

## 話 題

## 東日本大震災による KEK 電子陽電子入射器の被害について

榎本 収志\*

Damage on the KEK  $e^-/e^+$  Injector Linac by the Great East Japan Earthquake

Atsushi ENOMOTO \*

## Abstract

The Great East Japan Disaster has caused heavy damages on the KEK  $e^-/e^+$  Injector Linac. After two month has passed, part of the Linac was recovered and the beam injection for the PF ring is under testing. This report describes the situation of damages and recovery efforts, some causes enlarging damages and the countermeasures, and the recovery plan for the remaining part of the Linac.

## 1. はじめにー3月11日(金)午後2時46分

同日午前平成22年度の運転を終了して約1か月の保守に入ったその時だった。私は電子陽電子入射器<sup>1)</sup>トンネルで始まったビームラインの測量に立ち会っていて、午後3時から始まる打ち合わせのため、放射線監視ゲートに上がったところだった。これまで全く経験したことのない激しい揺れと騒音が長くつづいた。最初の揺れが治まると、入射器棟で仕事をしている職員、三菱電機サービスや低速陽電子グループの方たちが玄

関前に出てきた。最初は直感的に「遂に関東大震災が来た」のかと勘違いした。非常電源によりPHSが生きていたため研究棟7階の居室にいた入射器職員と連絡を取り合い、指定避難場所で合流した。訓練通りグループ毎に点呼を行い本部に報告した。幸いけが人はいなかった。しかし、7階では本棚が倒れて机の下に閉じ込められたため、PHSで助けを呼んで救出された女性もいた。「生きた心地がしなかった。」という声を沢山聞いた。後で自分の居室を見たが、本棚が倒れ扉のガラスが粉々に飛び散っていた。(図1)どの部屋も同じような有様だった。



図1 震災直後の研究棟7階の居室。本棚が倒れて書物が散乱し、扉のガラスが粉々に割れて飛び散っている。復旧の現場指揮をとる必要もあり、部屋の整理は後回しにして、居場所を入射器棟に移した。

## 2. 主な被災状況

職員が解散した4時過ぎ入射器棟に入った。停電状態だったが分電盤のブレーカをすべて落とした。つぎに管理区域が解放状態になっていないか点検しつつ、被災状況の見回りをを行った。トンネルは悲惨なものだった。トンネルの建物の継ぎ目から泥や地下水が吹き出し、まわりの床が汚れ、水浸しになった。リニアック本体では、あちこちで真空マニフォールドやBPM (Beam Position Monitor) のベローズが引きちぎれ変形していた。陽電子発生装置下流の加速ユニットでは、架台が大きく変形しており、Qマグネット1台が床に落ちていた(図2)。これらの被災の状況は入射器のウェブサイト<sup>2)</sup>で公開されている。

初期に目視や通電試験で判明した主な被害状況をま

\* 高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設  
Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization  
(E-mail: atsushi.enomoto@kek.jp)

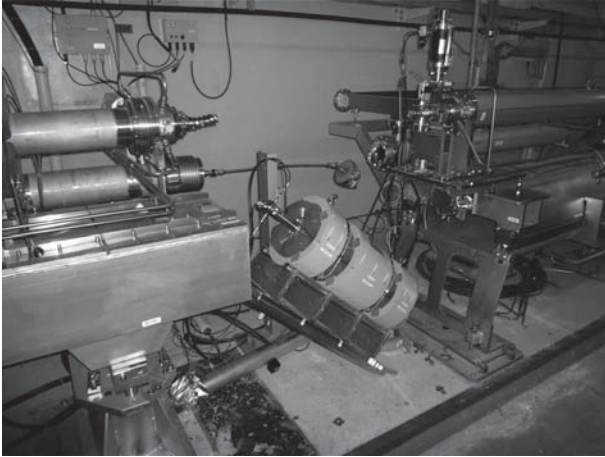


図2 右側の加速ユニット架台は脚が塑性変形し右側に傾いている。加速ユニット間が開いて、架橋型架台に載っていた四極電磁石が床に転落した。BPMの溶接ベローズはソフトクリームのように延びてちぎれている。四極電磁石後方に見える真空マニフォールドの成型ベローズも無残に引き裂かれている。

とめると次の通りである。

- 被害の第一は、入射器真空が600 m 全域にわたって破壊され、またトンネル内の空調が停止したため、約240本の加速管が湿度の高い空気に曝されたことである。金属片などのゴミやほこりを吸引した可能性もある。
- 加速ユニットのアンカー、留め金の破損、加速管支持脚・加速ユニット架台脚部の挫屈、変形、損傷により、加速ユニットが大きくずれた（最大10 cm以上）。
- 加速管、クライストロン、高周波パルス増幅器(SLED)、高周波電力分配器、モニター、制御モジュールなど、リニアック主要機器の故障が真空リーク試験や通電試験で次々と判明している。
- 施設の被害として、地震により建物継目から多量の湧水が発生した(図3)。通常リニアック全体で約2 t/day 以下であるが、一時60 t/day を超えた。止水工事を行ったが、いまだ完全には止まっていない。エア配管の破損など設備の損傷も多数発生した。

### 3. 入射器の復旧作業

震災直後 KEK に「東日本大震災対策本部」が設置された。加速器の点検は施設部による建物・設備の被害調査・点検後、電力事情も考慮して自主規制をしながら実施された。KEKB は SuperKEKB<sup>3)</sup> への改造のため2010年7月から運転を休止しているが、PFとPF-ARの2011年度運転が予定されていたため、対策本部

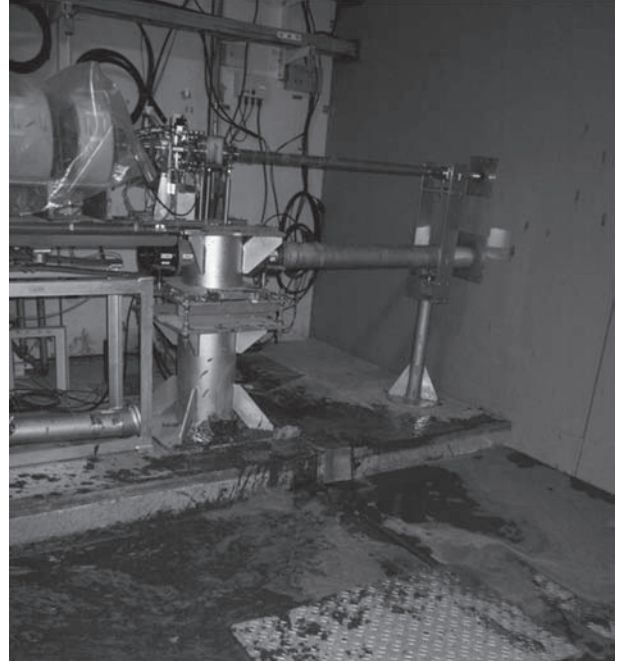


図3 入射器建物は約80 m 毎に継目がある。ここから液状化した黒い泥が噴き上がった。この後4月11日の大きな余震でさらに隙間が広がり20～30 t/day の大量の湧水が発生してトンネルを水浸しにした。

では入射器を優先して復旧させることにした。入射器では

- (1) 被害状況の把握を可能な限り迅速に行う、
- (2) 大気曝露された加速管を保護するため、できるだけ速やかに加速ユニットを粗排気して乾燥窒素に置換する、
- (3) PF, PF-AR 入射に必要な下流側(第3～第5セクター)のみを仮復旧させる、

という方針を決めた。SuperKEKB 入射器への改造を予想して、1昨年、PF, PF-AR 入射用電子銃を第1セクター上流から第3セクター上流に移設し、昨年夏、第3セクターから下流側をシールド壁で分離し、秋から独立して運転できるようにしていたことが、この方針の前提となり役立った。KEK 全体の被害状況の大きさから多少の混乱はあったが、5月連休明けを目標にこの下流部分だけ仮復旧させるスケジュールを立てた(図4)。

- 第1週(3月14日)月曜入射器棟に入射器メンバーが集合。調査人員を除き「自宅待機」となったため連絡網を確認した。管理部等を除き所内全域停電状態の中で、まず入射器棟の照明が火曜日復旧され被害調査を開始した。入射器棟の蛍光灯だけでも全て点灯すると50 kW 以上になるので節電に気を使った。18日から20日の3連休に一部の分電盤に電力

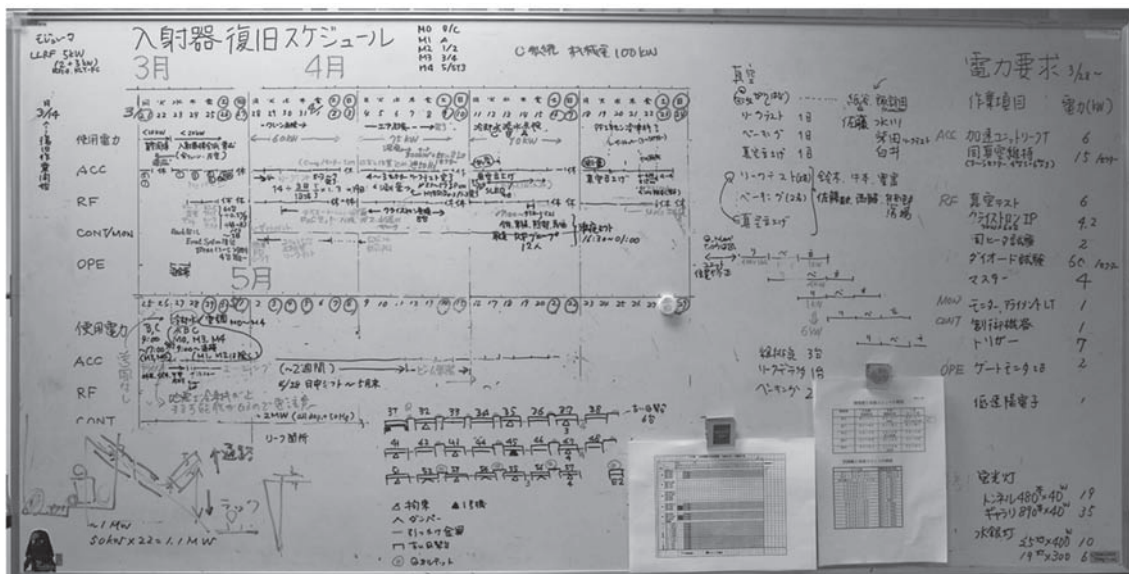


図4 入射器棟玄関ホールホワイトボードに書かれた震災後第2週目からの復旧作業スケジュール。必要電力や設備を細かく対策本部に要求し、施設インフラの復旧に合わせながらの作業であった。進捗状況に応じて更新された。

- が供給され加速ユニットの粗排気を開始した。
- 第2週 (3月21日) 全分電盤が使用可能になった。安全系を復旧させ、トンネル入室をカード管理に切り替えた。全クライストロンのヒータ試験、真空試験を実施し、イオンポンプを復旧させた。
- 第3週 (3月28日) 加速ユニットの室素置換が完了し、第3～第5セクターの真空リーク試験を開始した。加速ユニット間のビームライン (BPM 等) は分離して真空試験を行った。この作業のため、KEKB リング、PF リングから応援があり作業が進んだ。クレーンの点検があり使用が許可されたため、故障したクライストロン・アセンブリ (KLYASSY) の取り外し等、重量物の保守作業を開始した。
- 第4週 (4月4日) KLYASSY 8台の交換が完了した。ゲートバルブの開閉に必要な圧縮空気は小型のコンプレッサーを臨時に用いていたが、施設からの圧縮空気供給が復活した。RF 電力分配器2台交換。
- 第5週 (4月11日) 冷却水の通水が行われ漏水のチェックを行った。C 系統 (クライストロン用) の冷却水の使用が可能になったので、大電力高周波源のダイオード試験 (クライストロン負荷でマイクロ波を出さずにダイオードモードで行う試験) を行った。リーク試験が概ね終了したので、BPM をビームラインに組み込み真空の立ち上げが始まった。SLED の交換。
- 第6週 (4月18日) ダイオード試験で故障の判明した1台の高周波源はクライストロンパルスタンク

内のシールド部品脱落によるものと判明。制御系やサブブースタ電源など高周波励振系の点検が完了。真空立ち上げも完了。

- 第7週 (4月25日) 冷却水 A 系統 (加速管用) 等に用いられる冷凍機の点検が終わり、4月28日から第3～第5セクター加速管への大電力高周波の供給が開始された。
- この間、第3～第5セクターの測量を KEKB リングの協力を得て実施した。アライメントは SuperKEKB 入射器試運転までにきちんとやる必要があるが、今回は早急な復旧をめざし、非常に大きなずれのあった部分のみのローカルな修正にとどめた。4月11日の余震では新たなリーク発生もあり苦戦したが、何とか5月連休前に第3～第5セクターのみではあるが加速管への大電力高周波投入が可能で、5月16日から PF リングへの入射試験を行っている (図5)。

#### 4. 加速ユニットの被害の原因について

今回の震災での被害の多くはトンネル内の加速ユニットであった。これまで震度4～震度5強の地震を何度か経験してきたが全く被害がなかったことから、その最大の原因は入射器建設以来30年間で初めて経験した激しいゆれにあったものと思われる。今回は震度6弱であり、揺れた時間も長く約3分続いた。震災直後、「同 (気象) 庁が加速度計を分析した結果、震度6弱だった岩手県大船渡市で991ガル、震度5強だっ



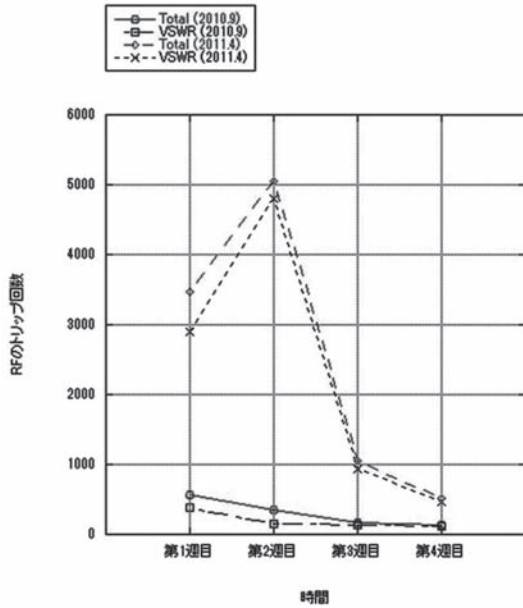


図5 電子陽電子入射器大電力高周波源のトリップ頻度。昨年秋(2010.9)と今回の立上げ時(2011.4)の比較。第1週～第2週のトリップ頻度が極めて大きいことが分かる。今回、ビーム調整の始まった第3週以降は昨年より全体的に出力を10%程度下げて運転しているため、トリップ頻度が急激に下がっている。

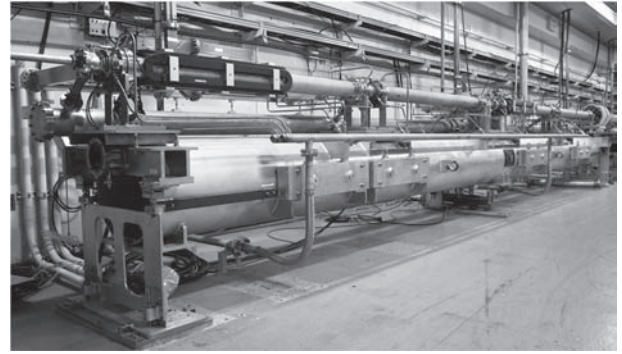


図6 KEK電子陽電子入射器加速ユニットの標準架台。架台は直径約53 cm、長さ約8.5 mの鋼管でできており、その上に設けられた5面のサブ架台に4本のSバンド2 m長加速管が搭載される。架台は入射器ビームライン鉛直下方420 mmの位置にセットされるレーザー光軸を架台上下流各端面の4分割半導体検出器により検出することによりアライメントされる。このとき、サブ架台の上平面は水平でビームライン鉛直下方300 mmとなり、この平面に付けられる基準レールにより加速管のビームラインに対する水平直角方向の位置決めがされる。架台はバネの機能を持つ脚により柔らかく支持され、地震の振動を減衰して元の位置に復元するように設計されている。

た宮城県石巻市で675ガル、同じく5強の東京都心でも259ガルを観測した。」とのニュースがあったように、震度6弱のつくばでも、場所や方向により、加速ユニット架台の設計基準としていた0.5 g(490ガル)を大きく超えた可能性があるのではないか。

入射器の加速ユニット架台はSLACの2マイル加速器<sup>4)</sup>を参考にして約30年前に設計され、三菱重工名古屋航空機製作所(当時、略称「名航」)で製造されたものである(図6)。

私もその当時から入射器の建設に携わっているが、SLACを参考にしつつも、それ以上の性能のものという意気込みがあった。SLAC加速器は建設直後BBU(長パルス)に苦しめられた。KEKで、それまで日本では一番長かった東北大学核理研のリニアックの約10倍の規模のリニアックを建設するに当たって、克服すべき課題の一つがこのBBU(Beam Blowup)対策であった。そのため、加速管の構造(カプラ電場の対称化)や工作精度、ビーム集束系の強度、そしてこれらの装置のアライメントに注意を払った。加速管や架台はアライメントを容易にするため軽くし、スライドガイドを用いて滑らかに動くように設計した(当時はまだムーバを使って位置を制御する考えまではなかった)。また、加速管を搭載した架台上部構造は板バネにより

外部からの振動を吸収し、元の位置に復元するように設計した。このような設計や製作は「名航」の得意とするところであり、(見る人の感性の違いもあると思うが)私は大変美しくスマートに作られていると思う。そして、見栄えばかりでなく、実験の結果、BBUの閾値もSLAC加速器を上回った<sup>5)</sup>。しかし、今回の被害から判明した問題は、架台の縦(ビーム軸)方向の固有振動周波数が約3 Hz前後にあり地震の振動に合ってしまったことである。この周波数は架台脚の寸法から概略計算できるが、常微動測定装置の結果<sup>6)</sup>にも示されている(図7)。このことがビームダクトや真空マニフォールドのベローズを多く破壊する原因となり、場所によっては架台脚の挫屈(図8)により架台自体の破壊を招く結果となった。

## 5. A～2セクターの復旧

入射器全体の半分以上を占める、残りの部分の復旧については、復旧予算がどのように手当てされるかによるが、以下のような方針を決めた。

- (1) A～2セクターのリーク試験、RF試験はできるだけ早急に行う(優先度1)。
- (2) A, Bセクターの仮復旧をつぎに行う。
- (3) C～2セクターはそのあとに行う。

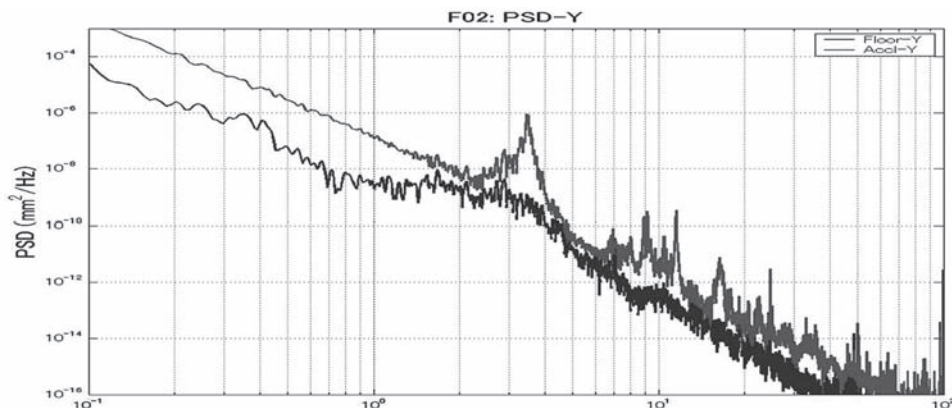


図7 加速ユニット標準架台の振動スペクトル。横軸は周波数，縦軸は単位周波数当たりの振動のパワー(二乗平均加速度)で Power Spectral Density (PSD) と呼ばれる。

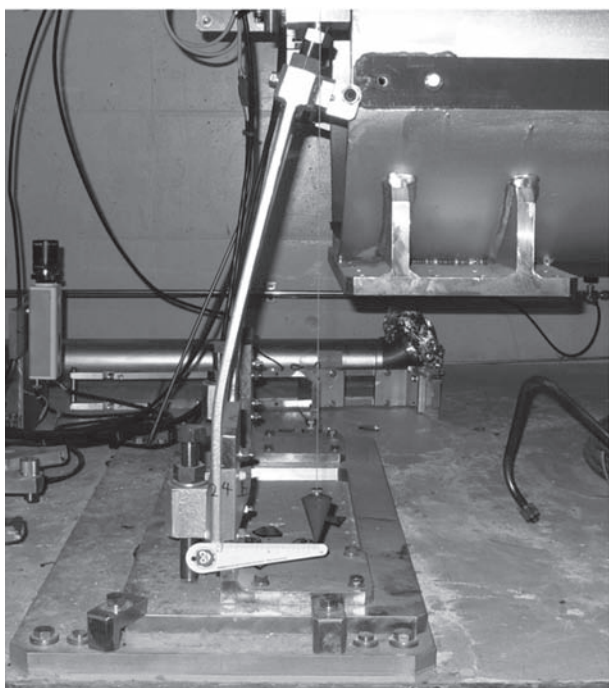


図8 塑性変形した加速ユニット架台。この架台は標準架台ではなく加速管の他に四極電磁石が載っている。また、現在の加速ユニット架台は横方向の位置復元性にも問題のあることがわかっており、架台修復に際して今後の課題となっている。

全体復旧については、加速管，クライストロン，加速ユニット架台の損傷などすぐに製造できないものもある。入射器は SuperKEKB 入射器に改造を行うことになっており、元の入射器に復元することはない。今回

の震災で判明した脆弱な部分の修正も行いつつ、最終的なレイアウトに効率よく復旧させる予定である。

## 6. まとめ

今回の震災により大きな被害を受けた KEK 電子陽電子入射器は、2か月余りの奮闘によりようやく全体の8分の3を仮復旧させたところである。復旧はまだ道半ばにも達していないが、今回の復旧をバネに2014年の試運転を目指している SuperKEKB 入射器の建設を進めたいと考えている。最後に、これまでに寄せられた機構内外の温かい支援にこの場をお借りして厚くお礼を申し上げます。

## 参考文献

- 1) 佐藤勇，穴見昌三，榎本收志，福田茂樹，小林仁，中原和夫編集，「放射光入射器増強計画」，KEK Report 95-18.
- 2) <http://www-linac.kek.jp/index-j.html>
- 3) Letter of Intent for KEK Super B factory, SuperKEKB Task Force, KEK Report 2004-4, A/H, June 2004.
- 4) R. B. Neal, General Editor, "THE STANFORD TWO-MILE ACCELERATOR", 1968, W. A. Benjamin, Inc.
- 5) A. Enomoto, K. Takeda, H. Matsumoto, I. Sato, M. Oyamada, "Beam Blowup in the PF 2.5 GeV Linac", Proc. of the 7th meeting on linear accelerators, KEK, 24-26 August, 1982, (KEK Report 82-14), pp.64-66.
- 6) 高エネルギー加速器研究機構菅原龍平名誉教授から提供していただいた。