

# RECOVERY EFFORTS OF RF SOURCES AT KEK ELECTRON-POSITRON LINAC DUE TO EAST JAPAN LARGE EARTHQUAKE

Yasuo Imai <sup>#A)</sup>, Tomoyuki Toufuku<sup>A)</sup>, Hiroki Kumano<sup>A)</sup>, Masao Baba<sup>A)</sup>, Tetsuo Morotomi<sup>A)</sup>, Mitsuo Akemoto<sup>B)</sup>, Hiroaki Katagiri<sup>B)</sup>, Tetsuo Shidara<sup>B)</sup>, Tateru Takenaka<sup>B)</sup>, Hiromitsu Nakajima<sup>B)</sup>, Katsumi Nakao<sup>B)</sup>, Takuya Natsui<sup>B)</sup>, Shigeki Fukuda<sup>B)</sup>, Hiroyuki Honma<sup>B)</sup>, Toshihiro Matsumoto<sup>B)</sup>, Shuji Matsumoto<sup>B)</sup>, Hideki Matsushita<sup>B)</sup>, Takako Miura<sup>B)</sup>, Yoshiharu Yano<sup>B)</sup>, Mitsuhiro Yoshida<sup>B)</sup>, Shinichiro Michizono<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Mitsubishi Electric System & Service Co.,Ltd.

2-8-8 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-0045

<sup>B)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

## Abstract

Sixty high-power klystrons are used at the KEK electron-positron linac. These klystrons are operated for ~7,000 hours per year. KEK electron-positron linac was damaged due to East-Japan large earthquake on March 11, 2011. The check of RF sources started on March 15, and the recovery efforts lasted 1.5 months. On April 28, rf conditioning started in the three sectors which is necessary for the injection to PF-RING and PF-AR. Beam operation was started on May 10. In this paper, damage of RF sources due to earthquake and works done to recover are reported.

## 東日本大震災からの KEK 電子陽電子入射器高周波源の復旧作業

### 1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器では高周波源として 60 台の大電力クライストロン (以下 KLY) を 8 つのセクターに分けて設置している。1997 年~2010 年度末まで年間約 7,000 時間の連続運転を行っており<sup>[1]</sup>、2010 年度は 3 月 11 日午前 9 時にビーム運転を終了した。

ビーム運転終了から約 6 時間後の午後 2 時 46 分に東日本大震災が発生した。この震災により KEK 電子陽電子入射器では様々な被害を受けた。

3 月 15 日より点検作業を開始し、余震が続く中、約 1 ヶ月半の復旧作業を経て、4 月 28 日には 2 つのリングへの入射に必要となる 3 つのセクター (24 ユニット) の RF コンディショニングを開始した。5 月 10 日には入射器後半からビーム運転を、5 月 16 日にはリングへの入射を開始した。

本稿では震災による高周波源の被害状況と復旧までの点検、作業内容および RF コンディショニングの経過について報告する。

### 2. 震災後の点検項目

震災から 4 日後の 3 月 15 日、電力が供給されていない中、懐中電灯で現場を照らしながら点検を開始した。3 月 23 日、部分的に復電したことにより機器の目視点検、通電試験を開始した。但し、電力制限を設けていたため、対象機器への通電は 1 台ずつ切り替えながら行なった。4 月 12 日、施設内冷却水循環ポンプの短時間限定稼働が始まり、機器の通電試験を行なうことが可能となった。4 月 14 日、全 KLY のダイオード試験を短時間で数台に分けて行

なった。これにより 1 台の不具合が確認されたが、それ以外は KLY への高圧印加が可能であることを確認できたため、RF コンディショニングを開始する目処がついた。表 1 に行なった点検項目を示す。

表 1: 点検項目

| 点検日   | 点検項目  | 異常 |
|-------|---|----|
| 3/15  | 施設、モジュレータ内目視点検                                | 有  |
| 23    | サブブースター KLY <sup>[2]</sup><br>ヒーター導通確認、変調器内点検 | 無  |
|       | KLY タンク内目視点検                                  | 有  |
|       | KLY MAG 電源ラック点検                               | 無  |
|       | 実験分電盤通電点検                                     | 無  |
|       | KLY フィーダー点検                                   | 有  |
| 24    | KLY 管内イオンポンプ通電試験                              | 有  |
| 25    | KLY ヒーター通電試験                                  | 無  |
|       | サイラトロン ヒーター、<br>リザーバー通電試験                     | 有  |
|       | 導波管イオンポンプ通電試験<br>(後半 3 セクター)                  | 有  |
| 28    | KLY 固定金具点検                                    | 無  |
| 4/1   | KLY コレクタ漏水痕点検                                 | 有  |
| 2     | KLY モジュレータ内部品目視点検                             | 有  |
| 5     | KLY タンクモニタフランジ点検                              | 有  |
| 12    | RF 関連機器用冷却水通水確認                               | 有  |
| 14    | KLY ダイオード試験                                   | 有  |
| 18    | サブブースター KLY 高圧試験                              | 無  |
| 19    | 不具合 KLY タンク内目視点検                              | 有  |
| 21    | 導波管イオンポンプ通電試験<br>(前半 5 セクター)                  | 有  |
| 22    | 低電力 RF アンブ出力確認                                | 無  |
| 26~28 | 立ち上げ前最終点検                                     | 有  |

<sup>#</sup> yimai@post.kek.jp

### 3. 被害状況

震災後の点検により様々な被害を確認した。最も影響が大きかったものは、KLY 管内が大気開放されたことにより KLY が使用不能となったものである。このユニットは震災前から KLY の高周波窓にリークがあった。震災前まではビーム運転に使用していたが、震災後、加速管の大気開放により窓の外側から真空引きを行なってもイオンポンプが立ち上がらなくなり、交換が必要となった。

この他、KLY 高圧タンク内および KLY フィーダーに関連した不具合があった。これらの修復には真空作業を要するため、復旧までに 3 日間以上要することとなる。表 2 に主な被害状況を示す。

表 2：主な被害状況

| 被害内容                                    | 復旧までの<br>所要時間 |
|---|---------------|
| IVR 車輪 1ヶ所 ピットへの脱落                      | 短<br>(3 日未満)  |
| KLY 電磁石電源ラック転倒<br>(電源 4 台破損)            |               |
| KLY 電磁石電源故障 (2 台)                       |               |
| サイラトロンヒーター、リザーバー<br>電源故障                |               |
| KLY イオンポンプ電源故障                          |               |
| モジュレータ内部部品不具合<br>(部品破損、ボルト緩み等)          |               |
| KLY コレクタ冷却水配管部からの<br>水漏れ <sup>[3]</sup> |               |
| KLY タンクモニタフランジからの<br>絶縁油漏れ              |               |
| 導波管接続部からの真空リーク                          |               |
| KLY 出力部導波管内真空悪化<br>(イオンポンプ立ち上げ不能)       |               |
| KLY 管内大気開放<br>(イオンポンプ立ち上げ不能)            | 長<br>(3 日以上)  |
| KLY フィーダーからの放電防止用<br>ガス漏れ               |               |
| KLY フィーダーからの絶縁油漏れ                       |               |
| KLY 高圧タンク内<br>鉛シールド転落による破損              |               |

図 1 に震災時に受けた主な被害の様子を示す。図 1-(a) は IVR の車輪 1ヶ所がピットに脱落した様子である。通常はボルトにより 2 カ所を固定しているが、ネジ穴不良により 1 カ所を完全に固定できていなかったために起こったものである。図 1-(b) は KLY 電磁石電源ラック転倒により電源が破損した様子である。表面のパネルやフィルターカバーが破損した。図 1-(c),(d),(e) は KLY 高圧タンク内に鉛シールドが転落していたものを解体し点検を行なった際の様子である。このユニットはタンク内目視点検時に絶縁油が酷く濁っていたため内部の状況を確認することができなかった。しばらく経って行なった KLY ダイオード試験では数 kV 印加時に負荷短絡によるインターロックが作動した。数日後、再度目視

点検を行なったところ、絶縁油の濁りがなくなっており内部の状況を確認できた。結果、放射線シールド用の鉛が転落し、ヒータートランス固定用碍子が破損していたためトランスの位置がずれていることが判明した。図 1-(f) は KLY フィーダーからの絶縁油漏れの様子である。放電防止用に封入しているガス圧力の低下が見られたため、解体したところ絶縁油の漏れが確認された。

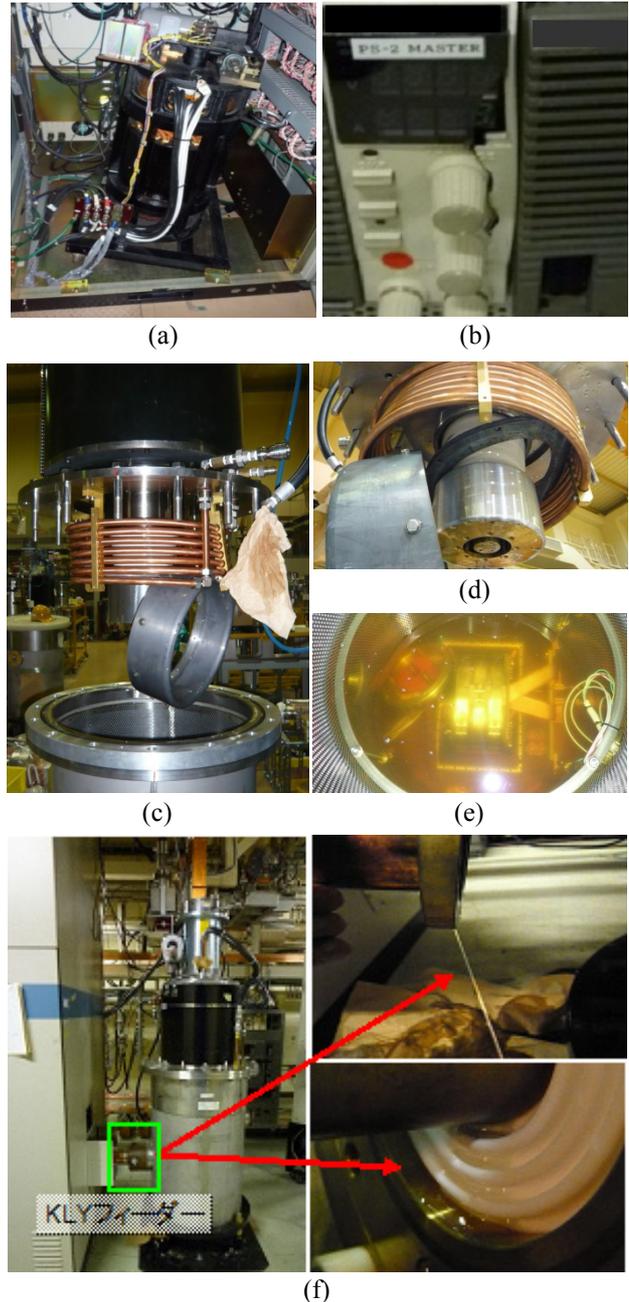


図 1：震災による被害の様子

- (a) IVR 車輪脱落
- (b) KLY 電磁石電源ラック転倒時の電源破損
- (c),(d),(e) KLY タンク内鉛シールド転落後の解体点検
- (f) KLY フィーダーからの絶縁油漏れ

#### 4. 復旧作業

今期のビーム運転では後半の 3 つのセクターを使用するため、これらの復旧作業を優先して行なった。表 3 に主な復旧作業内容を示す。

表 3 : 復旧作業内容 (後半 3 セクター分のみ表記)

| 作業日                              | 作業名<br>※ ( )内の数値は<br>ユニット数を示す    | 主な作業内容   |
|----------------------------------|----------------------------------|--|
| 3/28                             | 導波管接続部<br>真空リーク修復(1)             | 真空粗引き、<br>リークテスト、<br>ボルト増し締め   |
| 3/30,31<br>4/17                  | KLY アセンブリ<br>交換(1)               | KLY 撤去、<br>KLY 予備品設置   |
| 3/29~<br>4/21                    | KLY フィーダー<br>改修(8)               | KLY アセンブリ<br>撤去/解体、<br>絶縁油抜き取り、<br>部品交換、<br>KLY 再設置  |
| 4/1                              | KLY コレクタ漏水<br>修復(1)              | KLY コレクタ部<br>冷却水配管改修   |
|                                  | KLY 電磁石<br>電源ラック交換(1)            | REMOTE/AC コント<br>ローラ交換、<br>電源交換、電源校正   |
| 4/13                             | KLY 電磁石<br>電源交換(1)               | 電源交換   |
| 4/18~<br>20                      | KLY タンク<br>モニタフランジ<br>改修(11)     | 絶縁油抜き取り、<br>部品交換、<br>絶縁油再注入  |
| 4/19,22                          | KLY 出力部<br>導波管用イオン<br>ポンプ立ち上げ(3) | 真空粗引き、<br>リークテスト、<br>電源立ち上げ  |
| 4/22~<br>5/13<br>(実質<br>9日<br>間) | KLY<br>高圧タンク内<br>修復(1)           | KLY アセンブリ<br>撤去/解体、<br>鉛シールド整形、<br>冷却水配管修復、<br>ヒータートランス<br>固定用碍子交換、<br>ヒーター通電試験、<br>KLY アセンブリ<br>組み上げ、<br>ダイオード試験、<br>KLY 設置 |

1 件の作業で最も時間を要したのはクライストロンタンク内復旧作業であった。これは真空作業の他、冷却水配管修復やその後の通水試験、ヒーター通電試験等作業工程が多かったためである。KLY フィーダー改修は 8 ユニット行なっているため、約 3 週間の期間を要した。

#### 5. RF コンディショニング

今回のコンディショニングでは、震災時の部品破損による加速管内への大気混入<sup>[4]</sup>等の影響もあり、従来のコンディショニングと比較して、所要時間、

真空悪化及び放電によるダウン回数が大幅に増加した。例年真空作業後に行なっていた導波管、導波管用イオンポンプのベーキングを今回は行なっていなかった事もダウン回数が増加した要因の一つであると考えられる。

コンディショニング終了時点で一次側充電電圧 (以下 Es) が震災前の運転値に到達しなかった箇所は 4 ユニットあった。図 2 に今回運転に使用した 3 セクター分について、2009 年秋、2010 年秋、2011 年春のコンディショニングの推移を示す。

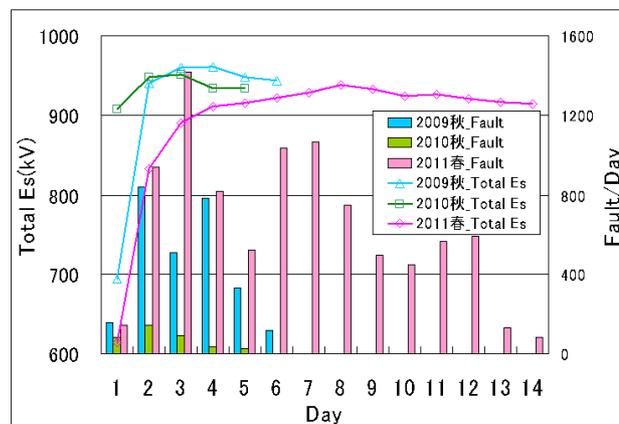


図 2 : ユニット全体のコンディショニング推移 (2009 ~ 2011 年)

図中の Total Es は 24 ユニット分の Es の合計、Fault/Day は 1 日あたりの真空関連および KLY への反射 (以下 VSWR) インターロック (インターロック設定値 1.40) 作動回数の合計である。コンディショニング開始日は導波管の真空悪化によるダウンが大半を占め、2 日目からは VSWR によるものがほとんどである。

2009 年秋は長期メンテナンス期間<sup>[5]</sup>中 KLY 交換や導波管窓交換等真空作業に 1 日以上要した箇所が 9 ユニットあったため、コンディショニング開始から 4 日目まではダウン回数が多くなった。ただし、この間も Es は順調に上がっていたため、5 日目にダウン回数が多くなっていたユニットの Es を下げたことにより、以後ダウン回数が大幅に減少した。2010 年秋はメンテナンス期間中の真空作業が短時間で終えた 3 ユニット分のみであったため、コンディショニング時のダウン回数も少なく 2 日目にはビーム調整を開始できる状態になっていた。これに対し、今期のコンディショニングでは殆どのユニットの加速管に大気が混入した影響もあり、Es が低いにも関わらず、例年と比較して大幅にダウン回数が増加し、所要日数も例年の倍以上となった。ビーム調整開始日は、コンディショニング開始から 13 日目となった。但し、ビームエネルギーは殆ど余裕が無い状態であった。

図 3 に個別ユニット(3-4)のコンディショニング推移を示す。2009 年夏に真空ゲージ交換のため加速管の大気暴露をしたことから、今回のコンディショニングとの比較のために表記した。

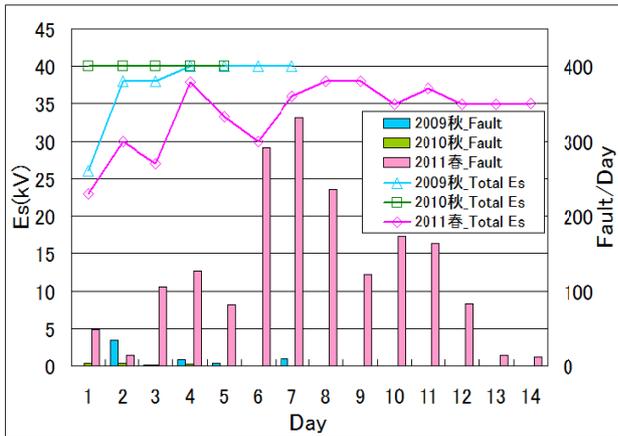


図 3 : 3-4 ユニットのコンディショニング推移 (2009 ~ 2011 年)

2009 年はコンディショニング開始当初ダウンが多く見られたが、徐々にダウン回数も減少し、Es も早く上昇した。2010 年は真空作業を行っていないためダウンは殆どない。今回のコンディショニングでは、数日経過してもダウン回数が非常に多い状態が続いた。そのため、RF 幅を狭くしてのコンディショニングを行なった。一時的に Es が上昇したが RF 幅を元の状態に近づけるとダウン回数が大幅に増加した。2 週間経過しても Es は震災前より 3kV 低い状態であったが、他のユニットのコンディショニングが進み全体のビームエネルギーが目標値に到達したため Es が低いまま運転に使用した。

## 6. ビーム運転開始後の KLY 運転状況

ビーム運転開始以降も例年と比べ全体の VSWR でのダウン回数は多くなっている。図 4 に今回運転に使用した 3 セクター分について、2009 年秋、2010 年秋、2011 年春の立ち上げ後 3~8 週目の Es、ダウン回数の推移を示す。今期は 5 週目まで非常に多くダウンしていたが 6 週目には例年とほぼ同レベルまで減少した。但し、例年と同程度の Es まで上げるとダウン回数は大幅に増加すると思われる。

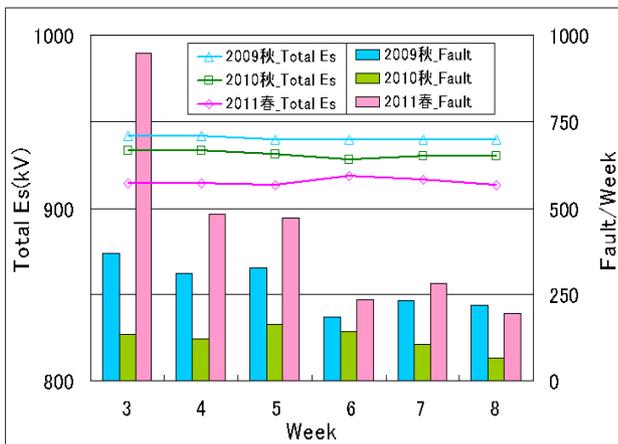


図 4 : ユニット全体の運転状況の推移 (2009 ~ 2011 年立ち上げ後)

この他、VSWR が頻りにインターロック設定値より大幅に高くなりダウンした箇所が 2 ユニットあった。放電箇所の調査を行なったところ、導波管窓<sup>6)</sup>付近での放電が多くなっていた。導波管窓の平均運転時間は 60,000 時間程度であるが、どちらの窓も運転時間は 20,000 時間程度と非常に短い。震災後窓付近の真空度が震災前と比べ 1 ケタ程度低くなっているため、これが原因と考えられる。この 2 ユニットは長期メンテナンス期間に交換を行なう予定である。図 5 に放電調査時の KLY 及びパルス圧縮器 (以下 SLED) の出力、反射波形モニター箇所を、図 6 に 3-6 ユニットの導波管窓放電時の波形を示す。

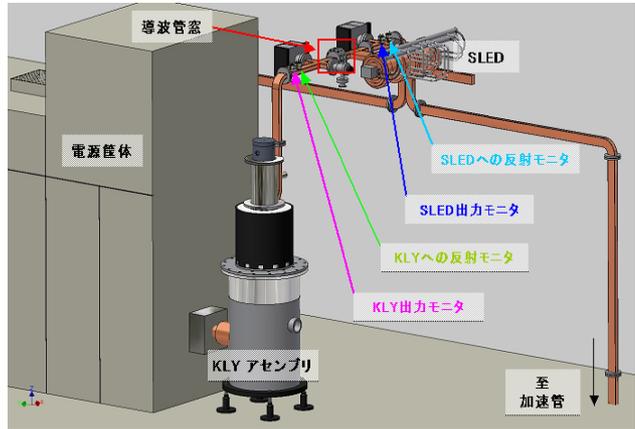
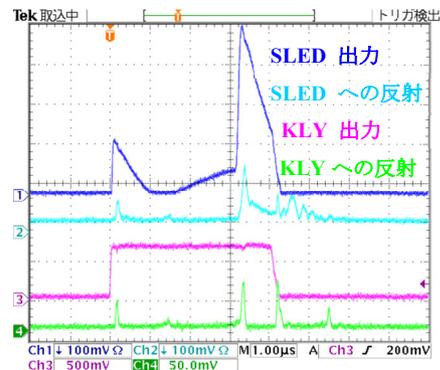
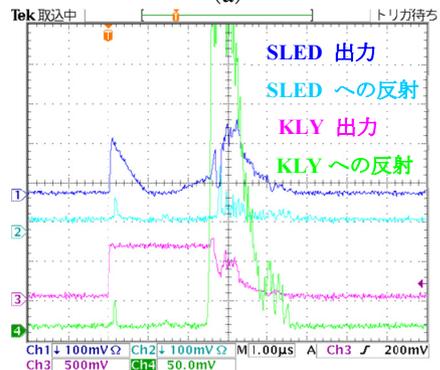


図 5 : 放電箇所調査時にモニタを行なった箇所



(a)



(b)

図 6 : 3-6 ユニットの導波管窓放電時の波形

(a) 正常時 VSWR 1.05

(b) 放電時 VSWR 5.61

導波管窓の放電時は、KLY への反射が非常に大きくなり、SLED 出力が大きく削られていることが分かる。

電源筐体でもいくつかの不具合が発生した。図 6 に 5-3 ユニットで発生した放電の様子を示す。

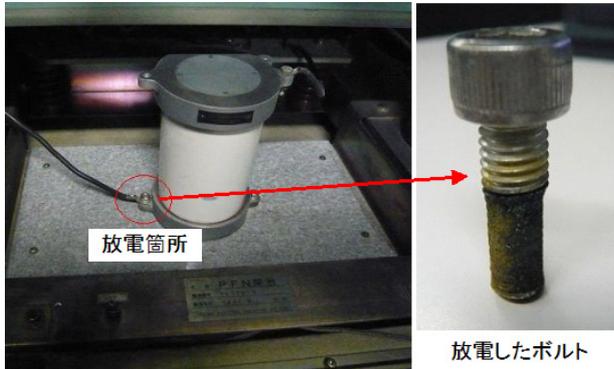


図 7: 充電筐体内コーション回路のコンデンサとケーブル間で起こった放電箇所の様子

震災後の目視点検では見つけられなかったが、充電筐体内コーション回路のコンデンサとケーブルを接続していたボルトのネジ穴が潰れ、ボルトがやや浮き上がった状態になっていた。そのため、これらの中で放電が起っていた。運転開始後、大きなパルス音がしていたため点検したところこのような症状が判明した。

この他、高圧ライン整流トランス入出力の異常、高圧ラインのナイフ SW の温度上昇等も見られた。

## 7. 今後の予定作業

7月7日に今期のビーム運転を停止し、約2カ月間の長期メンテナンス期間に移行している。次回は、9月13日に立ち上げを予定している。今期のビーム運転に使用しなかった前半5セクター(36ユニット)の立ち上げを行なうため、メンテナンス期間にはこれらの復旧作業が主となっている。主な作業項目は、後半の3セクターでも行なったクライストロンフィーダー改修を6ユニット、クライストロンタンクモニターフランジ改修を21ユニット行なう。この他、震災後、導波管用イオンポンプの立ち上げ時期が遅れたため真空悪化によりイオンポンプが立ち上がらなくなった箇所が22ユニットある。これらは真空粗引きを行なった後イオンポンプを立ち上げる必要がある。

運転に使用していた後半3セクターについては、前述した導波管窓交換を2ユニット予定している。

この他、震災時にサイラトロン保管棚が変形したことにより、転倒したサイラトロンもいくつか見られた。図8に変形したサイラトロン棚および転倒したサイラトロンの様子を示す。これらは今後動作試験を行なう必要がある。



(a)



(b)

図 8: 震災時に変形したサイラトロン保管棚

(a) 変形したサイラトロン保管棚

(b) 転倒したサイラトロン

## 8. まとめ

2011年3月11日に発生した東日本大震災により KEK 電子陽電子入射器では様々な被害を受けた。復旧作業は概ね順調に進められている。今後も復旧に向け、入念な点検を行ない、作業を進めていく。また、現在は SuperKEKB へ向けたアップグレード<sup>[7]</sup>も並行して進めている。しっかり工程管理を行ない、着実に作業を進めていく必要がある。

## 参考文献

- [1] H.Honma, "Present Status of the KEK Electron/ Positron Injector Linac", Proceedings of this Meeting.
- [2] M.Baba, et al, "MAINTENANCE ACTIVITY OF HIGH-POWER RF SYSTEM IN KEK ELECTRON-POSITRON LINAC", Proceedings of the 35th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2010, THPS046.
- [3] T.Toufuku, et al, "Maintenance Activity of Klystrons and Thyratrons in KEK Electron-Positron Linac ( II )", Proceedings of the 33th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2008, pp.864 - 866.
- [4] K.Suzuki, et al, "Recovery Efforts of Vacuum System at KEK Electron-positron LINAC due to East Japan large earthquake", Proceedings of this Meeting.
- [5] Y.Imai, et al, "Maintenance Activity of Klystrons and Thyratrons in KEK Electron-Positron Linac", Proceedings of the 32th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2007, TP18.
- [6] H.Kumano, et al, "Maintenance Activity of RF Sources in KEK Electron-Positron Linac ( II )", Proceedings of the 31th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2006, pp.850-852.
- [7] T.Kamitani, et al, "UPGRADE OF KEKB INJECTOR LINAC FOR SUPERKEKB", Proceedings of the 35th Linear Accelerator Meeting in Japan, 2010, WELH03.