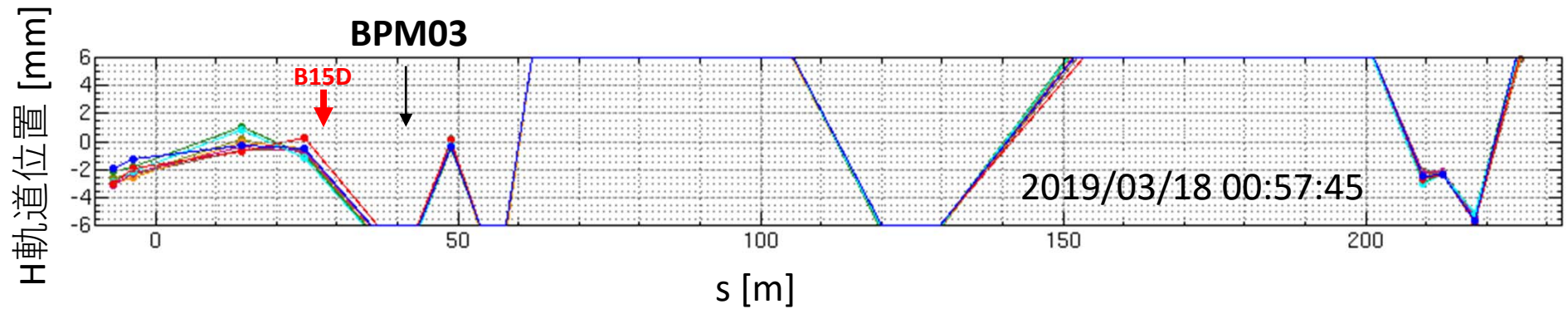
MR BLM10でMPSが発報  
軌道を確認したところ、BPM03のところから軌道が左側（MRからみて内側）にずれていた



00:57に確認のため1-shot撃ったところ、状況がかなり悪化していたため、運転中止とした



# 不具合発生時の状況

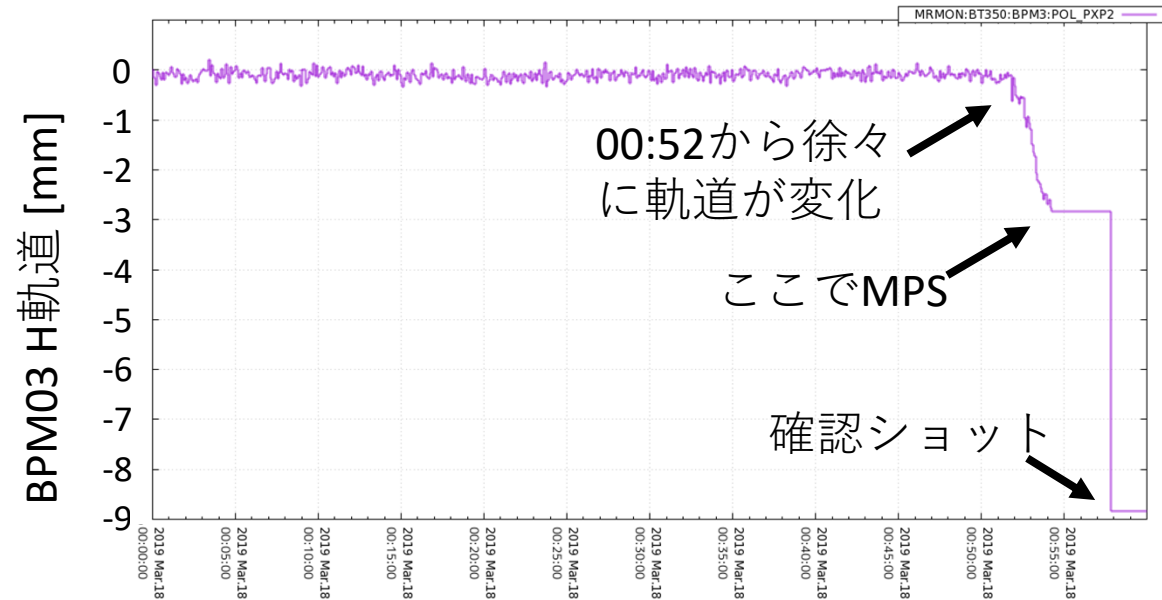


2019年3月18日00:54

MR BLM10でMPSが発報  
軌道を確認したところ、BPM03のところから軌道が左側（MRからみて内側）にずれていた



00:57に確認のため1-shot撃ったところ、状況がかなり悪化していたため、運転中止とした



# 現場確認と問題の切り分け

希望的観測（対処が簡単なものから）

- 外的要因（電極になにかが触れている）
- 電源の不具合（電流制御異常）
- ケーブルの不具合（絶縁不良、地絡）

# 現場確認と問題の切り分け

希望的観測（対処が簡単なものから）

- 外的要因~~×~~（電極になにかが触れている）
- 電源の~~×~~不具合（電流制御異常）
- ケーブル~~×~~の不具合（絶縁不良、地絡）



やはりB15D電磁石本体？

ただし、外観異常無し、コイルの地絡無し、抵抗値異常無し

# インピーダンス測定

Impedance Analyzer: HIOKI IM3570

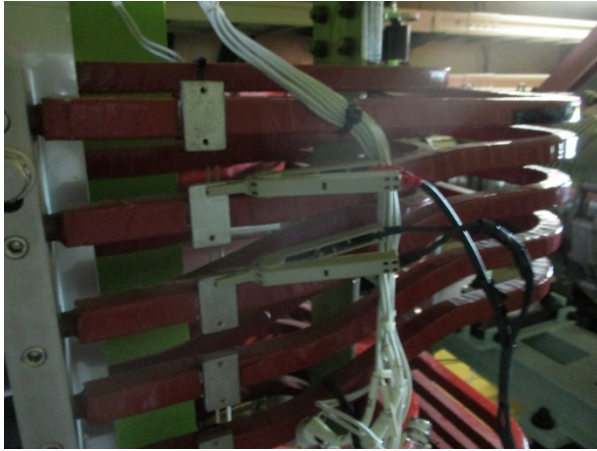


バイメタル温度接点を外した。

上コイル、下コイルの接続を外した。

主回路ケーブル外した

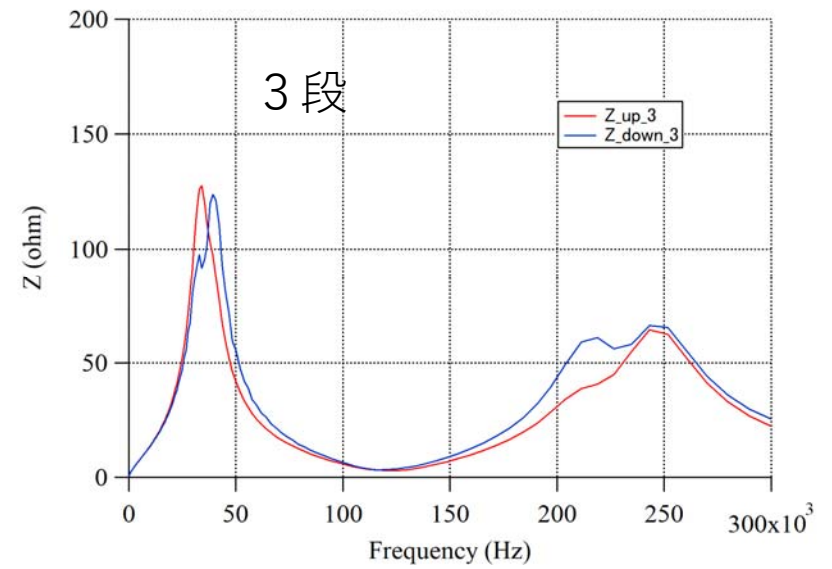
## 上側コイル



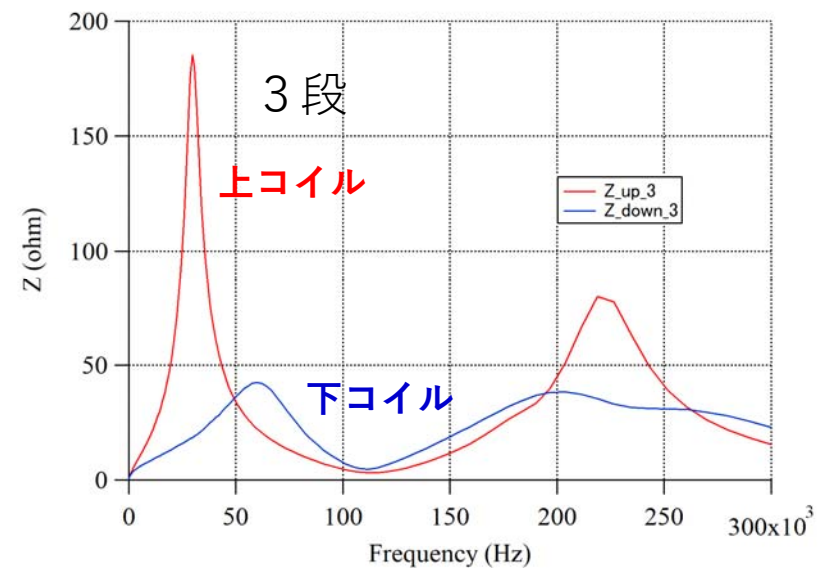
## 下側コイル



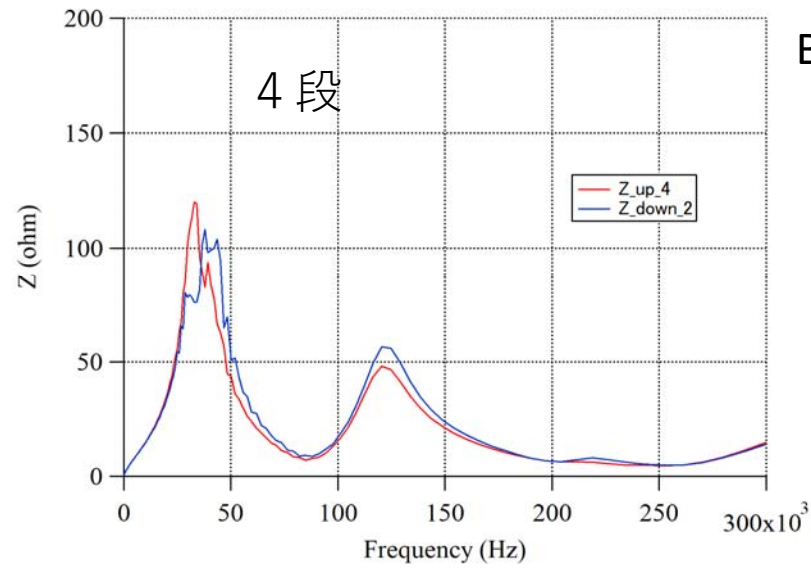
BFIN



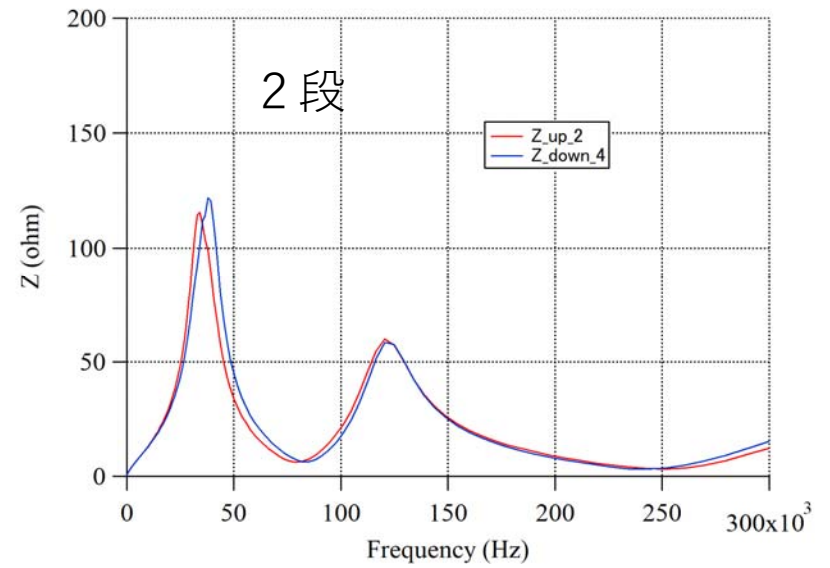
B15D



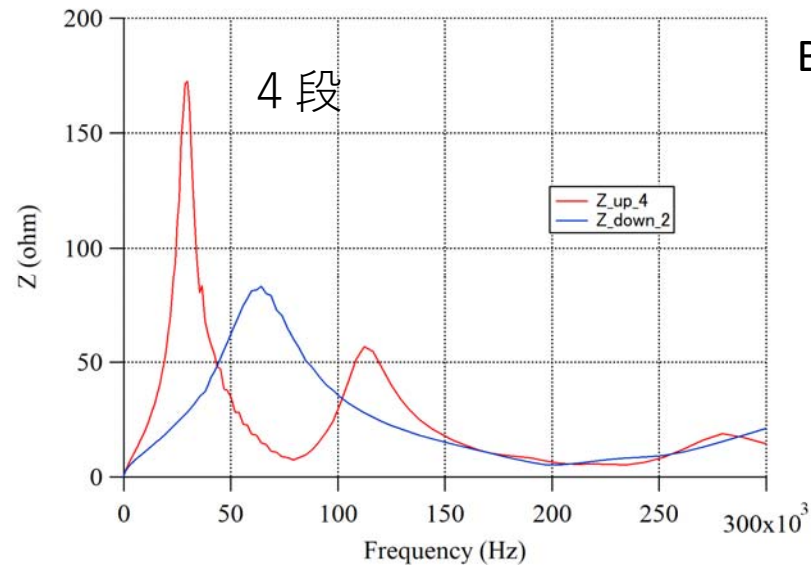
BFIN



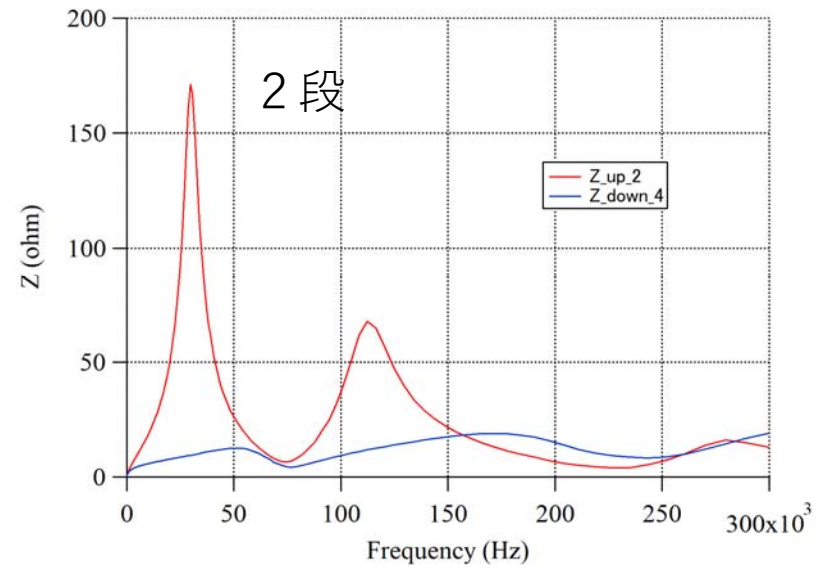
BFIN



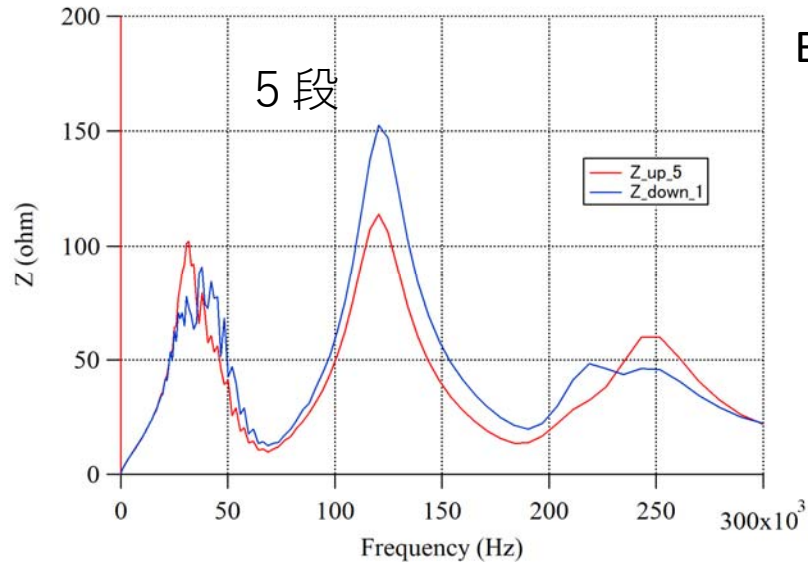
B15D



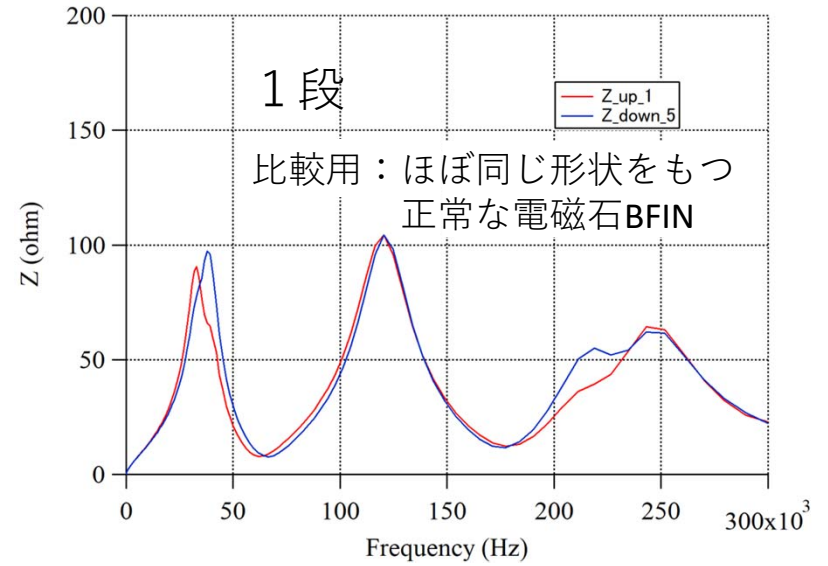
B15D



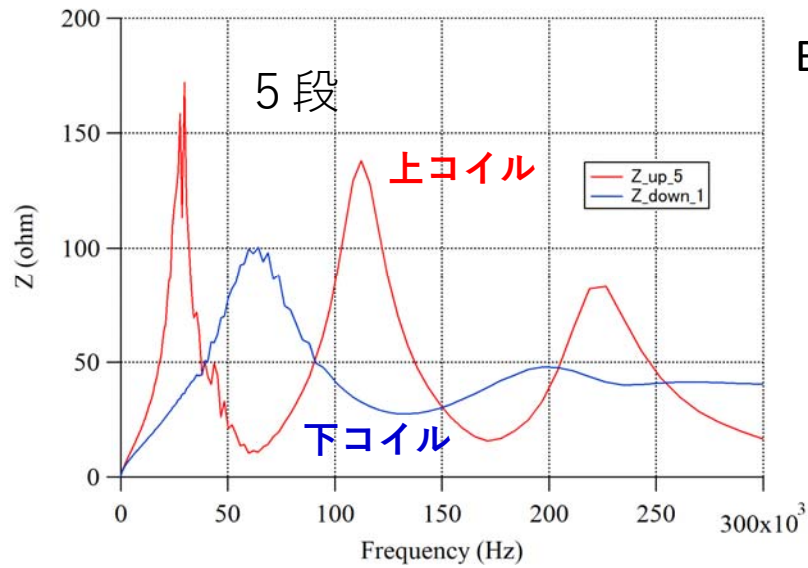
BFIN



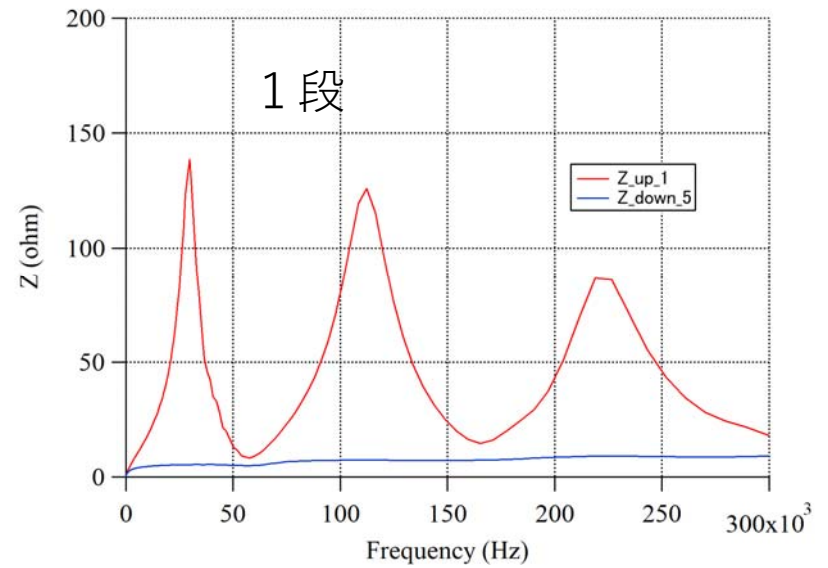
BFIN



B15D



B15D





# 通電確認

## 問題発生後の最初の通電

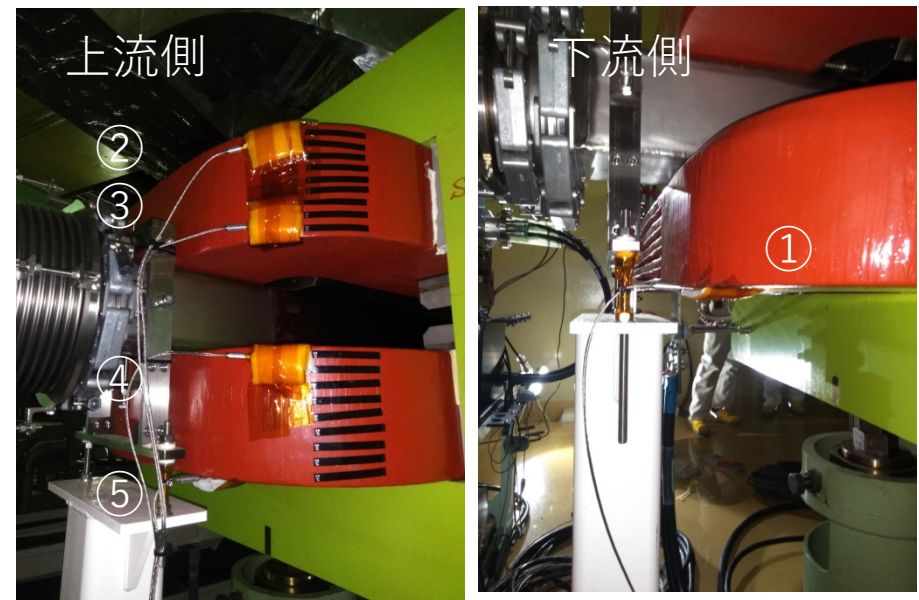
- 有人監視付き
- サーモビューアによる温度分布測定
- 8分かけて徐々に電流を上げ、750 Aで10分通電  
    におい、異音等 無し  
    表面温度異常 無し

## ほぼ通常通りに励磁できてしまった

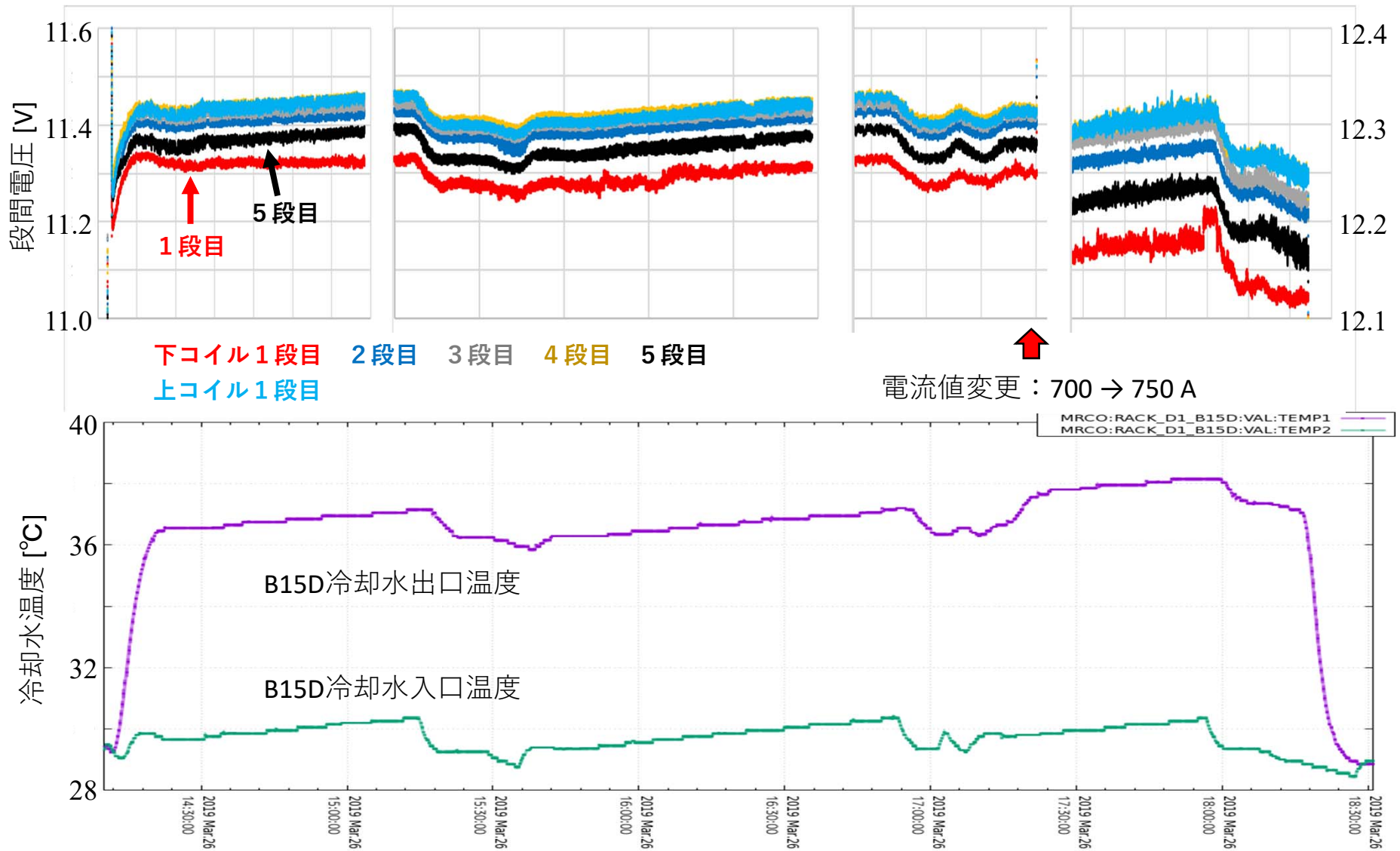
- 連続計測用の温度計を設置
- 段間電圧測定をセットアップ



700～830 Aで、2～4時間連続通電



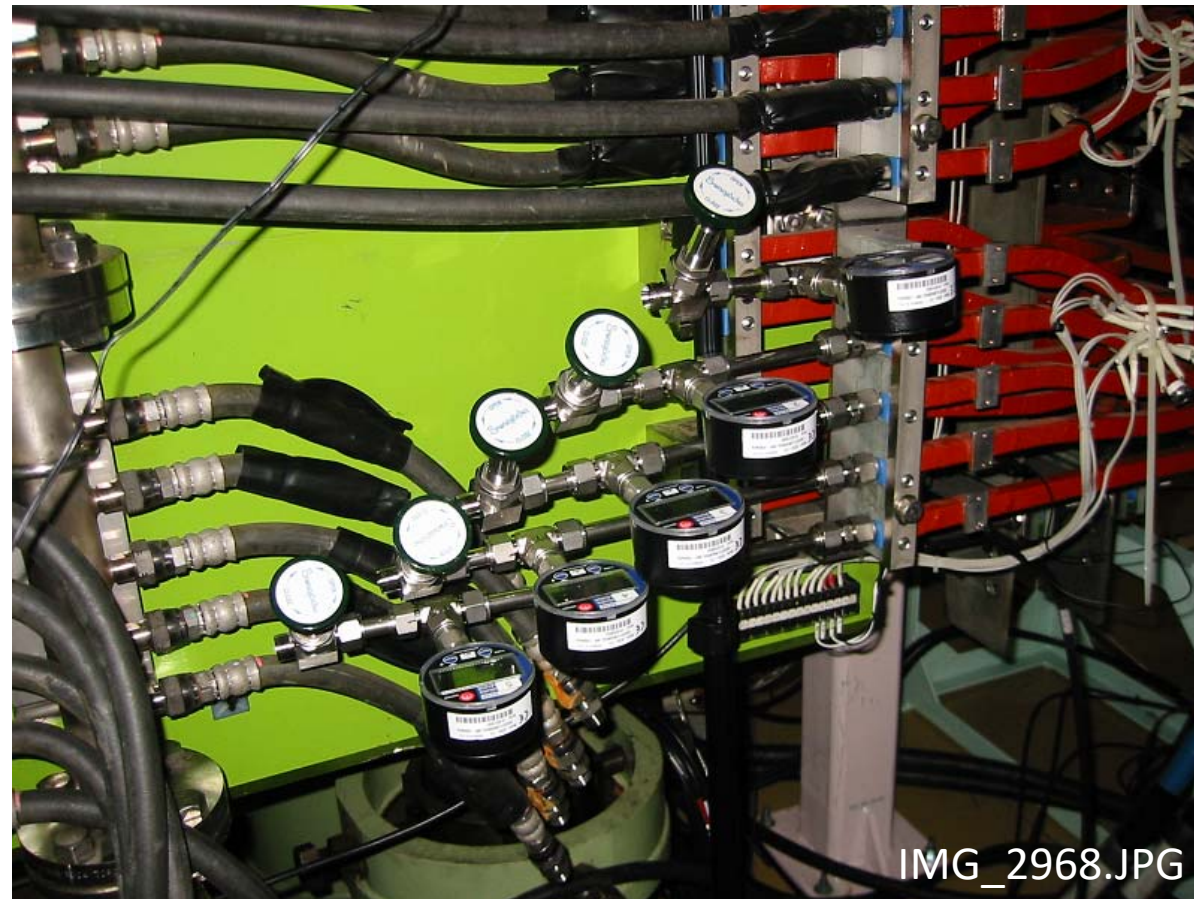
# 700, 750Aによる4時間連続通電による段間電圧の推移



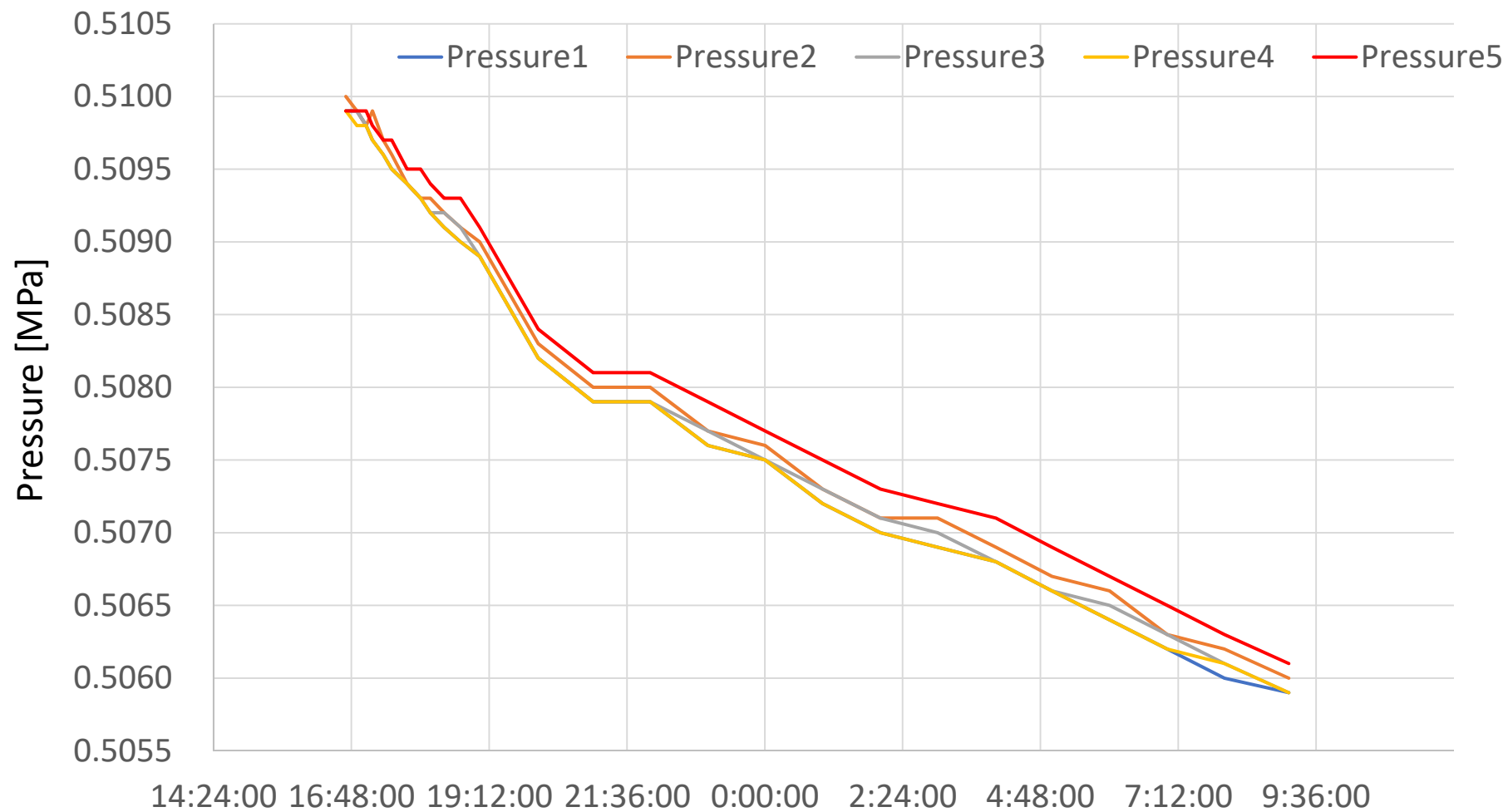
# 加圧リーク試験

下コイル格段（水路）に圧力計を取り付け

0.51 MPaで空気圧をかけ、一晩圧力の変動をみた



空気圧の減少に、水路の違いによる有意な差は無し



A stylized graphic consisting of several overlapping, semi-transparent green and blue shapes. The shapes are arranged in a circular pattern, with a central white circle. The green shapes have a fine grid pattern, while the blue shape is a solid, smooth oval. The overall composition is abstract and modern.

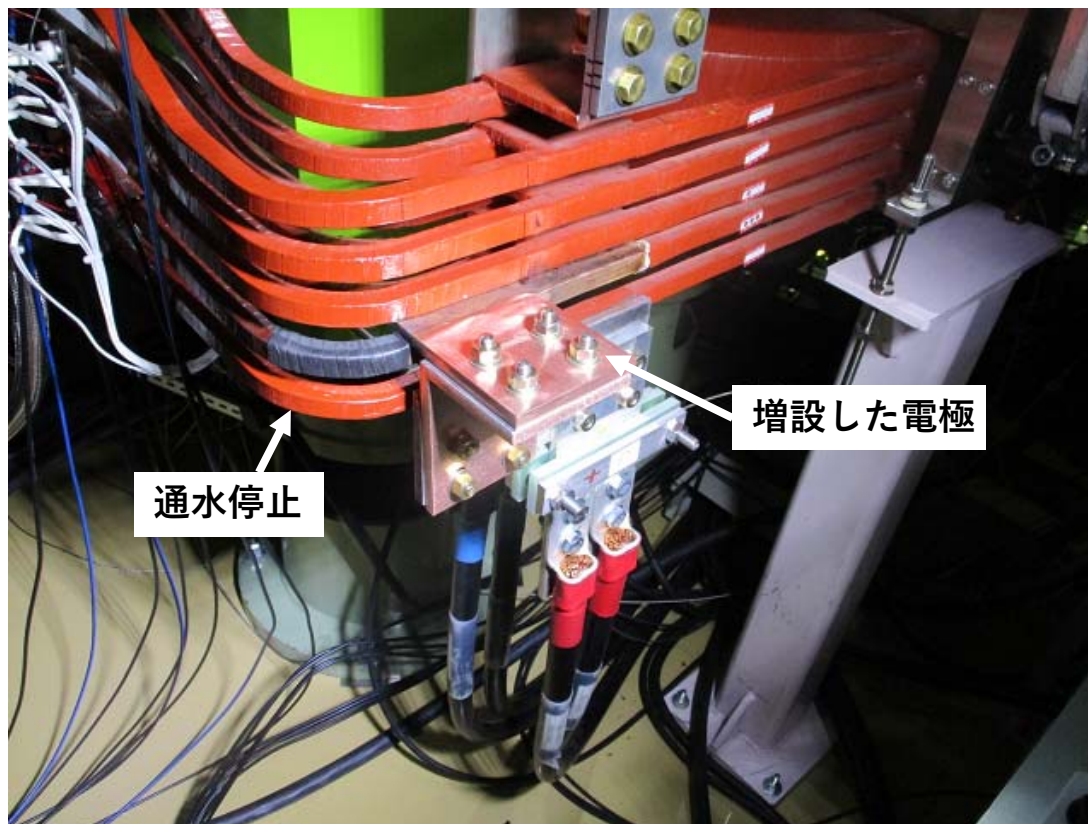
**対処（7月までの応急処置）**

# 復旧対応

## 下コイル 2 段目に新給電電極を設けた

運転電流となるであろう 830 A で連続通電し、各部の温度を確認  
段間電圧モニターが正常に動作していることを確認

### 下コイル 2 段目の新給電電極



### B15D電磁石復帰時の状態

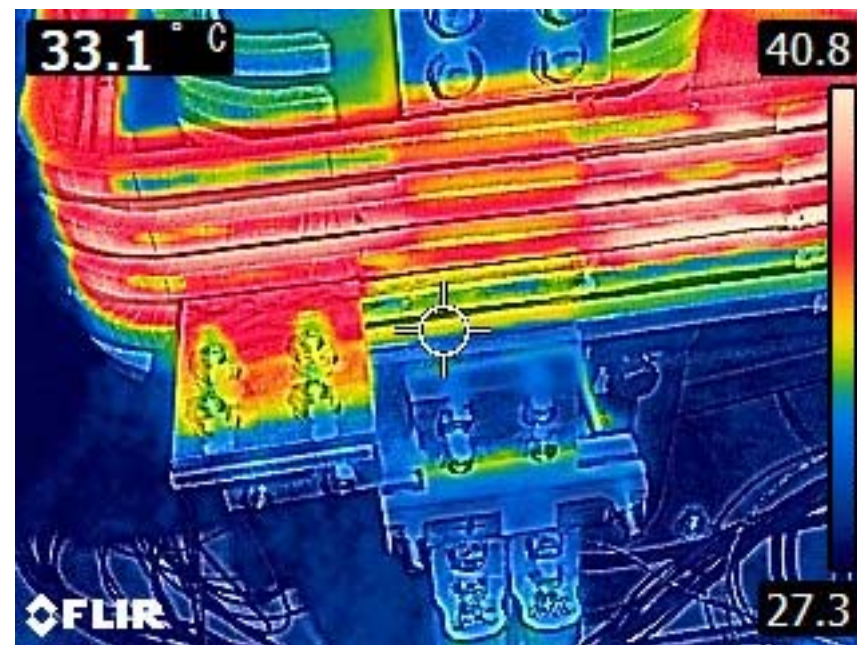
- インピーダンス測定で最も異常と考えられた、下コイル 1 段目をバイパスする
- コイル異常の原因は冷却水漏れであると思われるため、1 段目は通水しない（漏れが 1 段目であれば、これ以上の事態の悪化はなくなる）
- 1 段目の元からある給電電極は絶縁し、解放端とする（ループをつくらない）

## 830 A 連続通電時の温度分布

- 最も高温となる冷却水還りで41°C程度
- 新設した電極周辺の温度上昇は認められない



- コイルを一段バイパスしたことによる問題は無いと考えられる



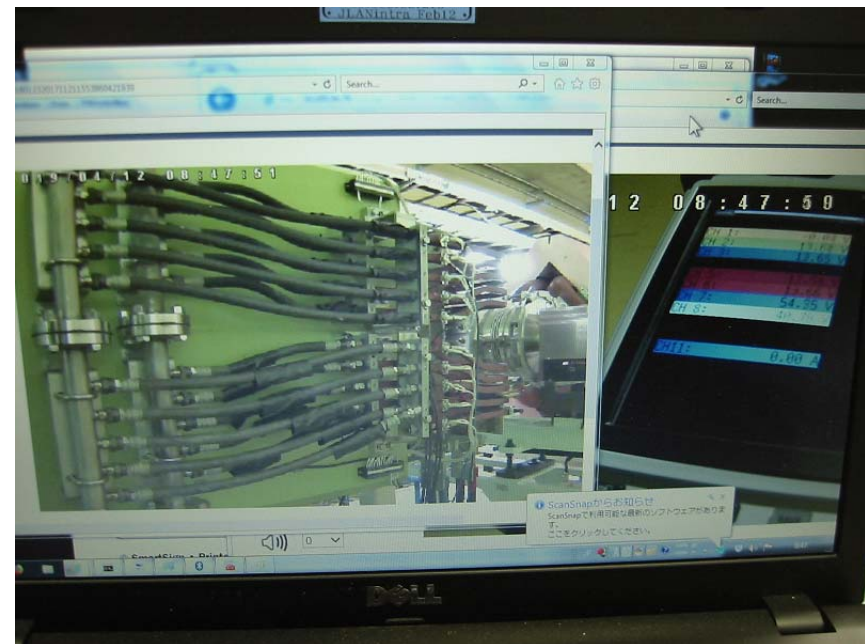
# 運転時モニターの整備

## 概要


- B15D電磁石のコイル表面温度および冷却水出入り温度を、モニター、記録
- B15D電磁石コイルの段間電圧をモニター、記録（ビーム運転中の運用を可能とするため、メモリハイコーダを3NBT通路に置かせていただいた）
- B15D電磁石は、常時カメラで監視

## 安全装置

- 段間電圧が一定範囲を超えて変動すると、警報が出る（音声警報）
- 警報発報後、段間電圧がさらに一定値を下回ると、MPSを発報してMR行きビームを止める





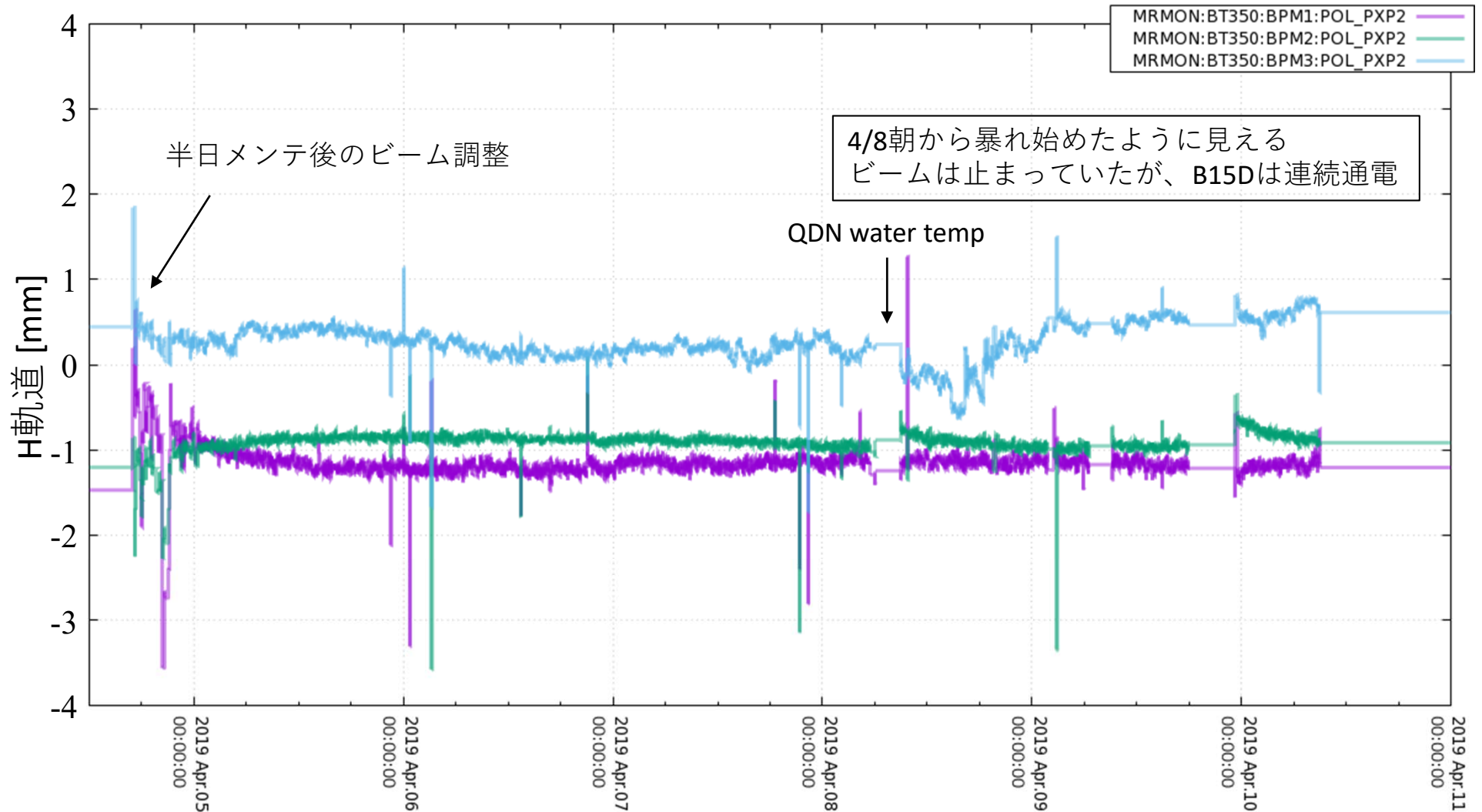


# ビーム再開とその後の経過

# 4月以降のBPM1~3のトレンド

最初の一週目(4/4 12:00 ~ 4/10)

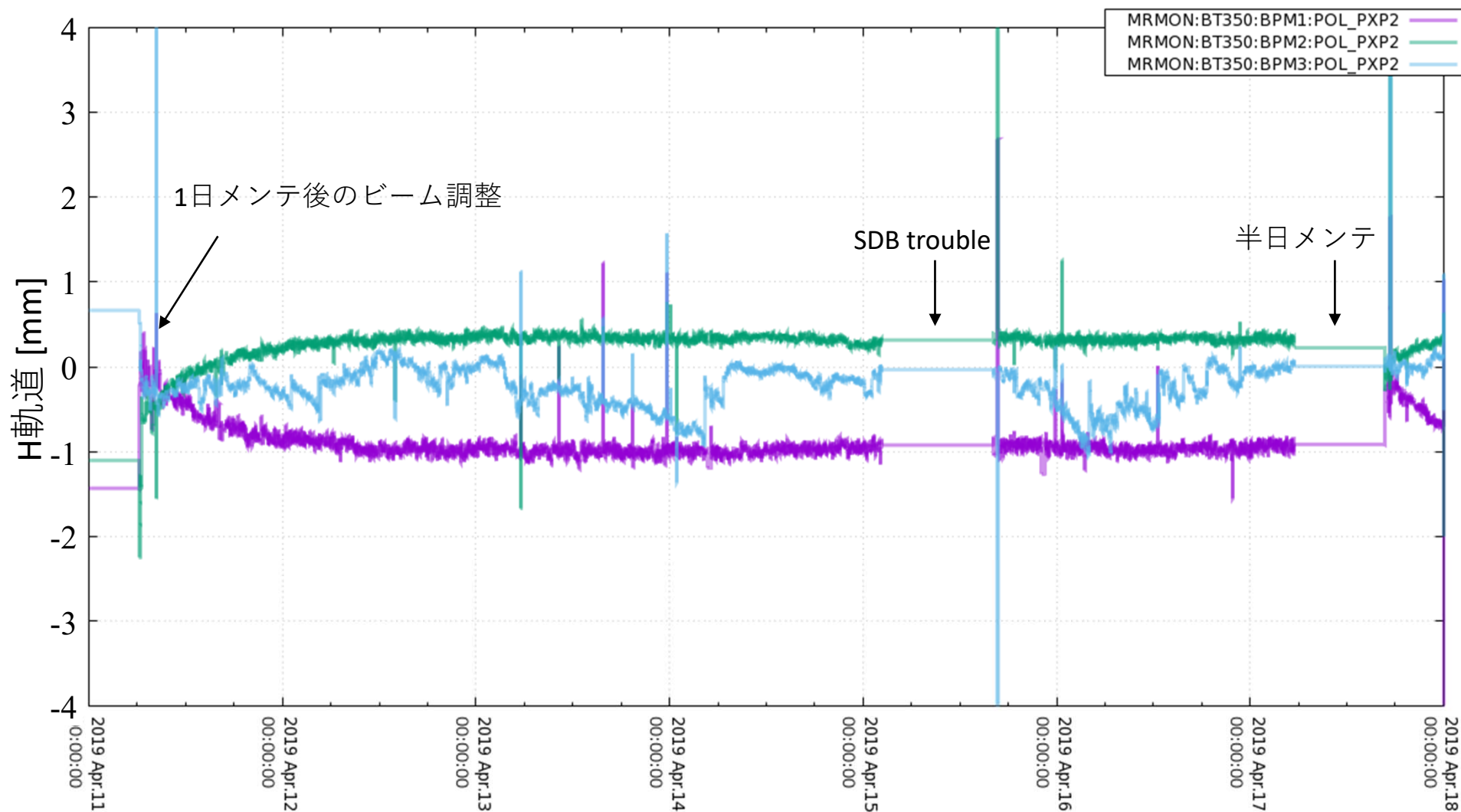
BPM1, 2にはメンテ後のゆっくりとしたドリフト (24時間) がある



第二週目(4/11 ~ 4/17)

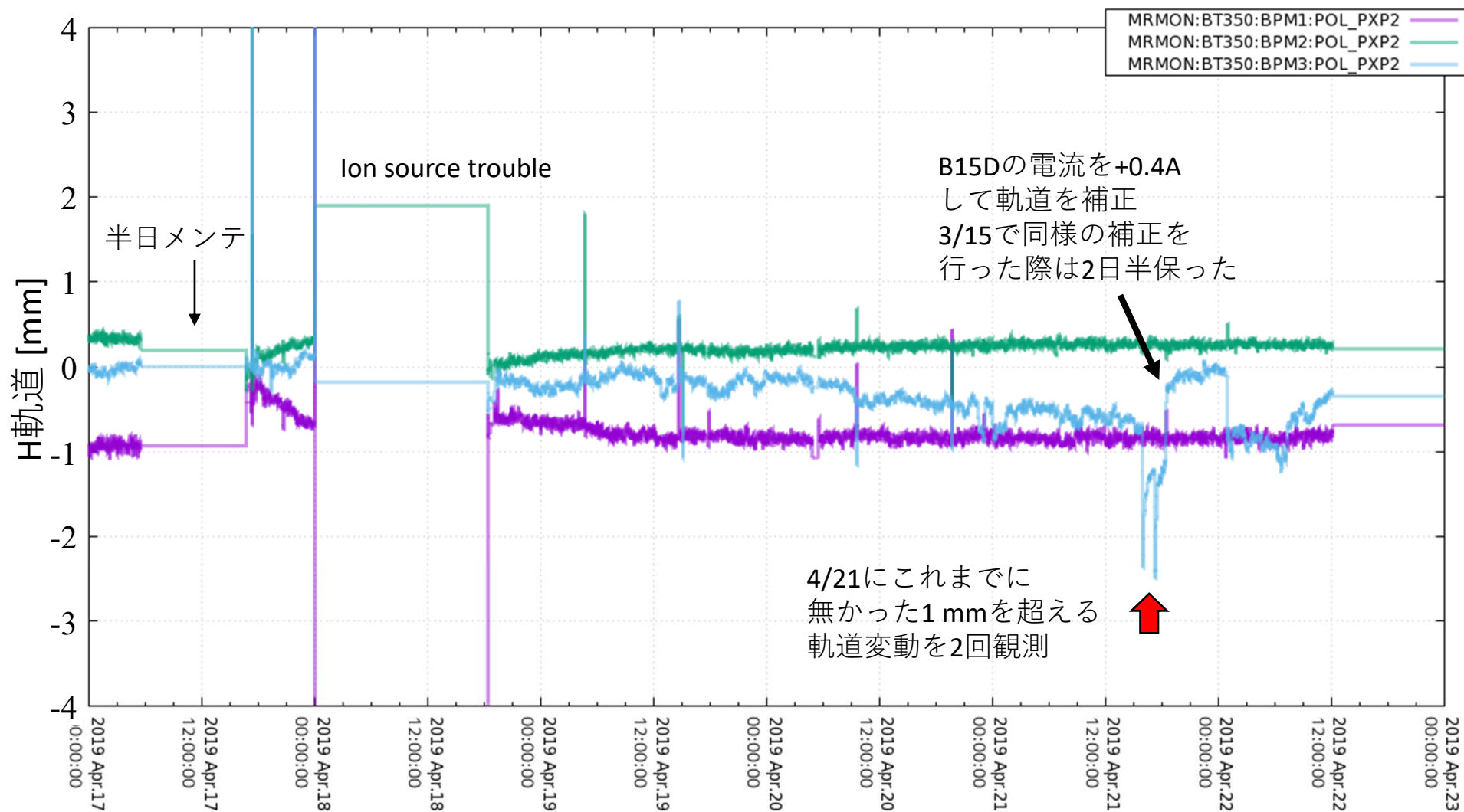
BPM3で±0.3 mm程度の変動が継続

段間電圧は 2 段目が不安定



第三週目(4/17 ~ 4/22)

BPM3で±0.3 mm程度の変動が継続



# 2019/04/23 06:50からの急変

- **2段、3段目の電圧が同時に低下**  
→ 軌道ずれ
- 0.2 Aステップの補正を試みるも、元の軌道まで戻せない
- B15D: 832.8 A以上は不安定になる
- 電流をいったん下げるとch.2, 3の電圧は低下したままとなる



- B15D: 832.6 Aを上限とする
- 軌道はZSH02, 03の2台のステアリングで戻す
- 1.5時間、電圧が安定であることをみて、HD利用運転再開
- 今のところ安定しているが、4/23 6:50以前の状態には戻っていない

段間電圧の基準  
 警報： 13.40 V  
 Soft-MPS： 13.35 V

段間電圧を監視しつつ、  
 ビーム運転を継続  
 4月25日（木）09:00まで



## 2019/04/24 01:04からの急変

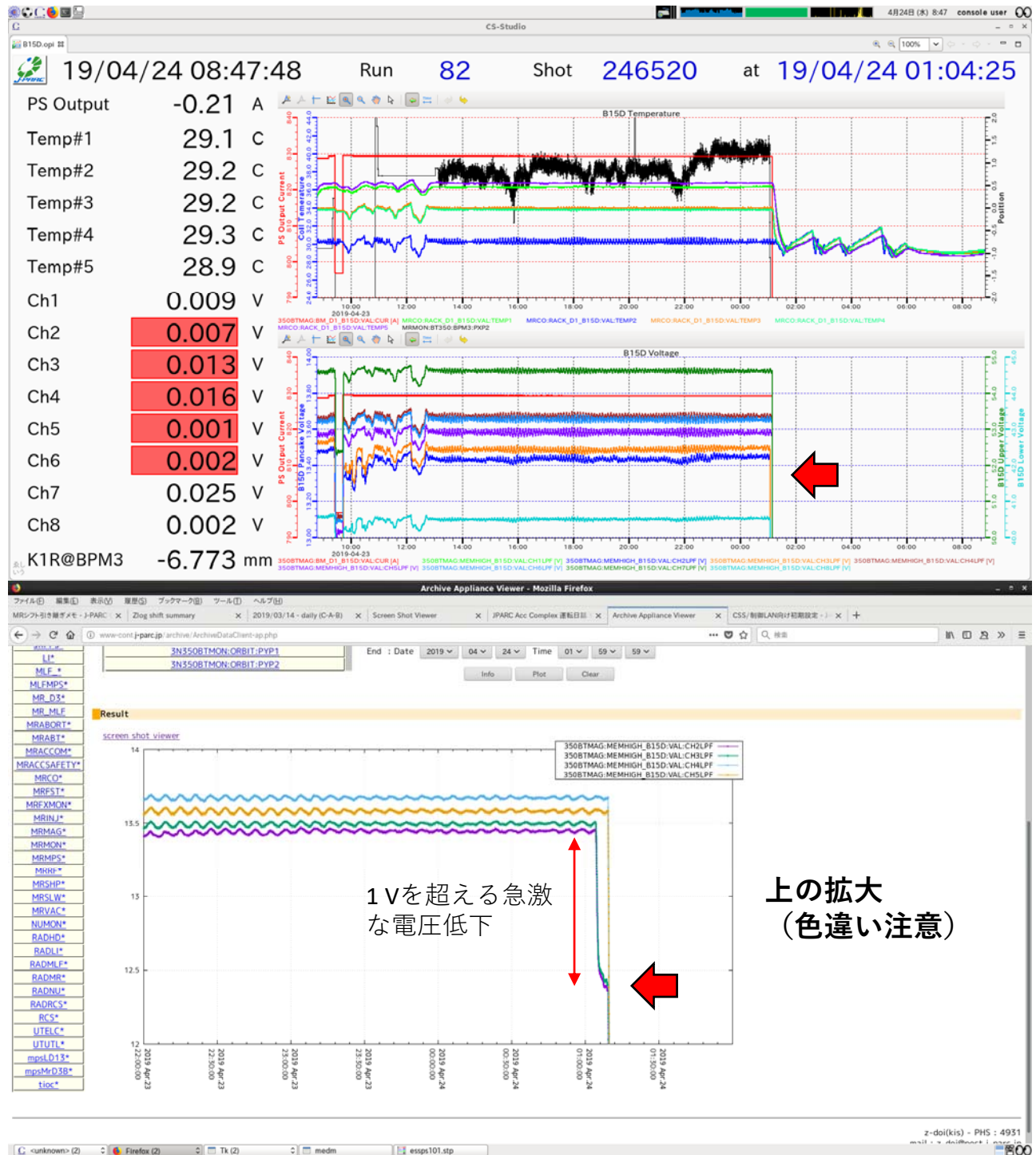
- 下から2段、3段目の電圧が同時に低下 → 軌道ずれ
- これまでにない大きな低下
- SoftMPSレベルである13.35 Vを下回って、12.4 V程度まで低下
- MR BLM010発報
- B15D 段間電圧(SoftMPS)発報
- MRビーム停止



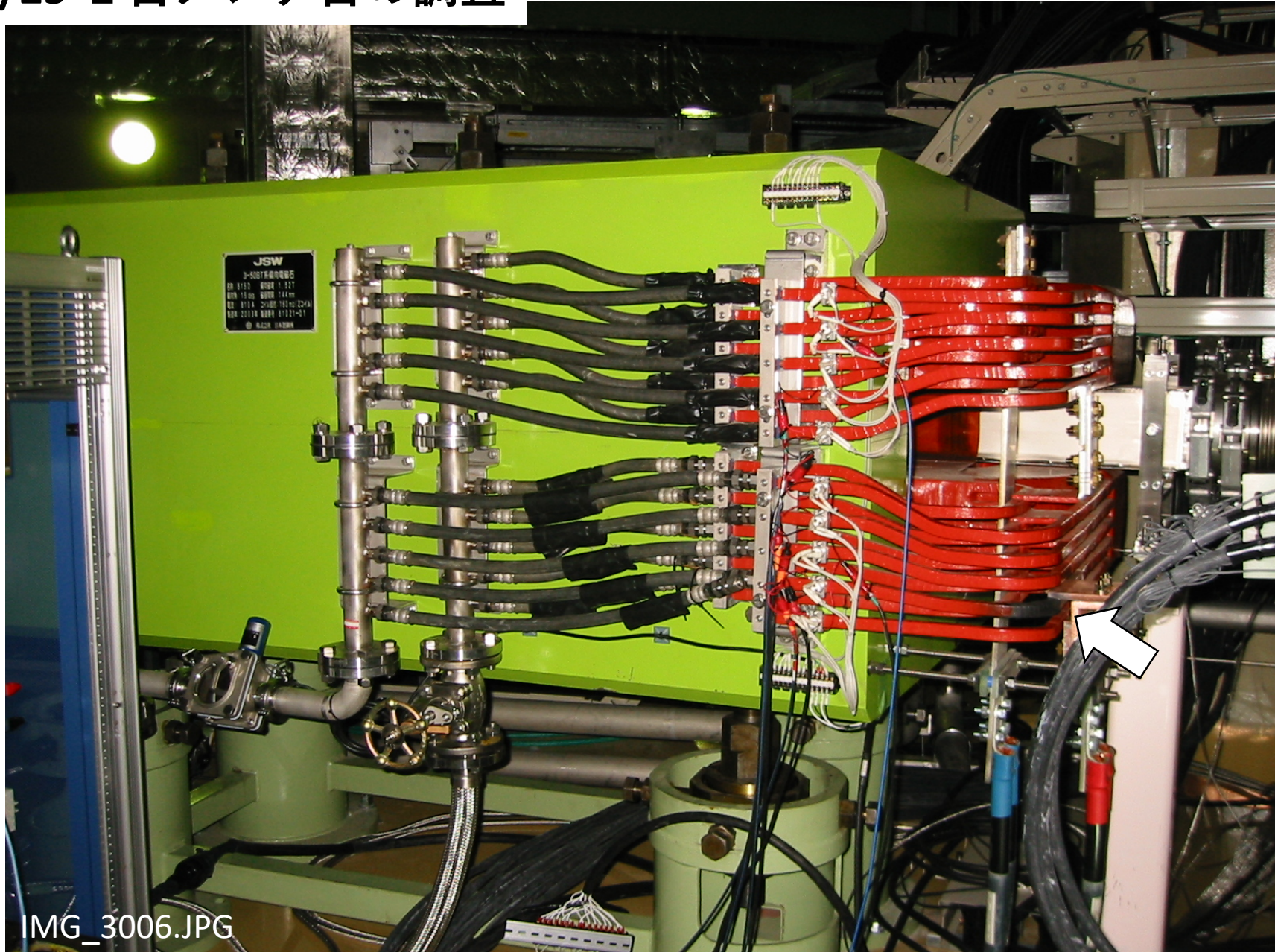
- ch2, ch3の段間電圧がMRで定めた基準 (SoftMPSレベル) を下回ったため、ビーム運転を中止
- その後も電圧は低下傾向



- B15D電磁石は励磁停止



# 04/25 1日メンテ日の調査



IMG\_3006.JPG



下から2段目のコイル  
下側に漏水跡  
← (すでに乾いている)

IMG\_2994.JPG

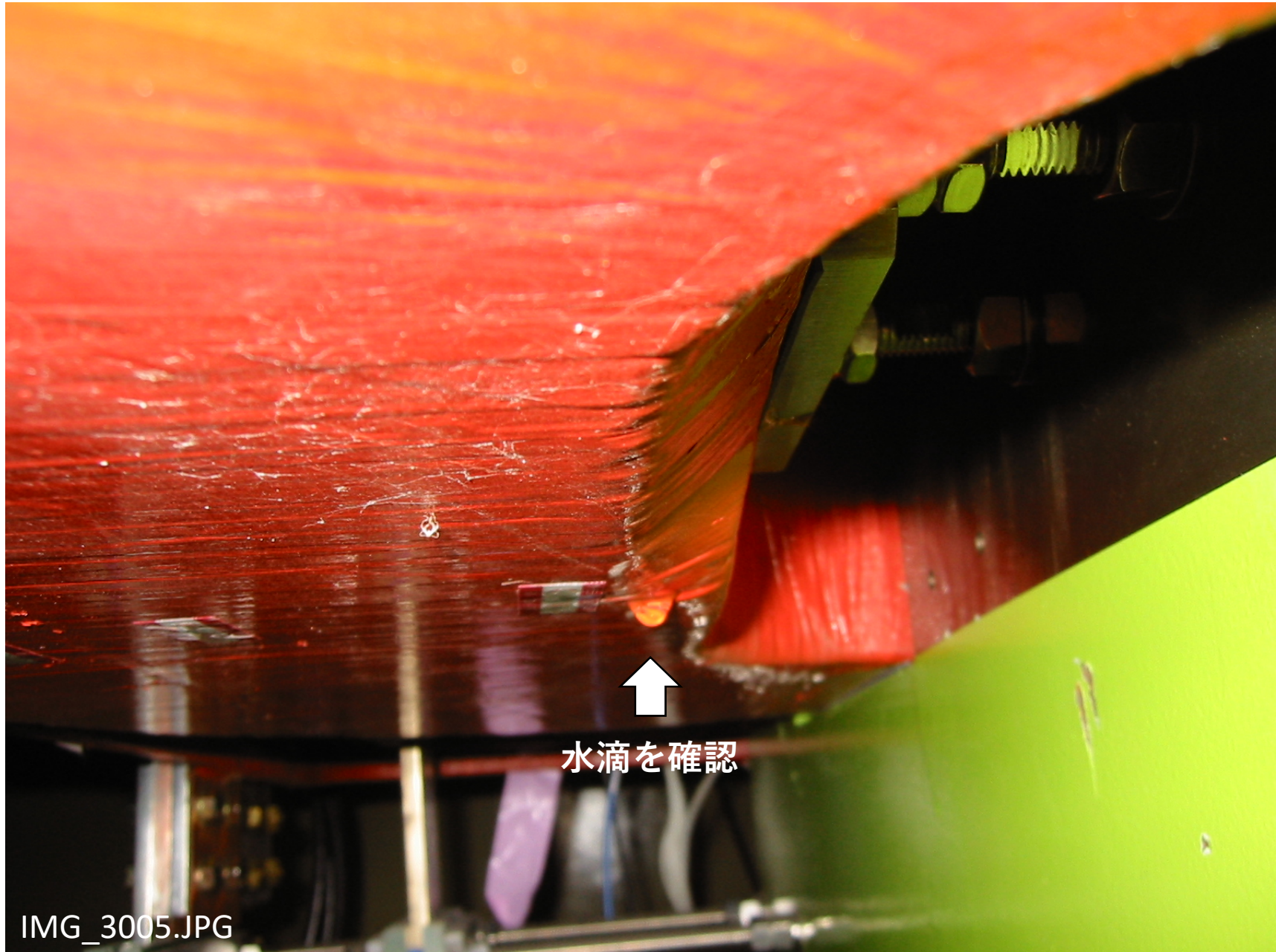




IMG\_2996.JPG



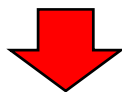
B15D電磁石  
口出し側（下流側）



IMG\_3005.JPG

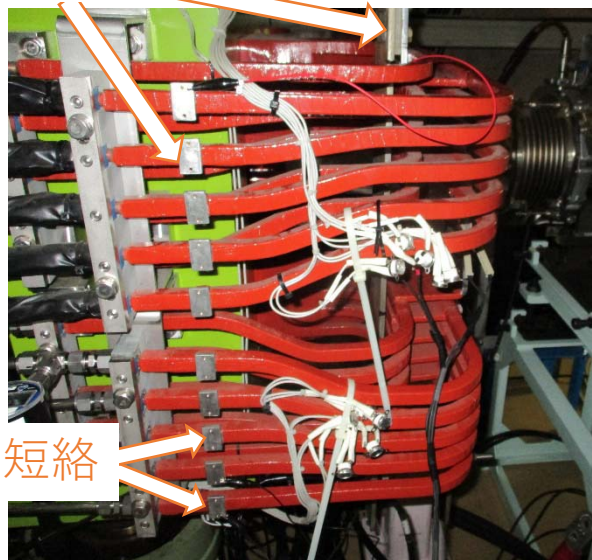
# インピーダンス再確認

上コイル、下コイルともに  
磁極側の3段分（3～5段）  
でインピーダンスを比較



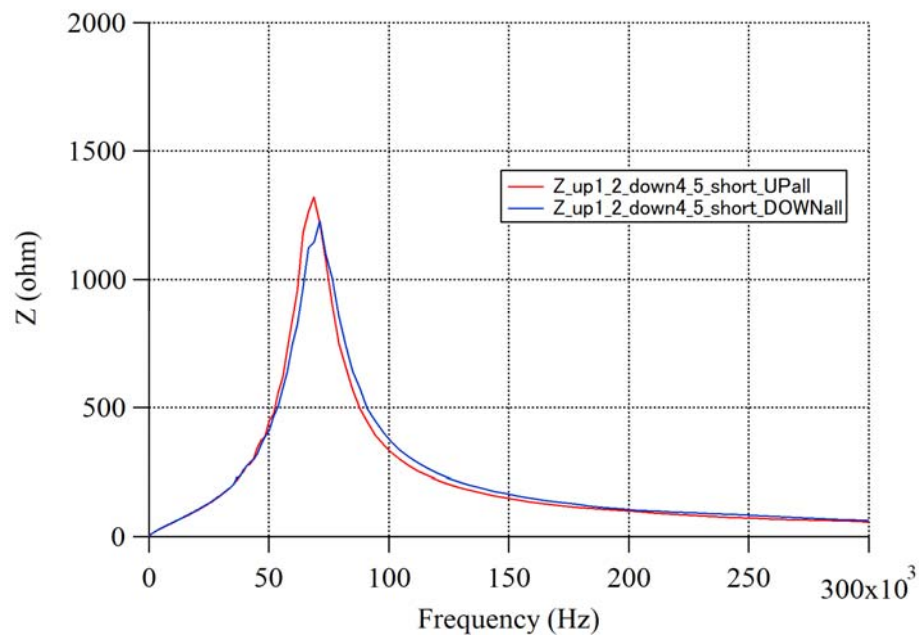
明らかに悪い方向へと変化

短絡

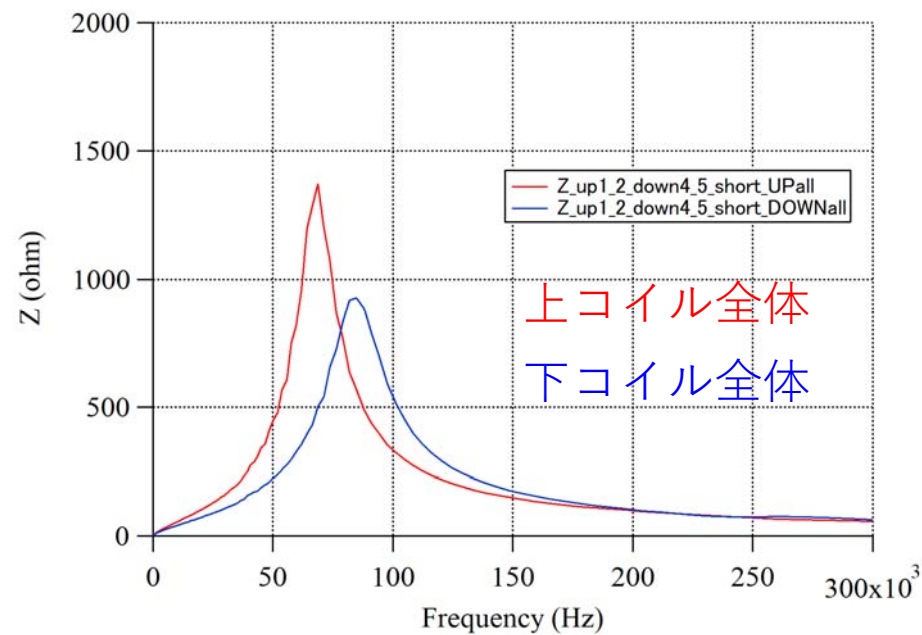


上コイル 1～2 段  
目  
下コイル 1～2 段  
目を短絡

3月29日



4月25日



上コイル全体

下コイル全体

# ま と め

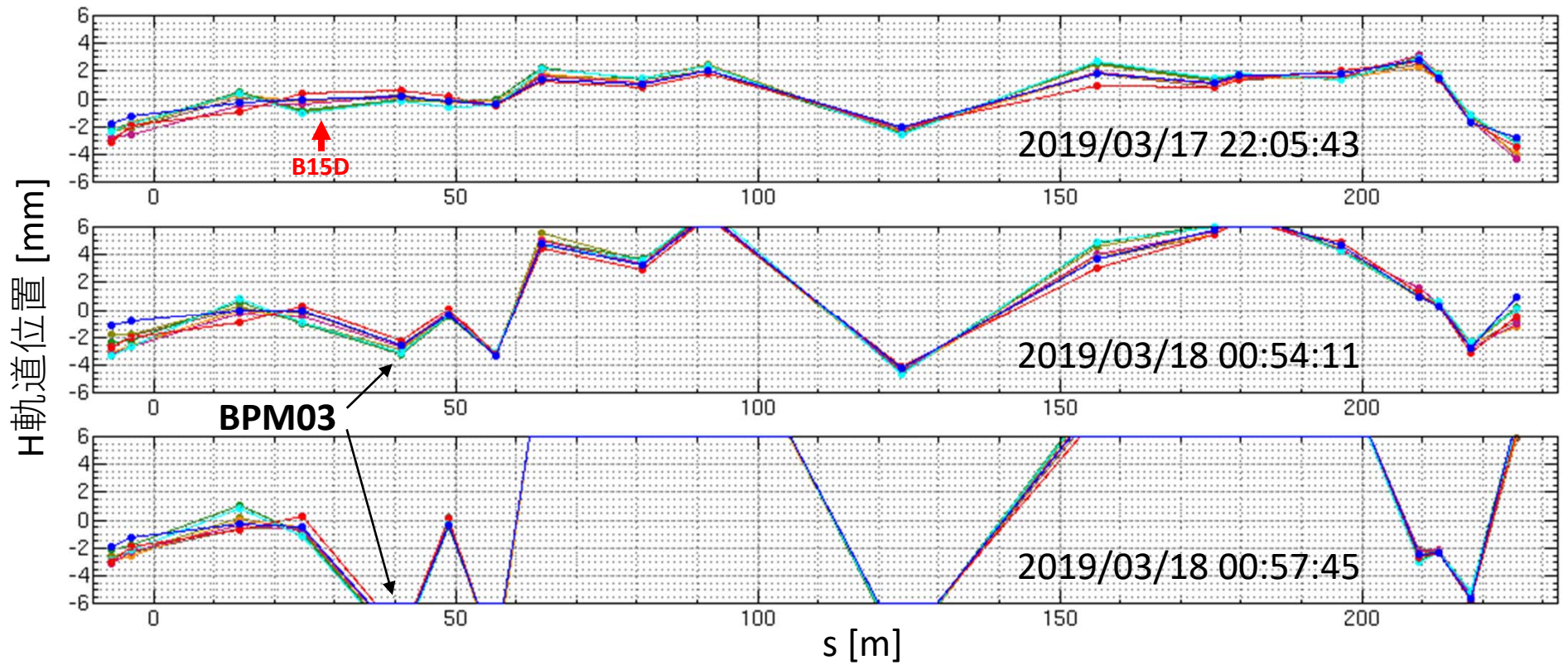
- 2019年3月18日未明、3-50BTラインのB15D偏向電磁石の下コイルで層間の絶縁不良が発生し、ビーム運転が停止した。層間の絶縁不良は僅かであり、インピーダンス測定によってのみ不良箇所の推定が可能であった
- 層間絶縁不良の原因はコイルからの水漏れであると思われるが、空気による加圧試験では5水路のうちどこで水漏れしているかの特定は出来なかった
- 絶縁不良を起こしたと見られる下コイルの最下段をバイパスし、ビーム利用運転を再開した。水漏れが当該段で起きている可能性が高いので、不具合の進行を止めるために最下段は通水も停止した
- 4月4日よりビーム運転を再開したが、層間絶縁不良が2から3段目まで進行し、4月24日未明でMRはビーム停止した。応急処置による延命は20日間であった
- 軽微な層間絶縁不良に対し、不良箇所の特定に有効なのはインピーダンス測定のみである
- 層間絶縁不良を起こした電磁石の監視には、電圧のモニタリングが有効である

## 関連発表

- T. Shibata et al., WEPH029 “電磁石コイルのショートトラブルに対する調査方法の研究”
- J. Takano et al., WEPH037 “J-PARC 3-50BT B15D 電磁石におけるレイヤーショートの経緯と推察”
- M. Tomizawa et al., WEPI044 “J-PARC 3-50BTビーム輸送系磁石の仮復旧に関するビーム軌道の検討”

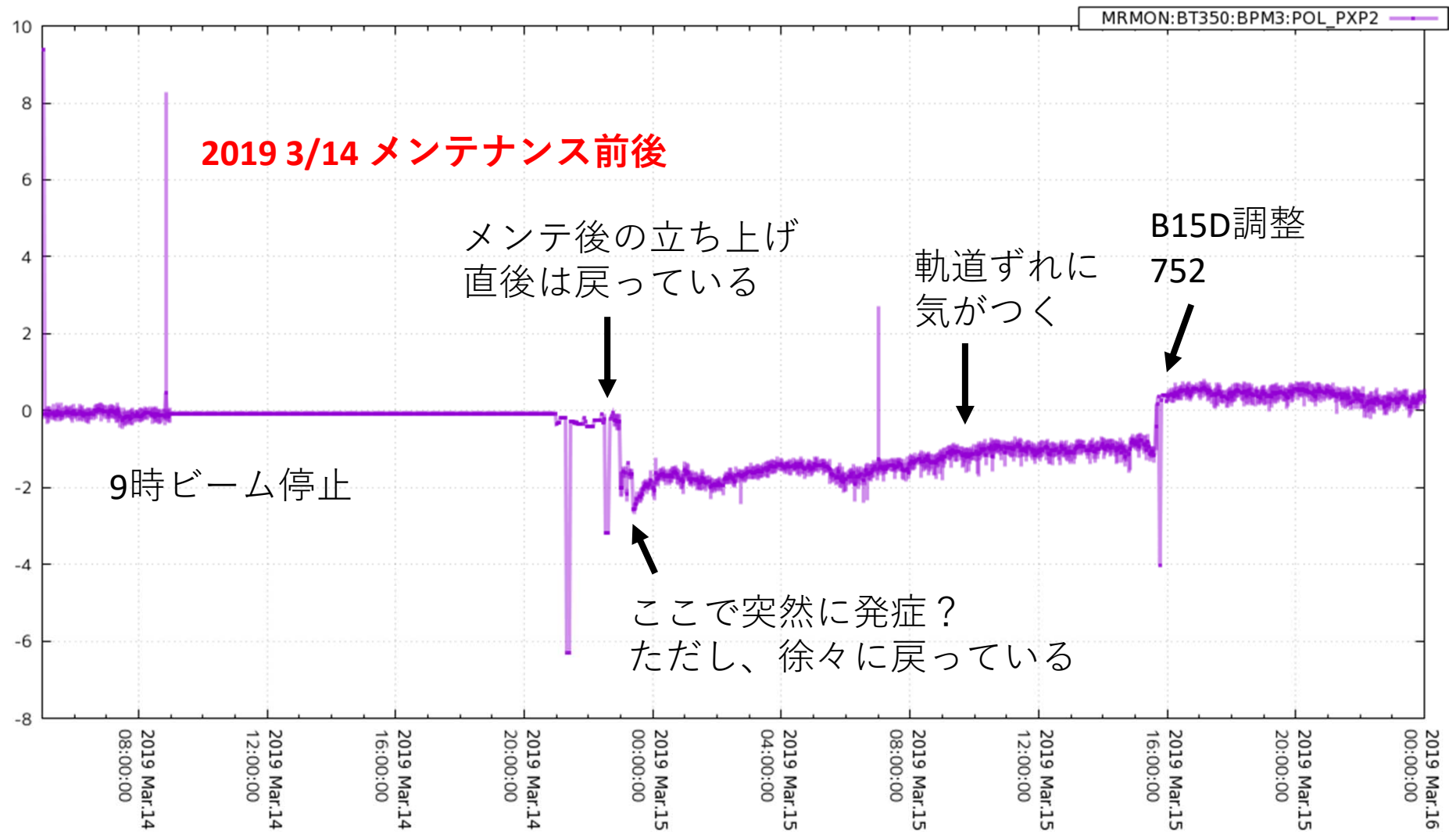
The background features a large, stylized green shape resembling a fan or a stylized letter 'A'. It is composed of several curved segments meeting at a central white circle. Above this central circle is a solid blue oval. The green segments have a fine, grid-like texture.

**予備スライド**

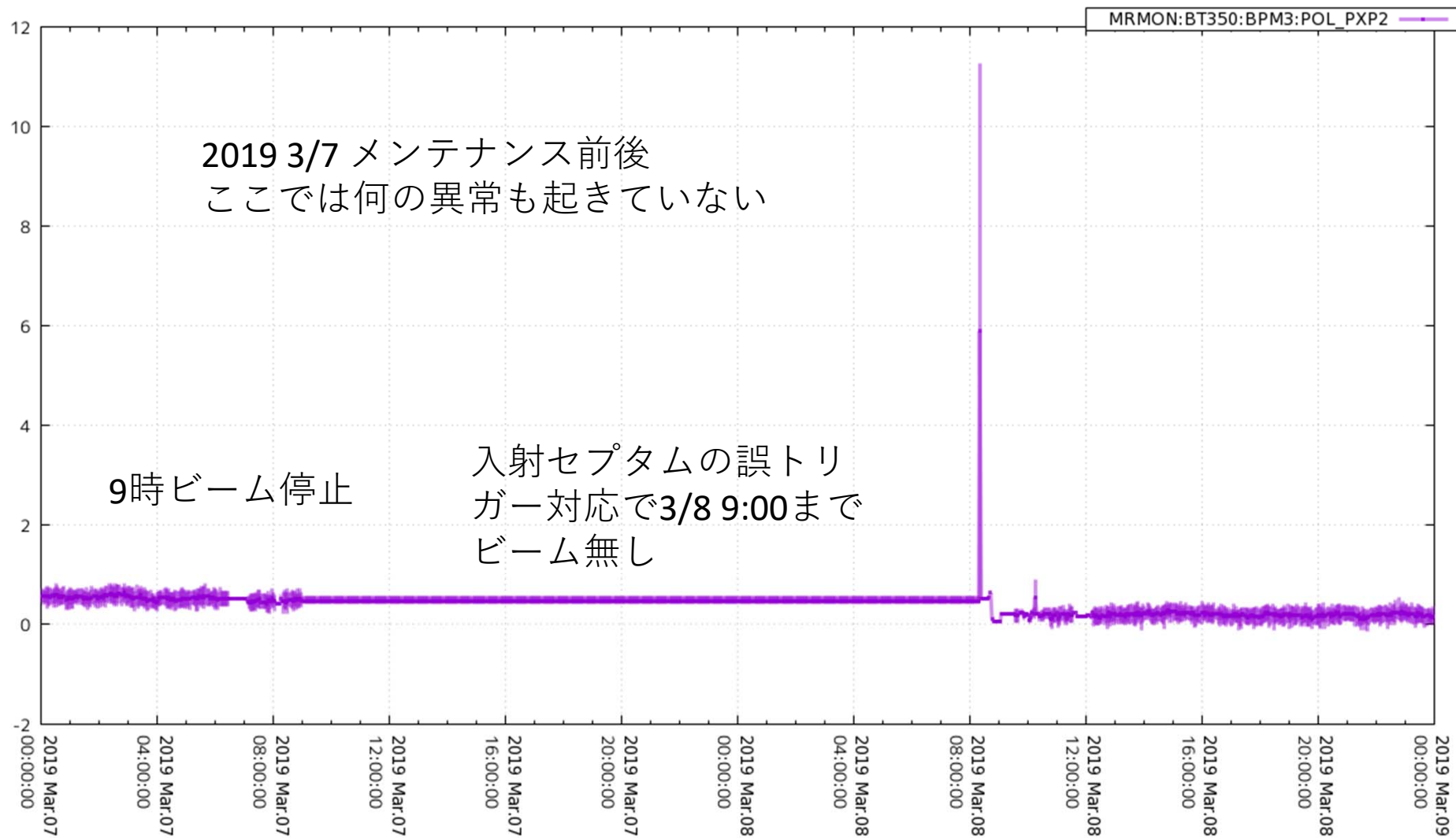


43.916
23.4
12.6
97.8706
49.7869
227.5735

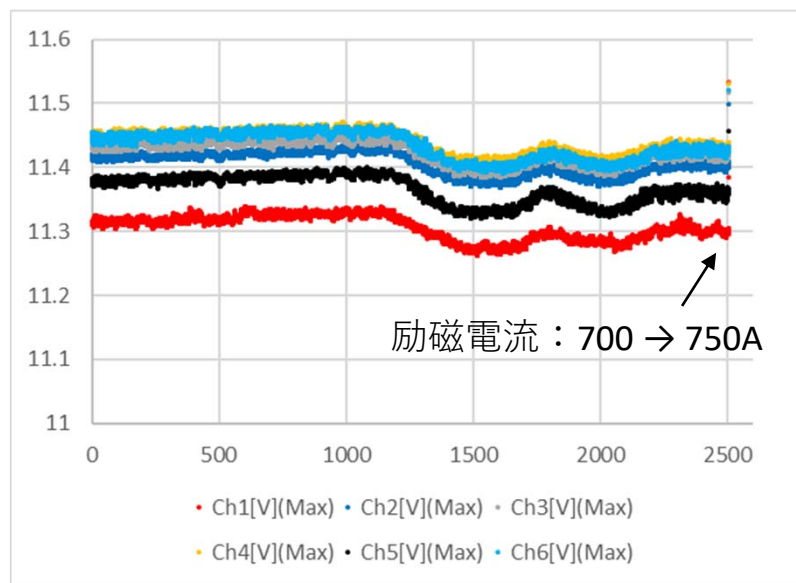
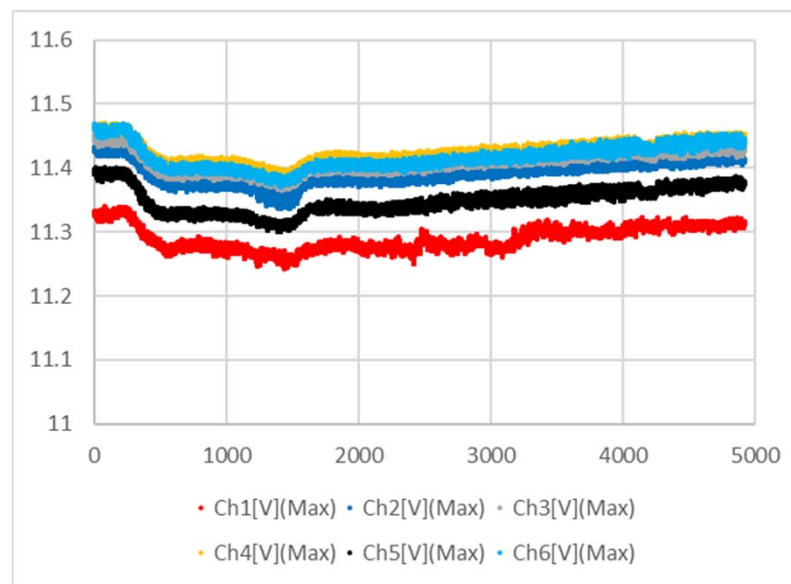
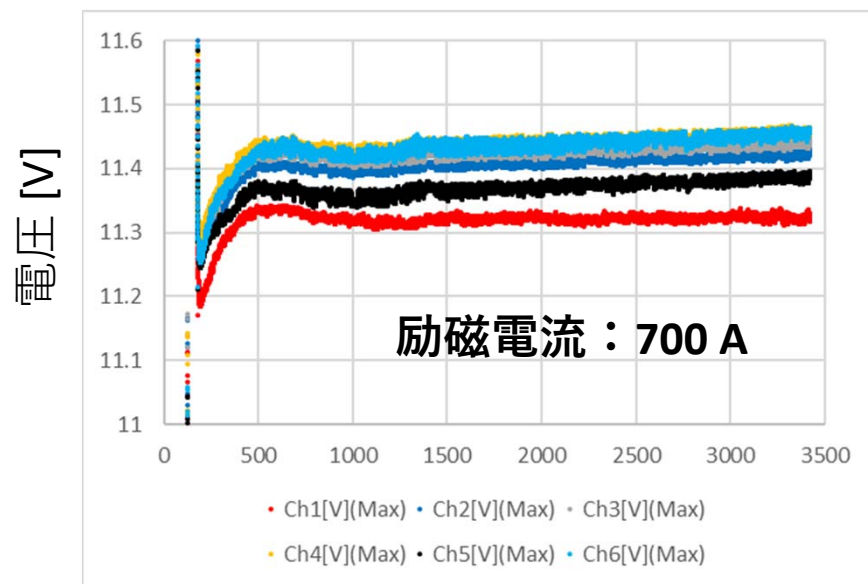
# 問題はいつから生じていたか？







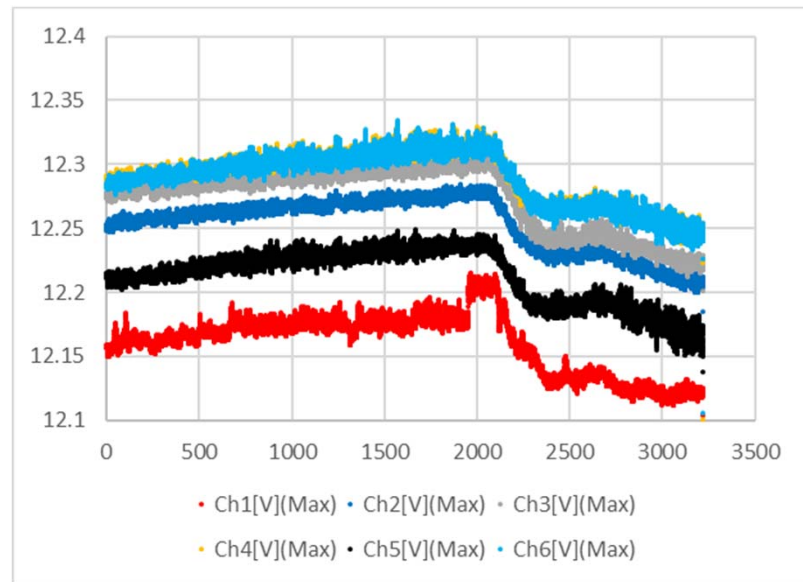
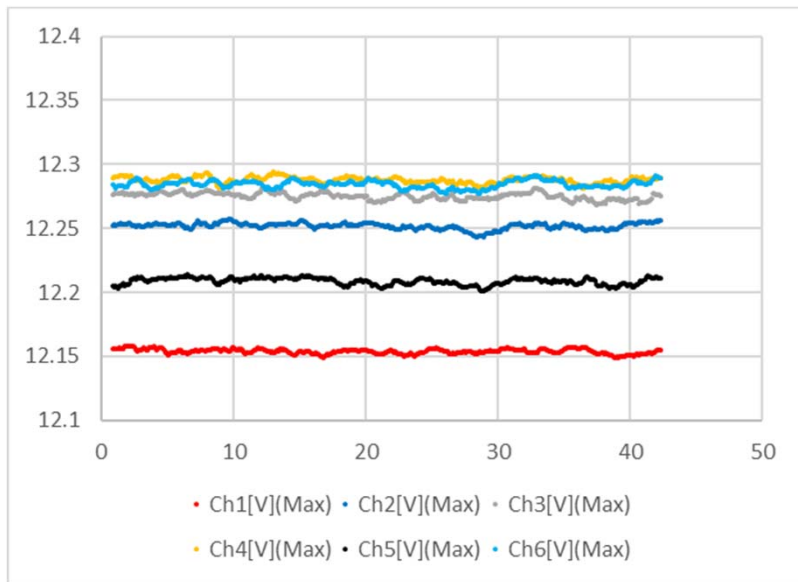
# B15D電磁石コイル層間電圧のトレンド



横軸は時間 [s]

層間電圧のデータを10点で移動平均をとりプロットした

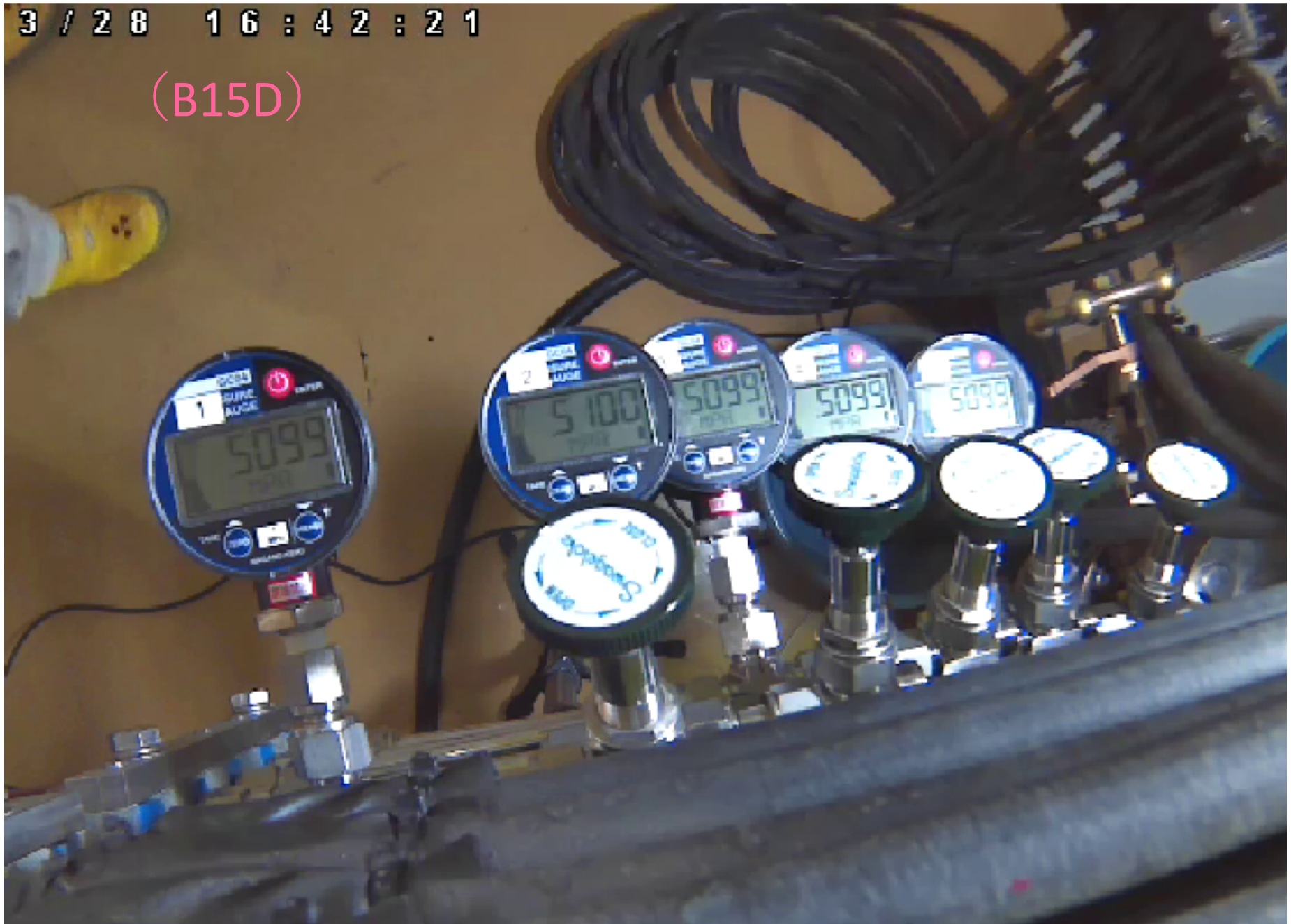
B15D励磁開始後、1時間ほどでch.1 (下コイル最下部) に他と違う動きが見られたが、乖離は0.07 V程で止まった



層間短絡が最も疑わしい下コイル最下部(ch.1)であるが、時折独自の動きをするものの、他に比べて**0.3 V**以上の電圧低下など、分かりやすい短絡の証拠はつかめない

3 / 2 8 1 6 : 4 2 : 2 1

(B15D)



出典：“B15D-190329ki”

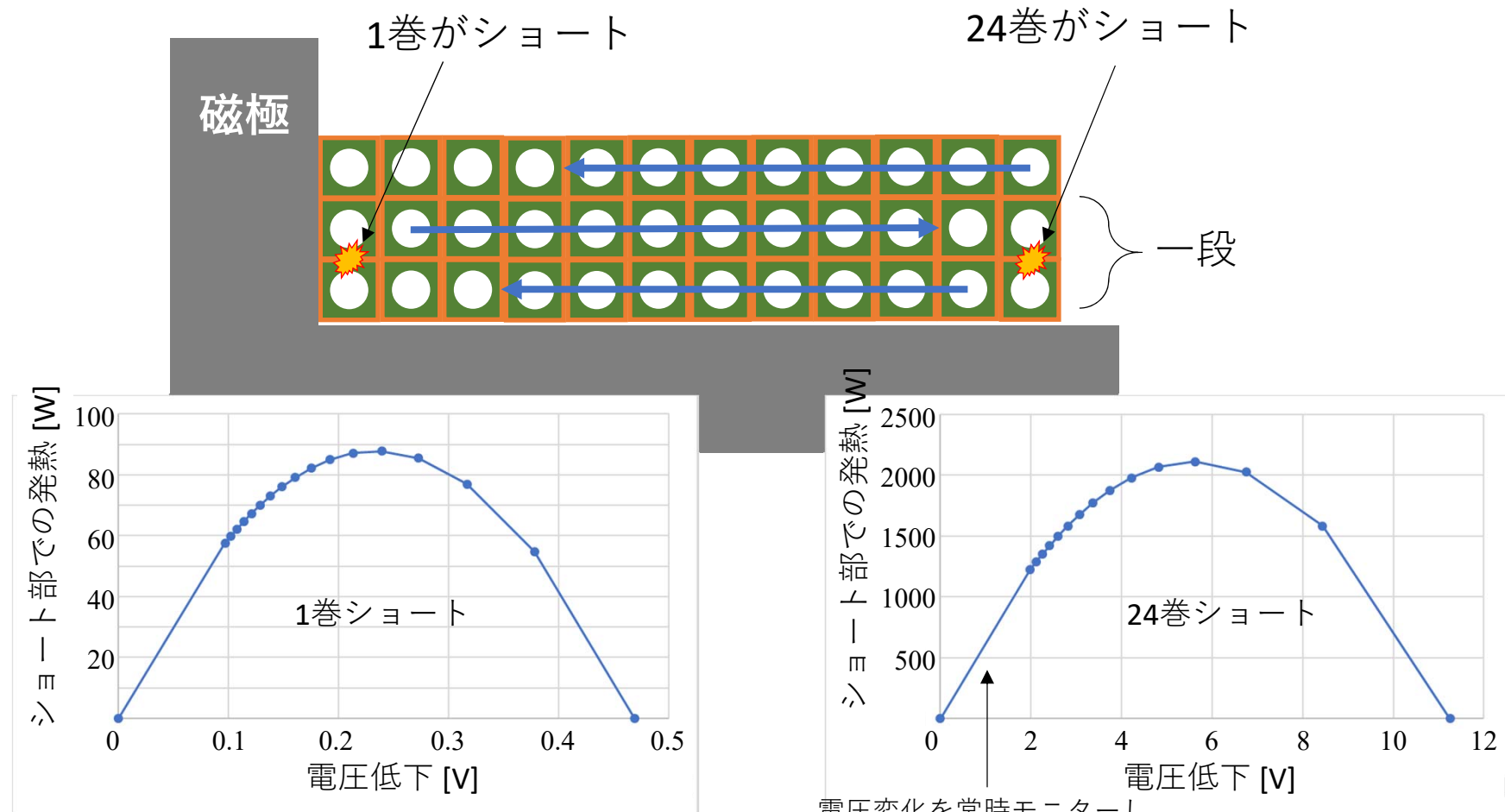
3 / 29 08 : 00 : 09

(B15D)



# ショートした電磁石に通電する際のリスク検討

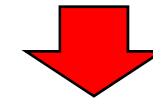
- ショートしたコイルの巻き数は、最大で24巻分
- ショートした部分で発熱する
- $L di/dt$ で電圧が発生したときに、 $R$ が小さいのでショートループに大電流が流れる



# 運転時段階間電圧モニター

## 通電時の監視

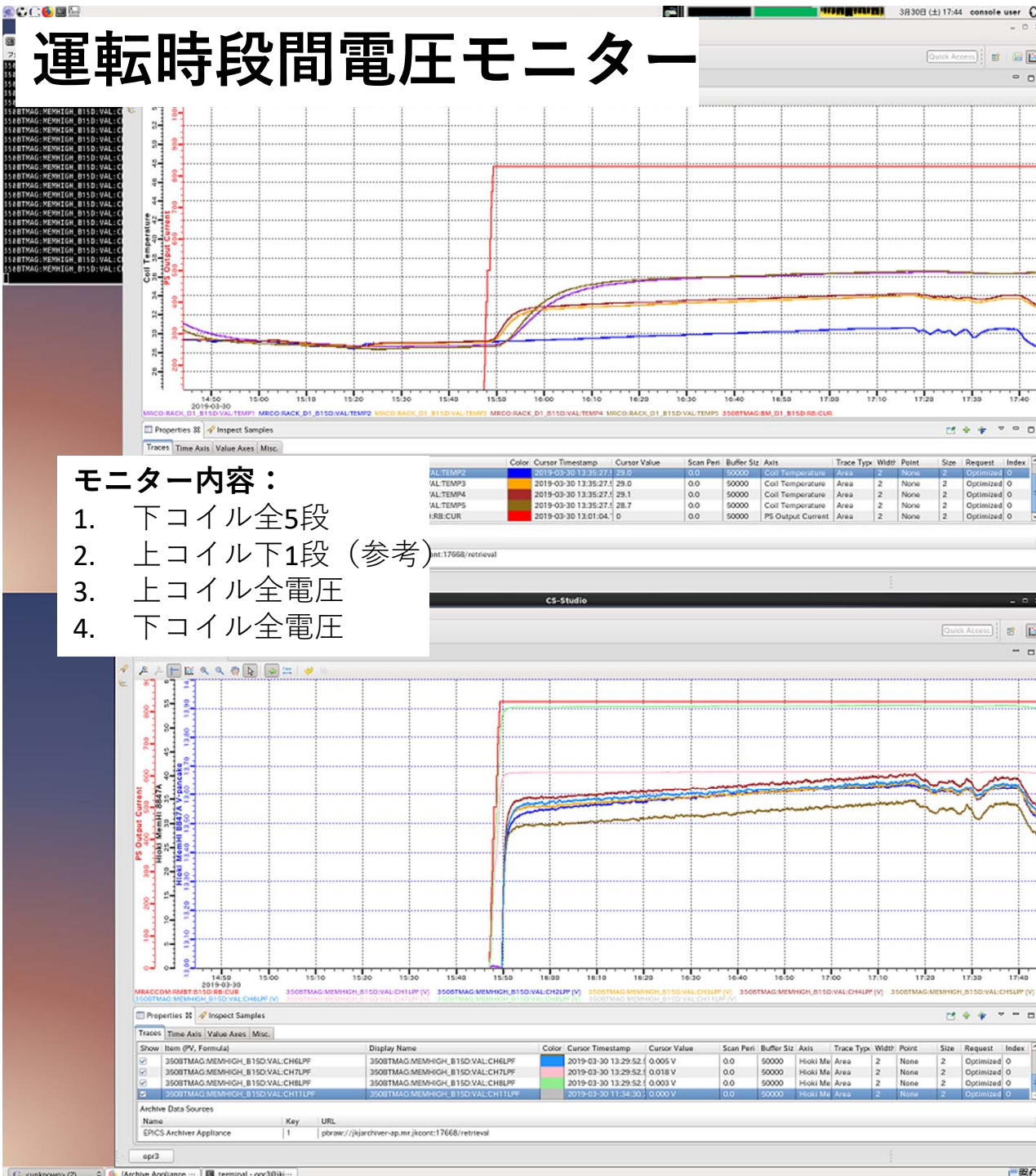
- 段階間電圧は冷却水温とともに変動する
- 変動範囲を13.35~13.75 Vと見込み、この範囲を外れた場合は波形を個別に確認



- 段階間電圧のトレンドを確認し、他と違う動きをしているものがないかを確認
- 他と違う動きをしているものがない、かつ、冷却水温度による変動の範囲を考えられる場合は、そのまま経過観察とする

### モニター内容：

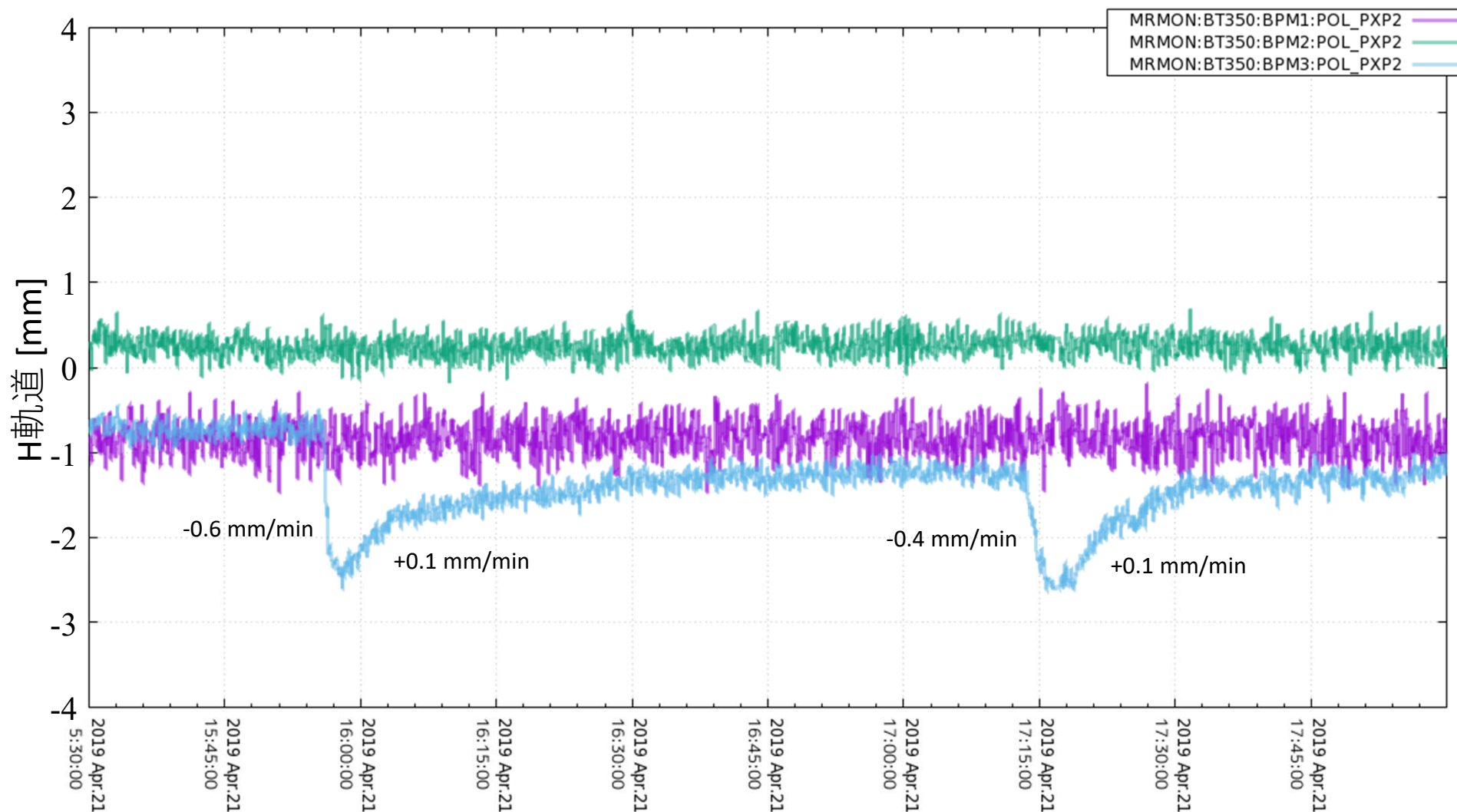
1. 下コイル全5段
2. 上コイル下1段 (参考)
3. 上コイル全電圧
4. 下コイル全電圧



# 4/21午後の2回の軌道変動の拡大

数値データ取得

ArchiveDataClient-ap.pl -s "2019/04/21 15:50:00" -e "2019/04/21 16:00:00" MRMON:BT350:BPM3:POL\_PXP2

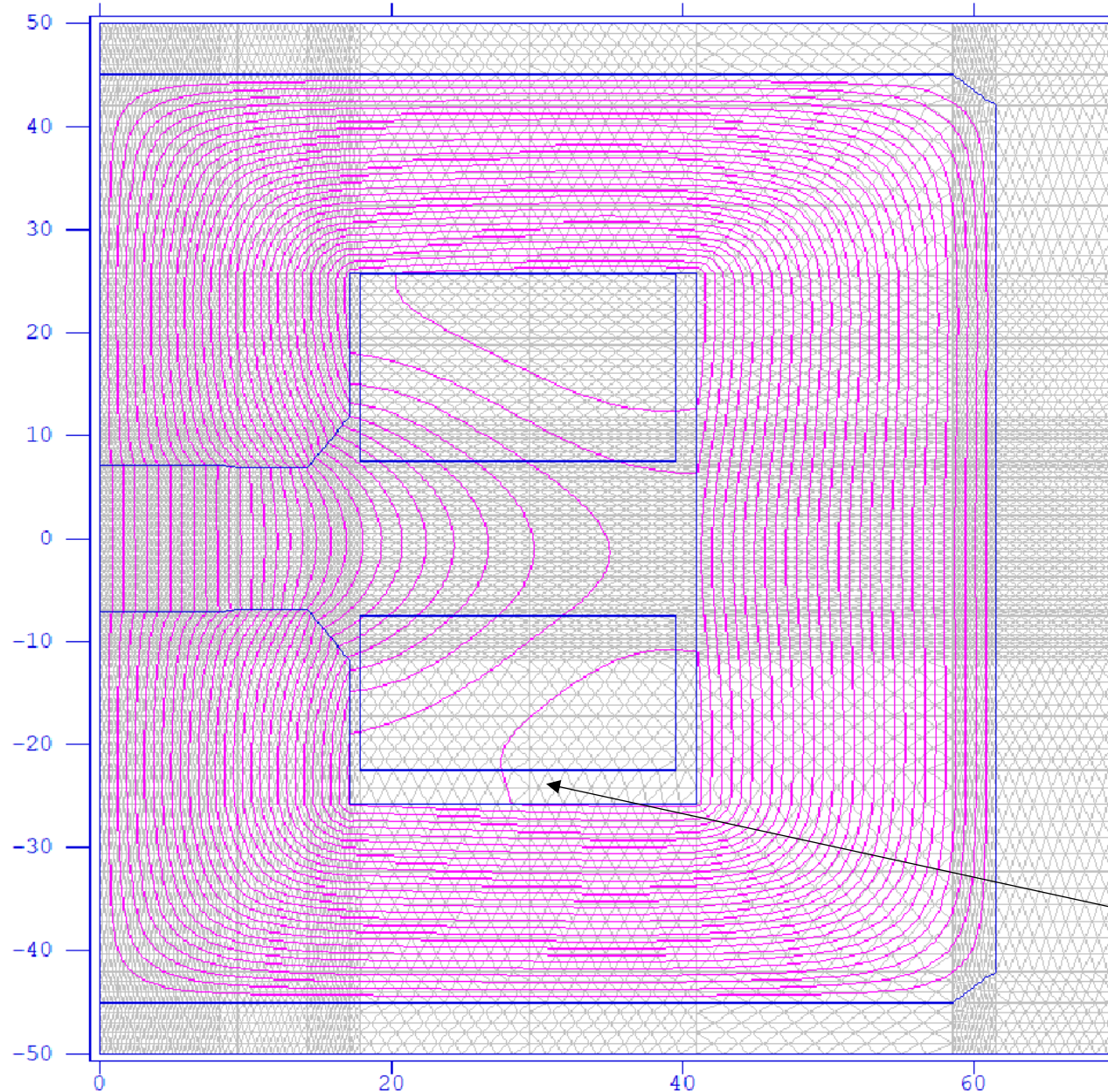




# どのようなビームになっているか

By R. Muto  
2019.3.24

B15D ver.0 2019-03-22



Cursor location and fields  
M= 1 K= 7 L= 57 Fn17  
X = 1.5789 cm  
Y = -0.44612 cm  
Bx = -9.741 G  
By = 1.4948E+04 G  
B = 1.4948E+04 G  
Az = -2.3601E+04 G-cm

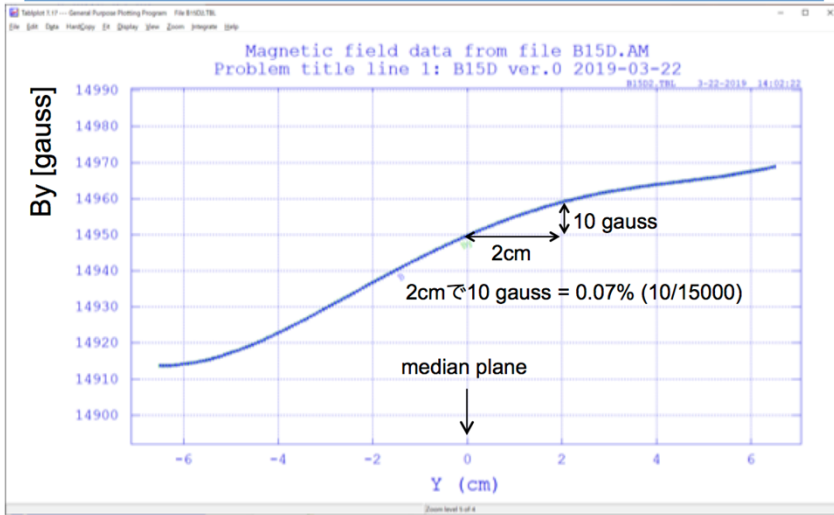
800A x 120巻 x 2  
の下コイルを96巻とし、  
電流を880Aにした

24巻分へらした

出典：“20190327\_350Btoptics”

## Normal 成分

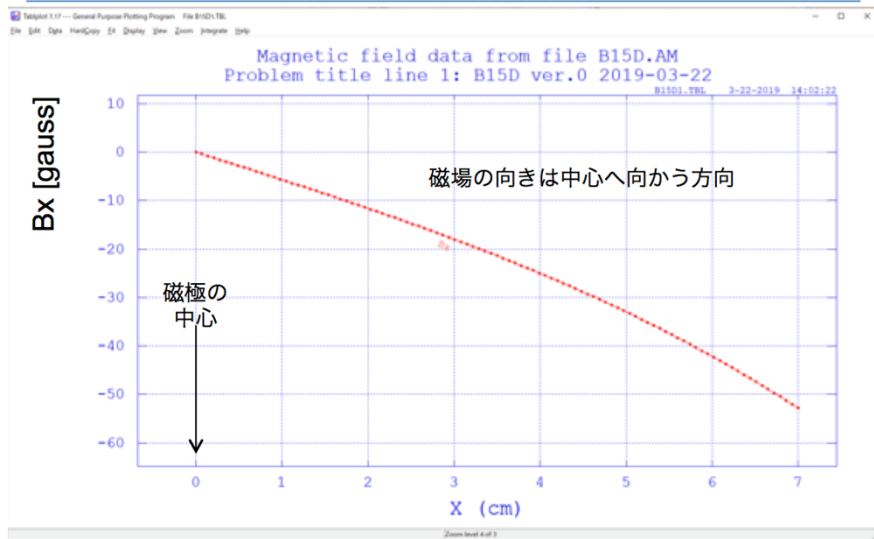
Byの分布 (vertical, 磁極中心)



$$ByL [\text{gauss} \cdot \text{m}] = 32904 + 1175*y - 9573*y*y \quad (y \text{ は [m]})$$

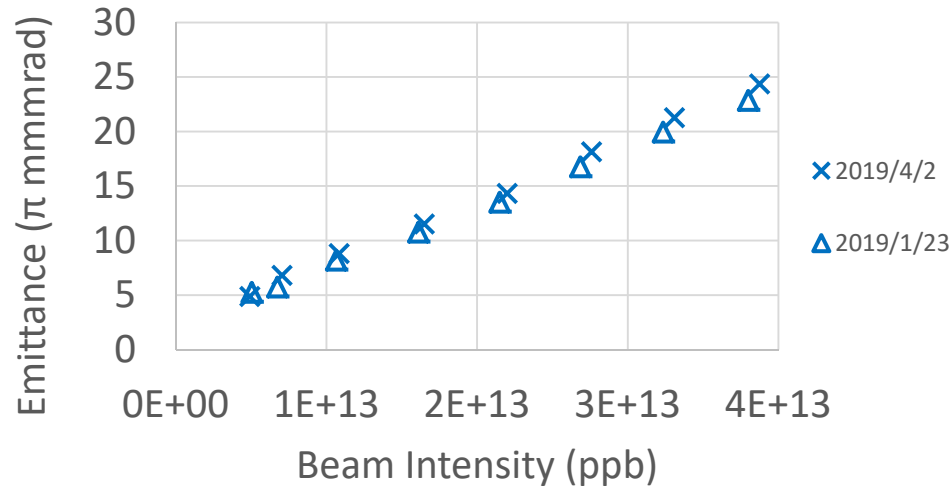
## Skew 成分

Bxの分布 (horizontal, median plane上)

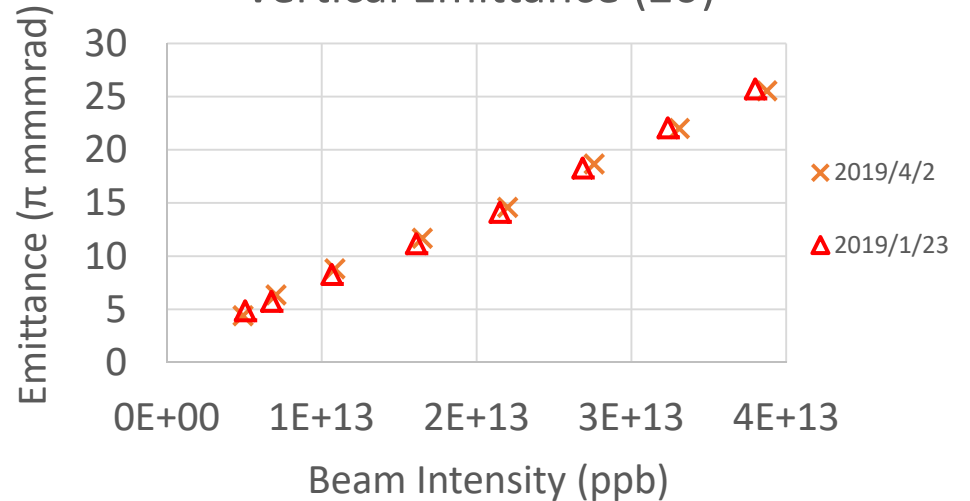


$$BxL [\text{gauss} \cdot \text{m}] = -1194*x - 4376*x*x \quad (x \text{ は [m]})$$

### Horizontal Emittance ( $2\sigma$ )

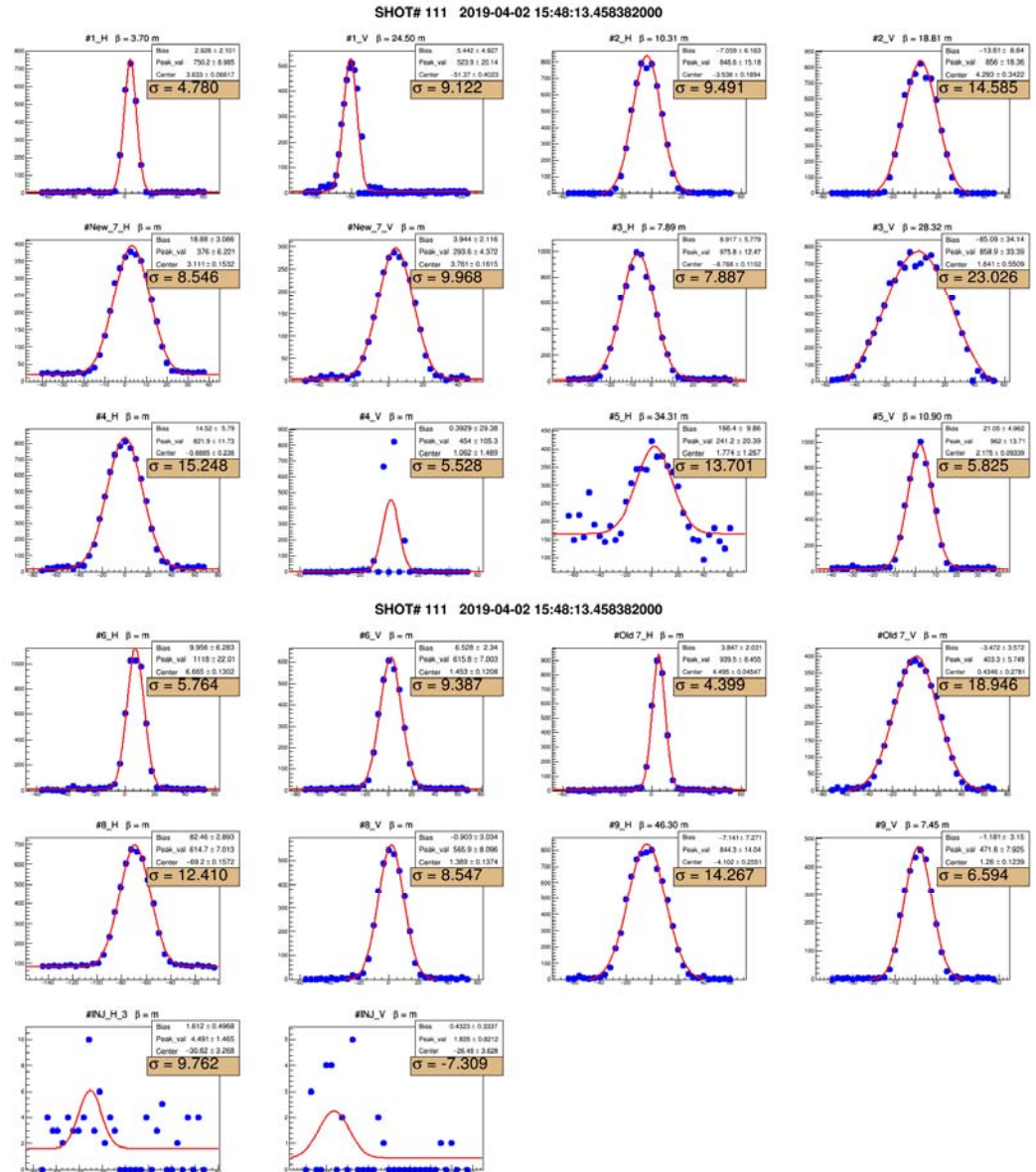


### Vertical Emittance ( $2\sigma$ )



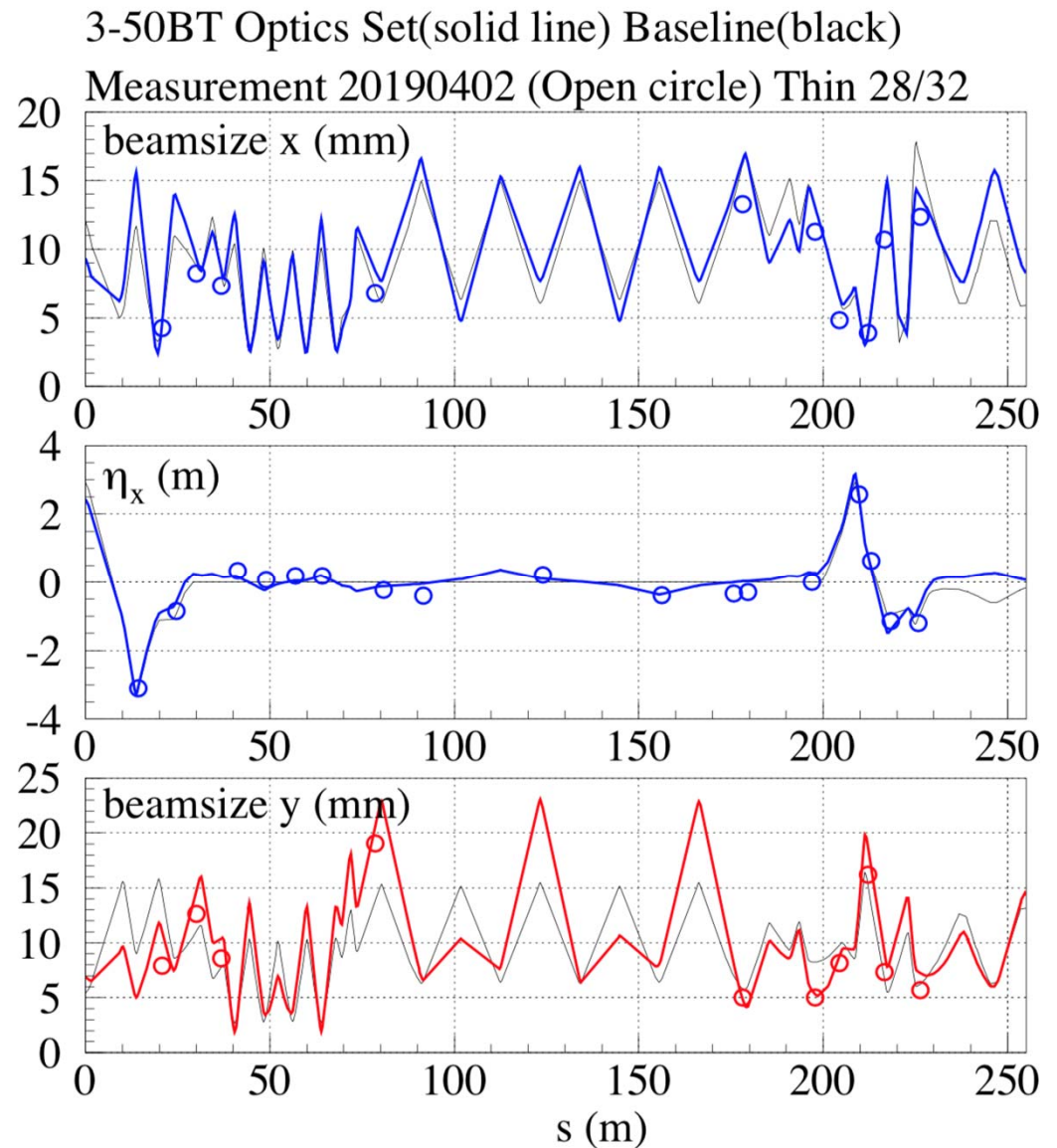
# 2019/4/2 MRPM測定

- Shot 111
- Thin 28/32
- $7.75e13$  ppp, 2 bunch



# 3-50BT Optics 測定 2019/4/2

- Shot 109 - 111
- Thin 28/32
- Optics at Pulse Bend
- $a_x$  1.366,  $b_x$  13.402
- $a_y$  0.328,  $b_y$  7.393
- $e_x$  2.438,  $e_{px}$  -0.218
- $Emitx$   $6.1\pi$ ,  $emity$   $6.4\pi$



# Beam Emittance 測定 2019/4/2

- $2\sigma$  Emittance of  $3E+13$  ppb beam
- 2019/4/2
  - H  $19.5\pi$ , V  $20.1\pi$
- 2019/1/23
  - H  $18.5\pi$ , V  $20.4\pi$

設定	Intensity (ppb)	Emit X ( $1\sigma$ )	Emit Y ( $1\sigma$ )
SX設定	$7.05E+12$	1.702	1.588
安居さん	$4.92E+12$	1.217	1.098

Thin	Intensity (ppb)	Emit X ( $1\sigma$ )	Emit Y ( $1\sigma$ )
8	$1.09E+13$	2.200	2.200
12	$1.65E+13$	2.879	2.918
16	$2.20E+13$	3.581	3.645
20	$2.76E+13$	4.536	4.664
24	$3.31E+13$	5.318	5.499
28	$3.88E+13$	6.090	6.384

