

福島第一原子力発電所内外の電気設備の被害状況等に係る記録
に関する報告を踏まえた対応について（指示）に対する
追加報告について

平成24年1月19日

東京電力株式会社

目 次

1 . はじめに

2 . 地震発生以後、福島第一原子力発電所内外の電気設備が被害状況に至った原因について 究明した結果

) 福島第一原子力発電所 1 / 2号開閉所遮断器・断路器の損傷原因

) 新福島変電所の主要変圧器・遮断器・断路器・計器用変圧器・変流器の損傷原因

[添付資料]

資料 - 1 新福島変電所 地表面地震動解析結果

1. はじめに

当社は、平成23年4月25日に受領した「電気事業法第106条第3項の規定に基づく報告の徴収について」(平成23・04・24 原第2号)に基づき、福島第一原子力発電所内外の電気設備の被害状況、当該発電所への送電の状況及び応急措置により外部電源を復旧させた状況に係る記録について、平成23年5月16日に報告しました。

また、報告と同時に受領した「福島第一原子力発電所内外の電気設備の被害状況等に係る記録に関する報告を踏まえた対応について(指示)」(平成23・05・16 原院第7号)に基づき、地震発生以後の福島第一原子力発電所内外の電気設備が被害を受ける状況に至った原因について究明した結果や福島第一原子力発電所への送電停止をもたらした送電線の保護装置の動作に至った原因について究明した結果を取り纏めた報告書を平成23年5月23日に提出しています。

上記の報告では、「福島第一原子力発電所1/2号開閉所遮断器・断路器の損傷原因」および「新福島変電所の主要変圧器・遮断器・断路器・計器用変圧器・変流器の損傷原因」については、報告後も引き続き、近接する観測点データなどから地震動を推定して、必要により電気設備の構造を詳細模擬した耐震解析を行うこととしておりました。

今回、その結果に関して報告するものです。

2. 地震発生以後、福島第一原子力発電所内外の電気設備が被害状況に至った原因について究明した結果

）福島第一原子力発電所1/2号開閉所遮断器・断路器の損傷原因

(1) 福島第一原子力発電所地点における地震動推定

福島第一原子力発電所1/2号開閉所では、地震観測装置が設置されていないため、1/2号開閉所(地表面レベルO.P.33.0m)に近接し、標高もほぼ同じレベルである地震観測室(南地点)(O.P.32.9m)の地震観測記録(東北地方太平洋沖地震本震(以下、「TTO地震本震」という))を用いることとする。

また、遮断器・断路器は1/2号開閉所建屋内に收容されているため、TTO地震本震による1/2号開閉所建屋の地震応答解析を実施し、遮断器・断路器の評価用の地震動を推定する。

a. 地震観測室(南地点)の地震観測記録

TTO地震本震の地震観測記録は、図1に示す自由地盤系/地震観測室(南地点)における地表面付近のGS1観測点(O.P.32.9m)の記録を用いる。図2にGS1観測点におけるTTO地震本震の加速度時刻歴波形を示す。

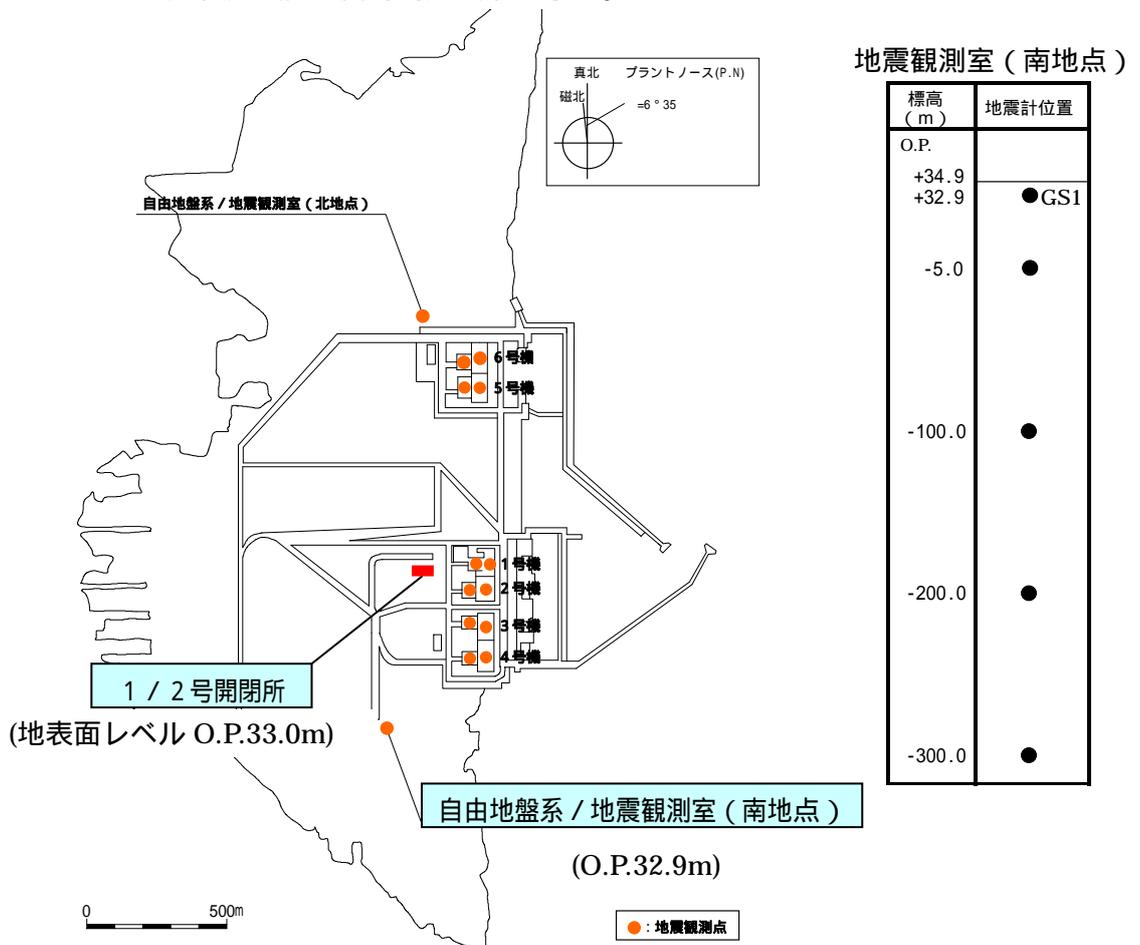
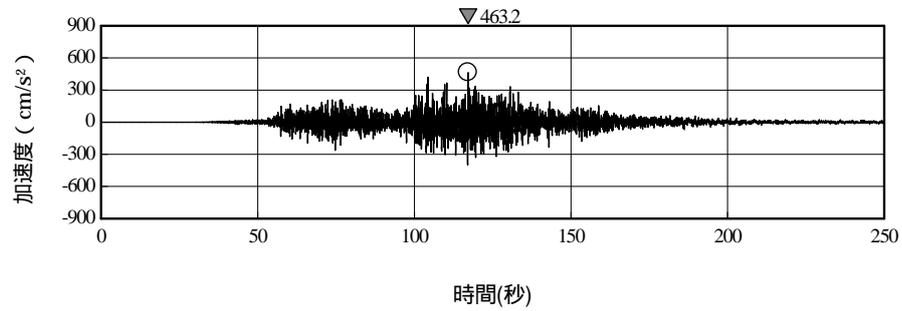


図1 福島第一原子力発電所における地震観測点の配置

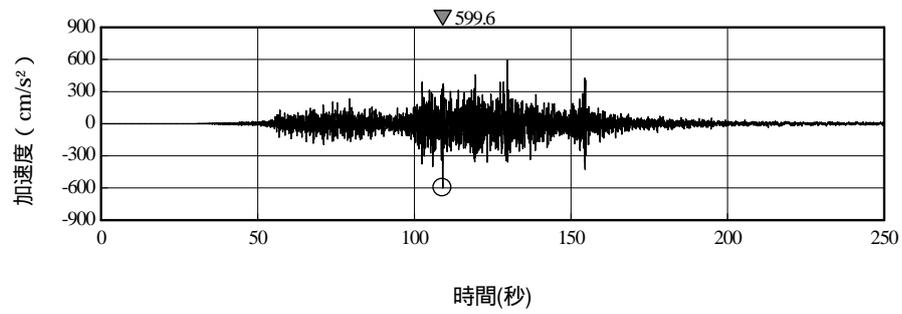
< 凡例 >

▼ : 最大加速度値

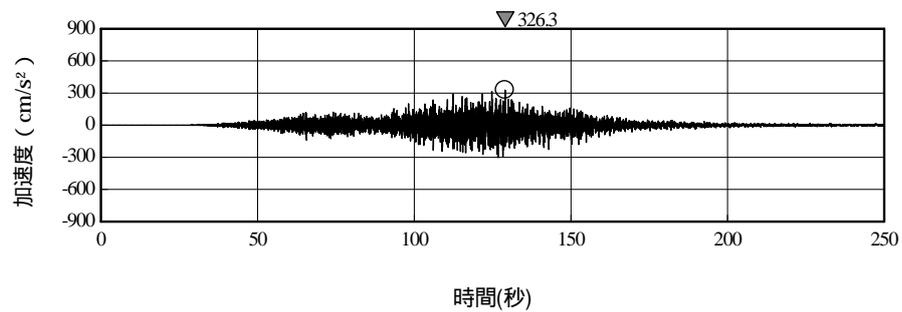
○ : 最大加速度発生点



(a)NS方向



(b)EW方向



(c)UD方向

図2 T T O地震本震の加速度時刻歴波形 (南地点 : G S 1)

b. 1 / 2号開閉所建屋の地震応答解析

1 / 2号開閉所建屋に収容されている遮断器・断路器の評価用の地震動を推定するために、1 / 2号開閉所建屋を対象に、T T O地震本震による建屋の地震応答解析を実施する。また、1 / 2号開閉所建屋の基礎は杭基礎構造となっているため、建屋 - 杭 地盤の連成効果を考慮した地震応答解析を実施する。

(a) 建屋概要

1 / 2号開閉所建屋は、鉄骨造の建屋であり、本体建屋と増設部に分かれている。

本体建屋は、引留鉄構を含まない地表面からの高さは約 18m であり、建屋の平面形状は、通り芯間隔で 75.5m (EW 方向) × 38.0m (NS 方向) の長方形で東西方向に長い。西側に鉄筋コンクリート造の遮風壁があり、建屋の基礎形式は杭基礎となっている。

増設部は、本体建屋の南側に位置し地表面からの高さは約 13m であり、建屋の平面形状は、通り芯間隔で 31.7m (EW 方向) × 18.2m (NS 方向) の長方形で東西方向に長い。また、本体建屋とは構造的に分離している。建屋の基礎形式は杭基礎となっている。

図 3 に 1 / 2号開閉所の平面図、図 4 に 1 / 2号開閉所本体建屋の断面図、図 5 に増設部の断面図を示す。

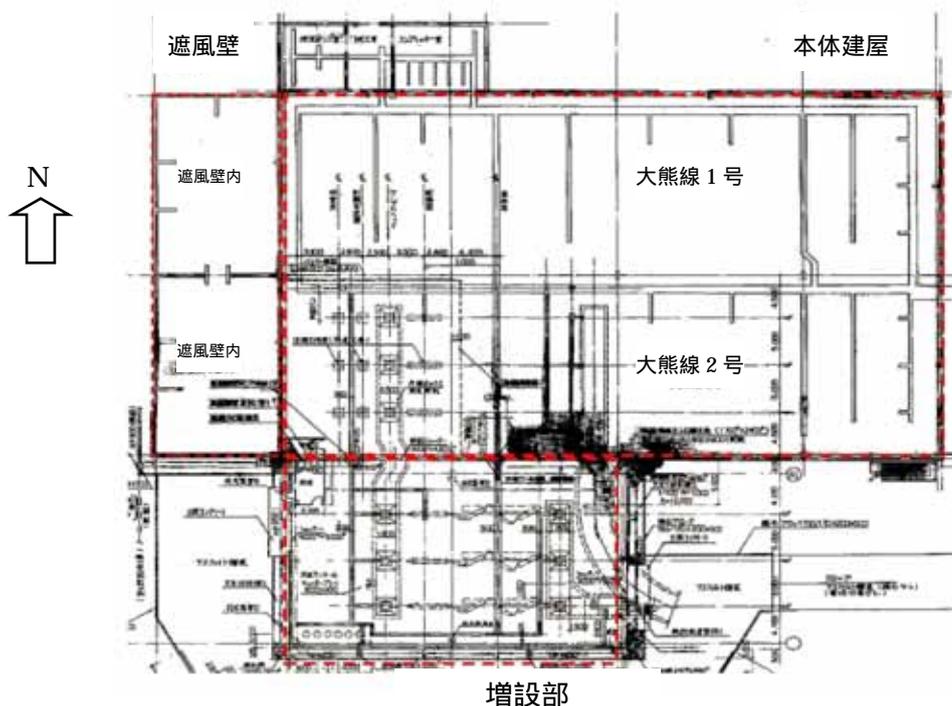
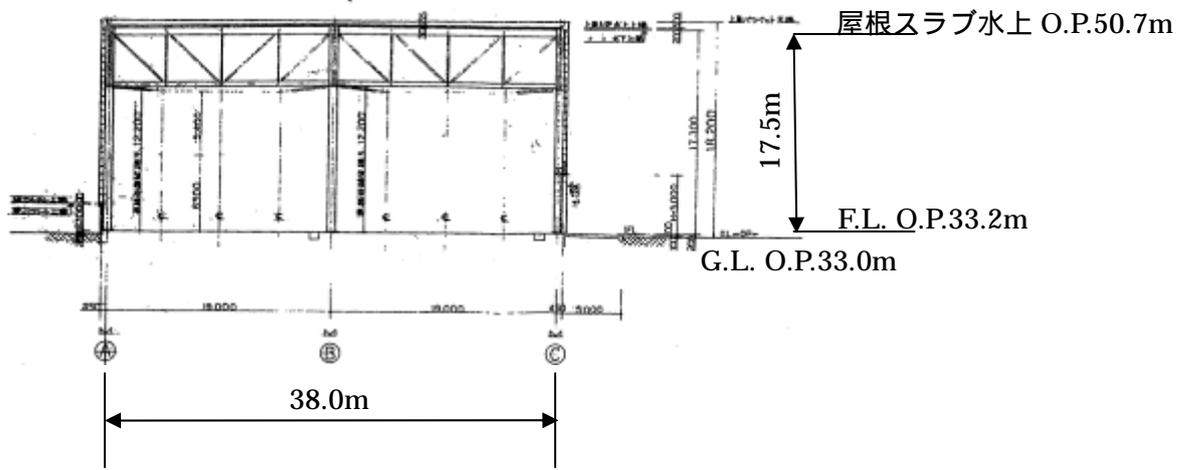
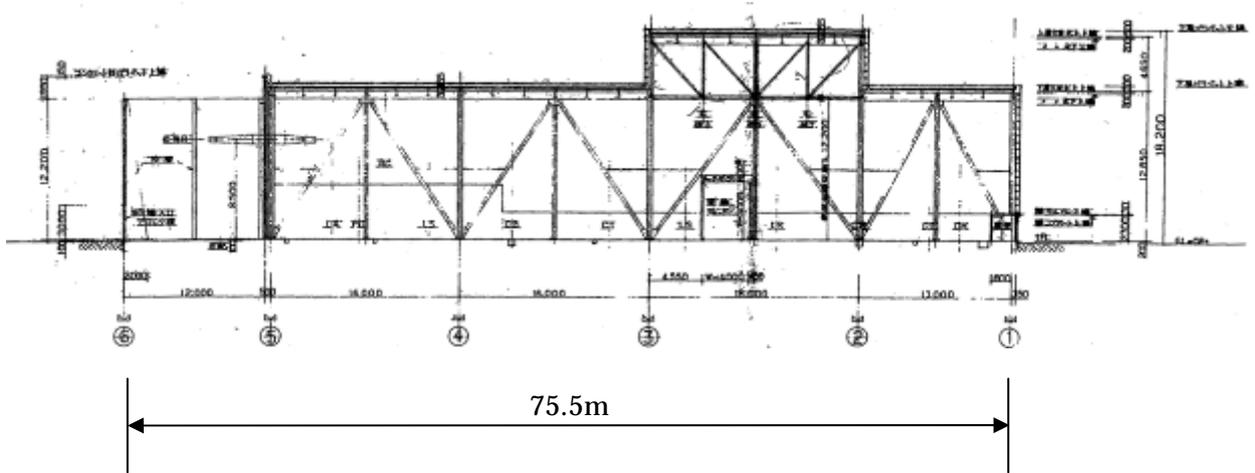


図 3 1 / 2号開閉所平面図

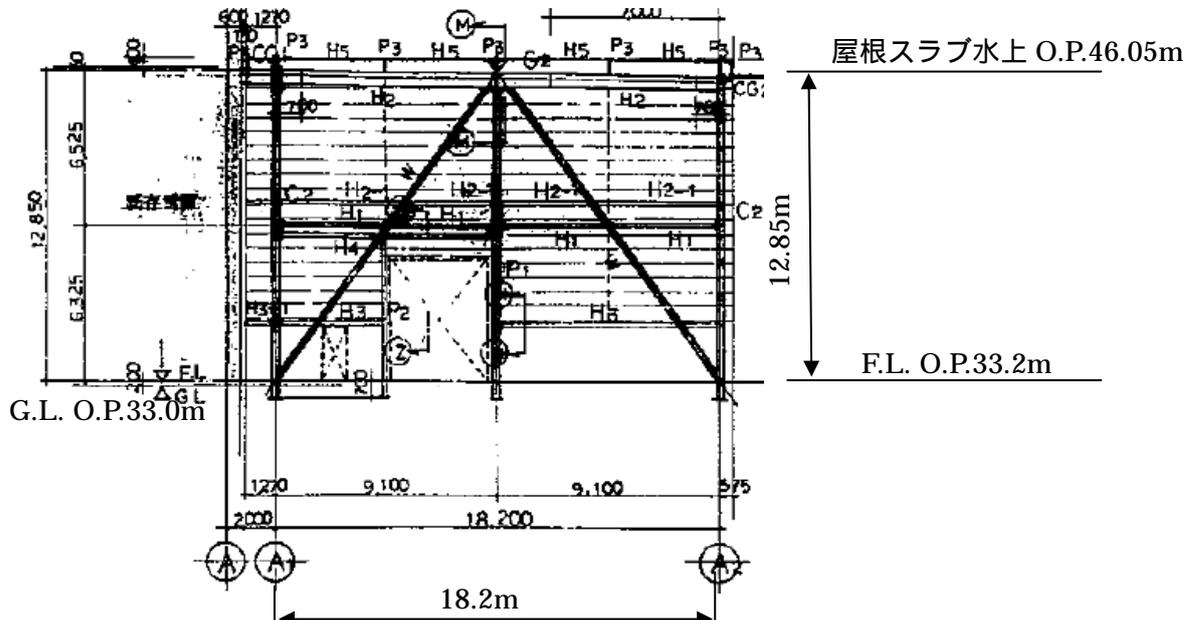


(a) N S 方向断面図

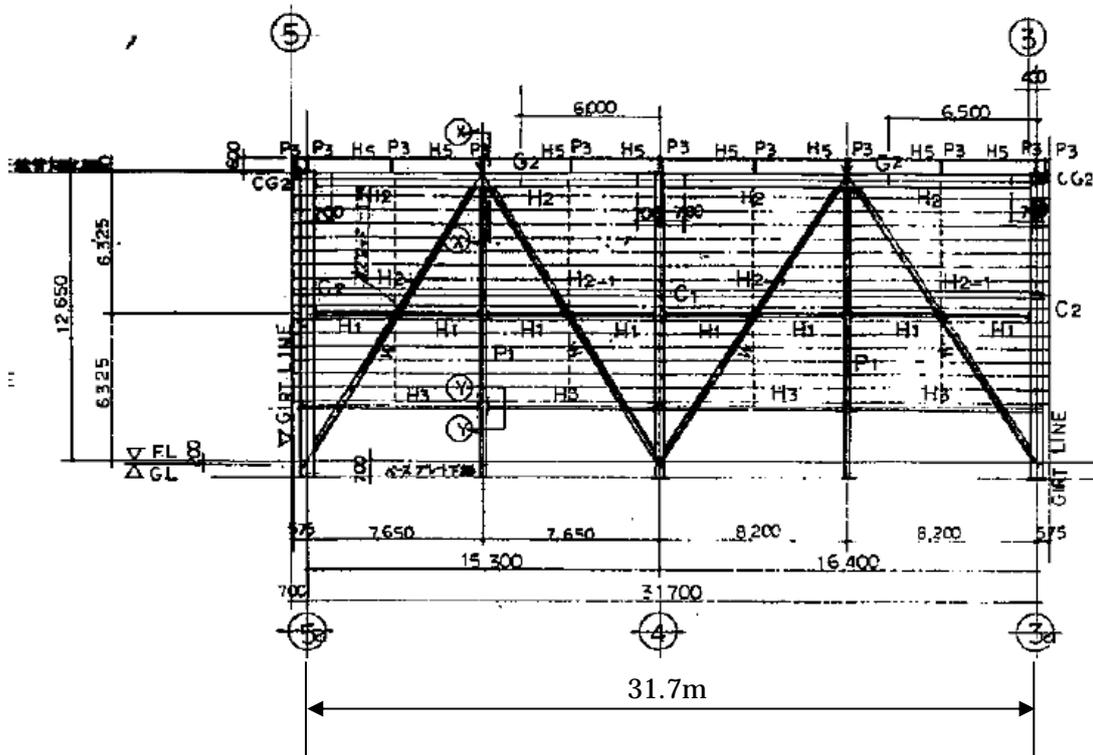


(b) E W 方向断面図

図4 1 / 2 号開閉所本体建屋断面図



(a) N S 方向断面図



(b) E W 方向断面図

図5 1 / 2 号開閉所増設部断面図

(b) 建屋の地震応答解析モデル

1 / 2号開閉所は本体建屋と増設部に分かれているため、本体建屋と増設部のそれぞれに対して地震応答解析モデルを設定する。

本体建屋の地震応答解析モデル

本体建屋の地震応答解析モデルは、鉄骨造の1 / 2号開閉所本体建屋と鉄筋コンクリート造の遮風壁を対象とする。

鉄骨造の本体建屋は、柱・梁を軸剛性、曲げ剛性、せん断剛性を持つビーム要素でモデル化し、ブレース・間柱を軸剛性のみを持つロッド要素でモデル化する。屋根・外壁・パラペット等は、集中質量として節点に与える。

鉄筋コンクリート造の遮風壁は、シェル要素でモデル化し、本体建屋と節点を共有させて、一体として挙動するものとする。

地盤ばねは、杭と地盤の相互作用を考慮した薄層要素法に基づき算定する。

入力地震動は、地震観測室（南地点）のGS1地点（O.P.32.9m）で観測されたT T O地震本震の記録3成分（NS方向、EW方向、UD方向）の同時入力とする。

図6に1 / 2号開閉所本体建屋の地震応答解析モデルを示す。

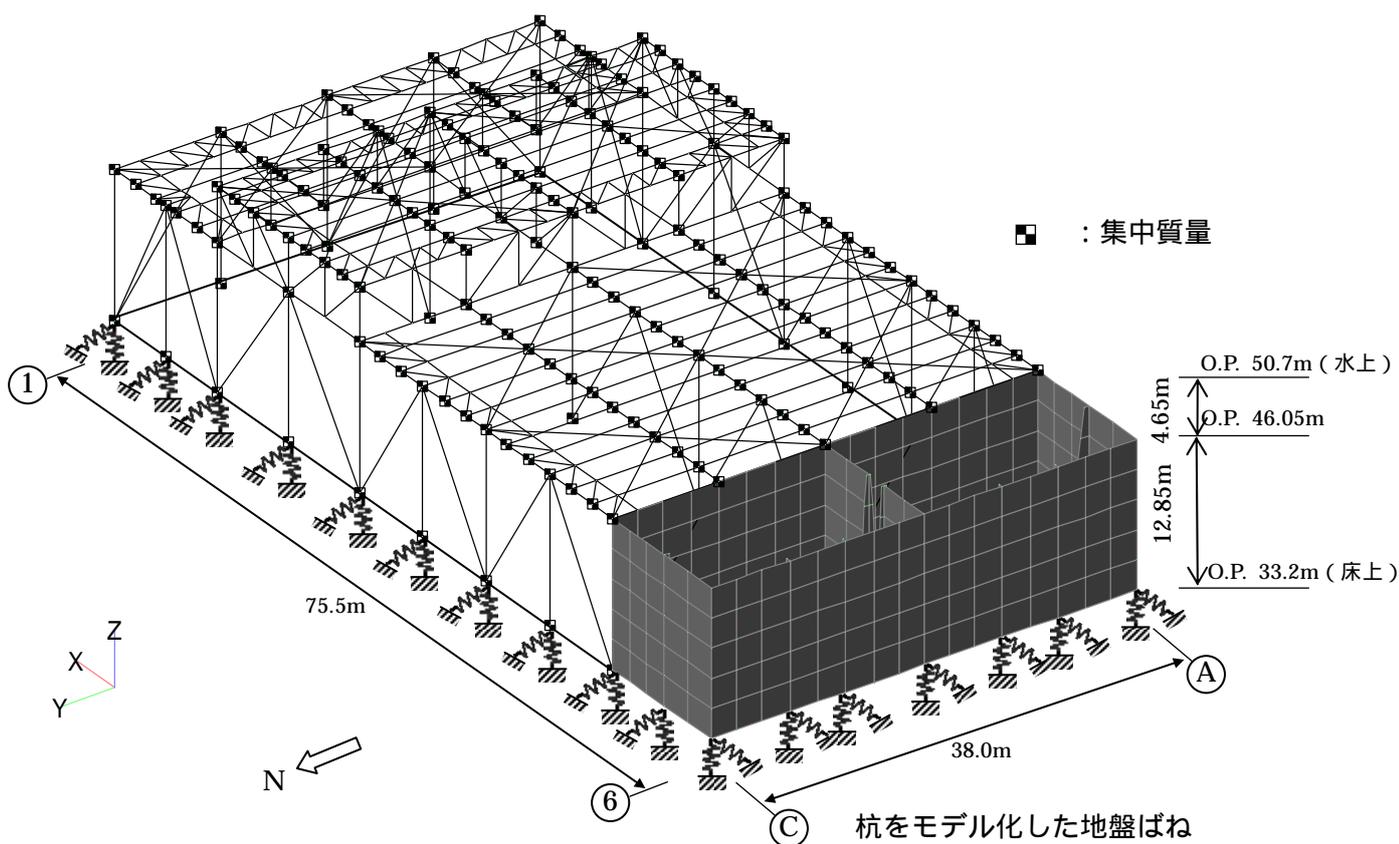


図6 1 / 2号開閉所本体建屋の地震応答解析モデル

増設部の地震応答解析モデル

増設部は、柱・梁を軸剛性、曲げ剛性、せん断剛性を持つビーム要素でモデル化し、ブレース・間柱を軸剛性のみを持つロッド要素でモデル化する。屋根・外壁・パラペット等は、集中質量として節点に与える。

地盤ばねは、杭と地盤の相互作用を考慮した薄層要素法に基づき算定する。

入力地震動は、地震観測室（南地点）のGS1地点（O.P.32.9m）で観測されたT T O地震本震の記録3成分（NS方向、EW方向、UD方向）の同時入力とする。

図7に1 / 2号開閉所増設部の地震応答解析モデルを示す。

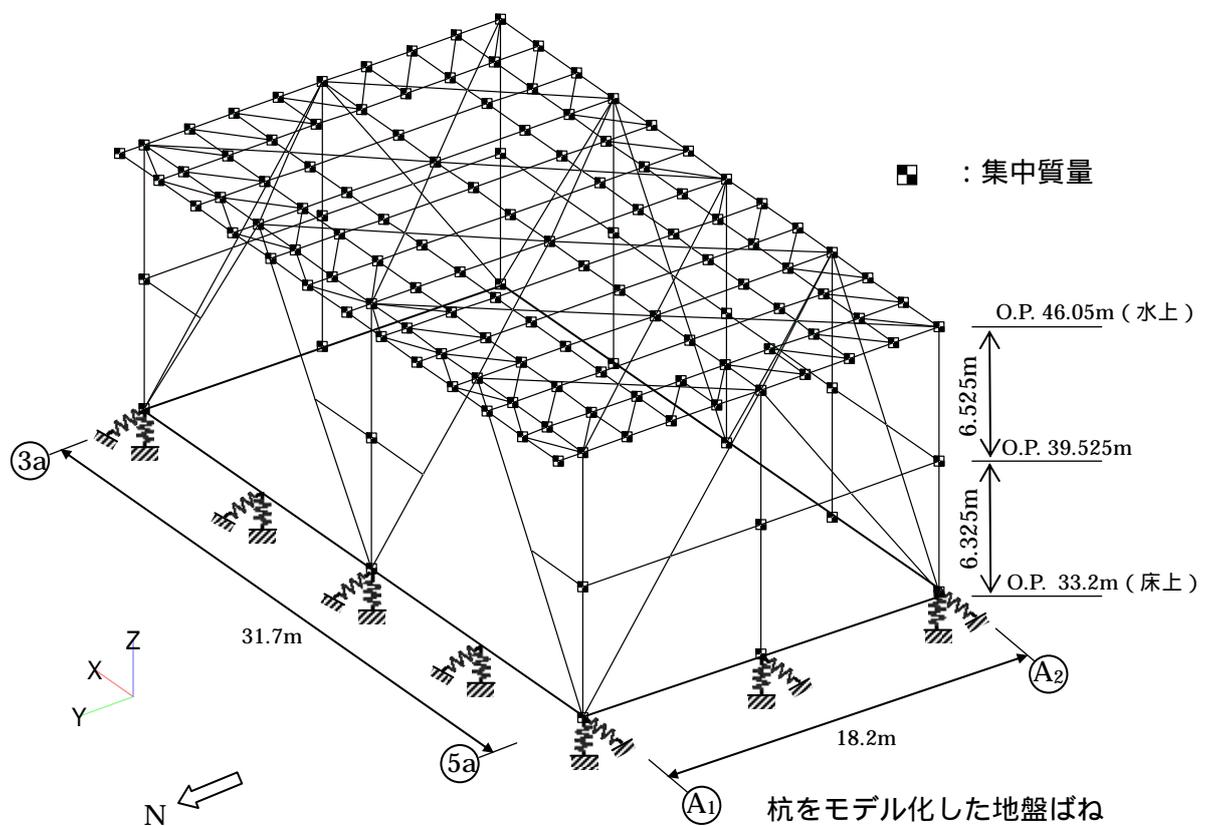
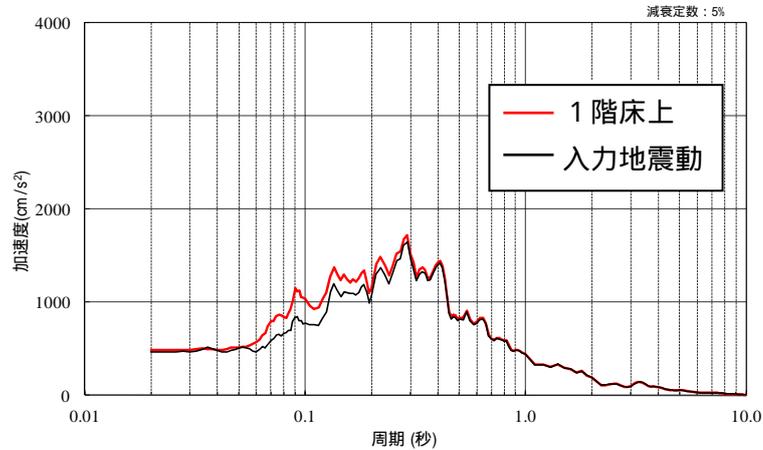


図7 1 / 2号開閉所増設部の地震応答解析モデル

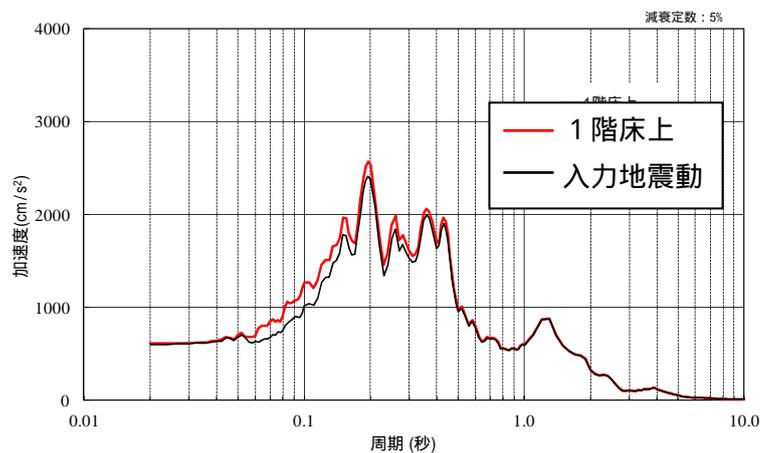
(c) 地震応答解析結果

本体建屋の地震応答解析結果

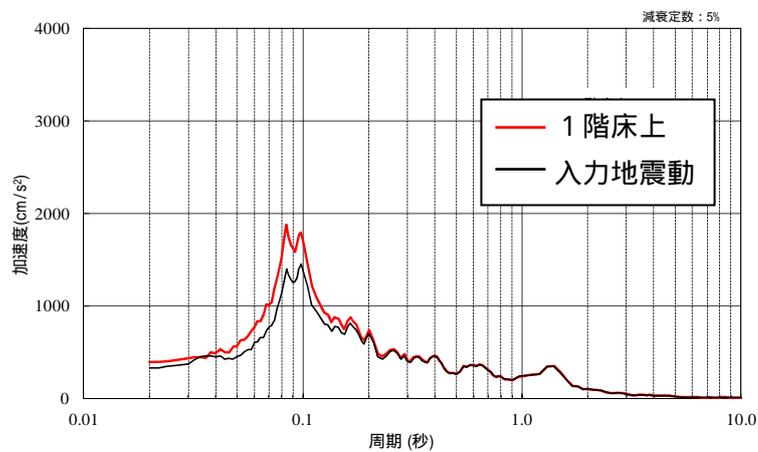
1 / 2号開閉所本体建屋の1階床上の加速度応答スペクトルおよび入力地震動の加速度応答スペクトルを図8に示す。



(a)NS 方向



(b)EW 方向



(c)UD 方向

図8 本体建屋1階床上の加速度応答スペクトルと入力地震動の加速度応答スペクトル

増設部の地震応答解析結果

1 / 2号開閉所増設部の1階床上の加速度応答スペクトルおよび入力地震動の加速度応答スペクトルを図9に示す。

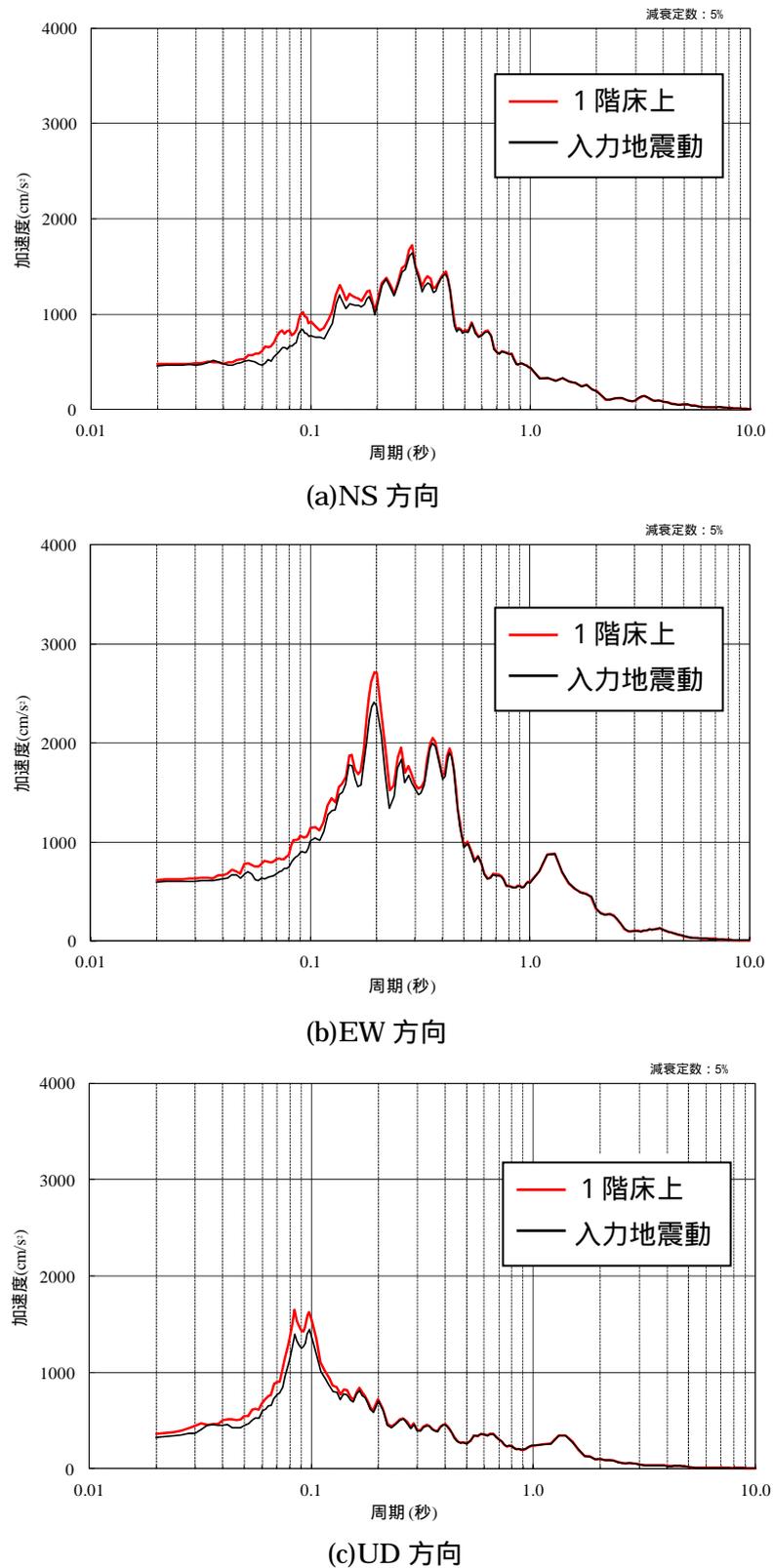


図9 増設部1階床上の加速度応答スペクトルと入力地震動の加速度応答スペクトル

(2) 電気設備解析モデルの作成の検討

機器の力学的性質を忠実に表現するため、複数の要素からなる「多質点梁モデル」を作成した。

[作成手順]

機器の構造にあわせて複数の要素に分割

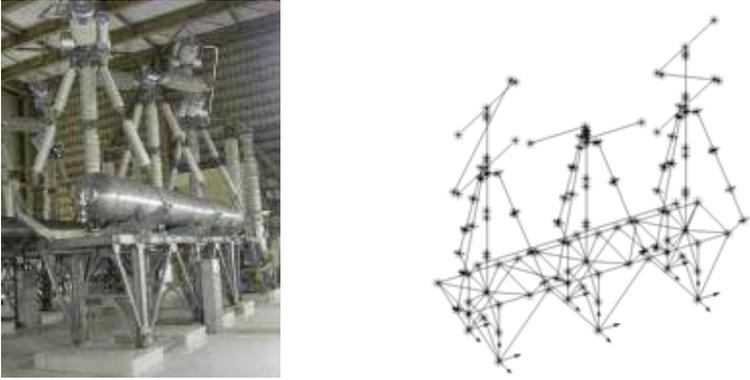
各要素について、位置(座標)、質量、断面積、材料特性(ヤング率など)などを定義

構造物間の接続箇所の剛性を剛結合、ばね接続などで模擬

部材固有の内部損失や、接続部の摩擦損失などを減衰定数で模擬

上記の手順により、空気遮断器、断路器の解析モデル(表1参照)を作成した。

表1 電気設備の解析モデル

機 器	解析モデル ¹
空気遮断器	
断路器	

1 : 解析モデルについては、JEAG5003-2010に記載されている方法で作成

(3) 耐震解析および損傷原因の評価

a. 解析方法

算定した 1/2 号開閉所建屋の床面地震動を、作成した解析モデルに入力して、機器の各部における発生応力・安全率^{*1}を解析するとともに、設計基準^{*2}と比較評価することなどで損傷原因を検討した。

*1：安全率 = 材料の許容応力 / 実地震動による発生応力

*2：設計基準（JEAG-5003「変電所等における電気設備の耐震設計指針」）

・ 碍子形機器：0.3G 共振正弦 3 波（架台下端突印）

地震動に対する機器の応答解析手法については、「時刻歴モデル応答解析」とする（地震波形に対する機器の振動モード（複数あり）の応答波形を求め、各応答波形を加算して機器全体の時刻歴応答を算出する）。

b. 解析結果および損傷原因

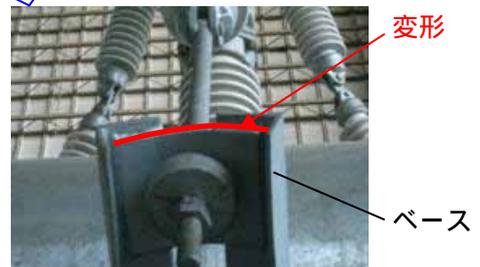
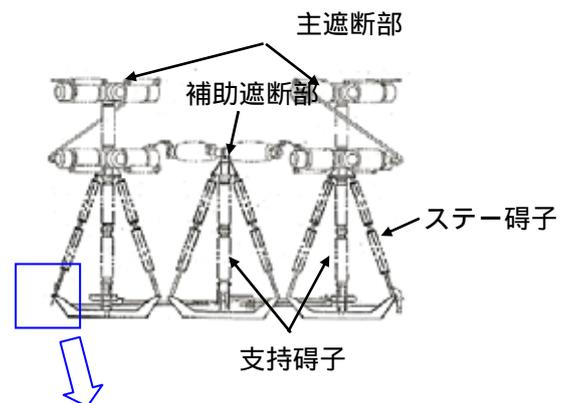
(a) 空気遮断器

被害状況

電圧	機器名	被害様相
275kV	大熊線 1・2 L STr 回線遮断器	碍子破損



大熊線 1 L STr 回線遮断器 (O-81) 遮断部碍子全損

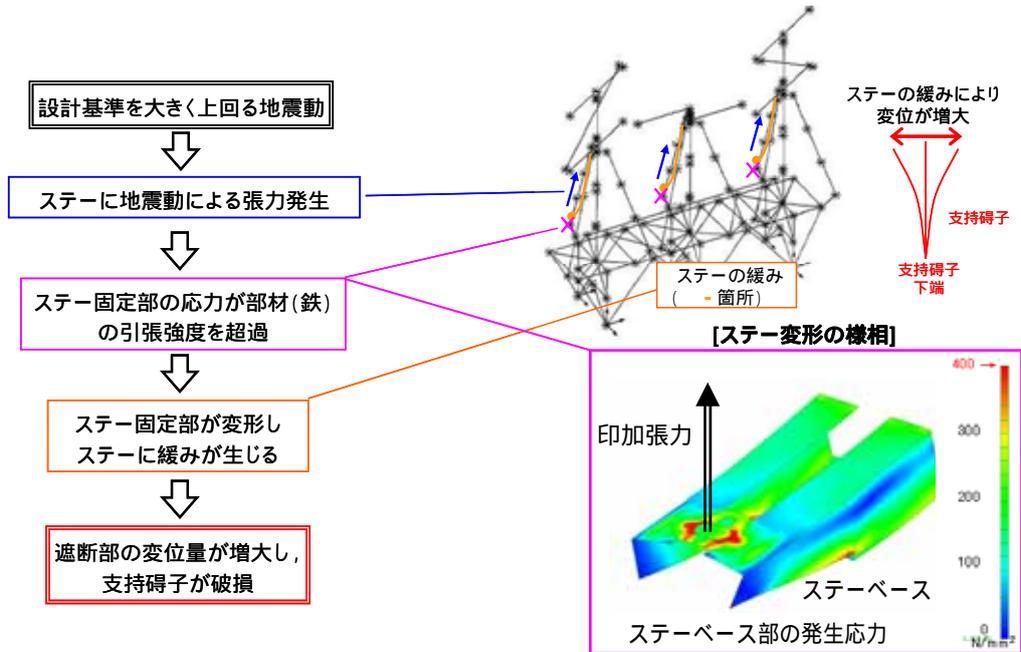


遮断部の耐震強化のため設置したステータを支持するベース部に変形が発生、ステータの緩みを観測

解析結果および損傷原因

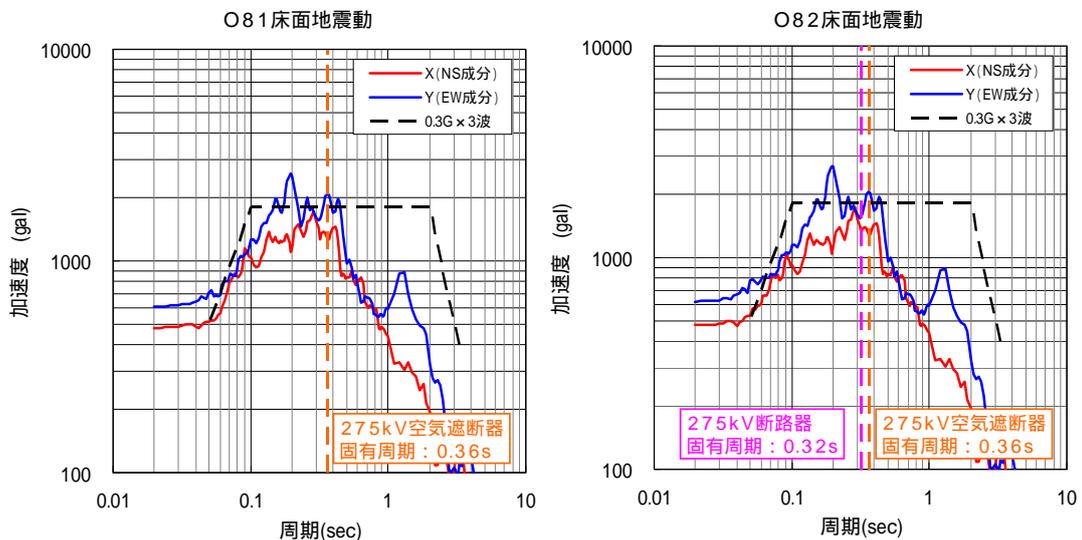
地震時にステアーを支持するベース部に発生する応力を解析したところ、部材（鉄）の引張強度（ $400\text{N}/\text{mm}^2$ ）を超える結果となり、地震によりステアーが緩むことが確認された。このため、空気遮断器の解析モデルにステアーの緩みを模擬して解析した結果、安全率が1を下回ることが確認された。

このことから、遮断器が損傷した原因は、地震によりステアーが緩むことにより遮断部の変位量が増大し、碍子破損に至ったものと考えられる。



機器名	被害部位	安全率		
		実地震動		設計基準
		正規状態	ステアー緩み	
大熊線 1LST r 回線(081)	主遮断部	1.1	0.80	1.2
大熊線 2LST r 回線(082)	主遮断部	1.1	0.80	1.2

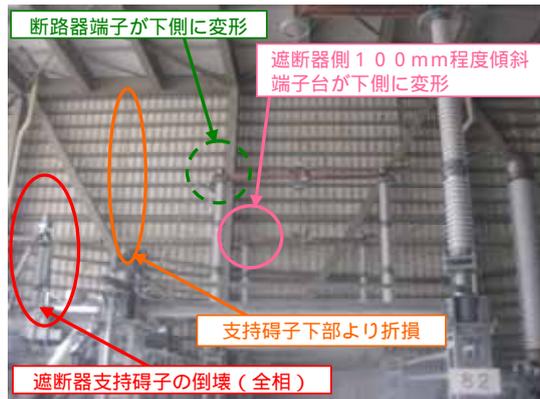
- 発生応力（ステアー緩み考慮）： $62.3\text{N}/\text{mm}^2$ （081）、 $62.5\text{N}/\text{mm}^2$ （082）
- 発生応力（ステアー正規状態）： $43.1\text{N}/\text{mm}^2$ （081）、 $44.6\text{N}/\text{mm}^2$ （082）
- 許容応力： $50\text{N}/\text{mm}^2$ （普通碍子 メーカー保証値）



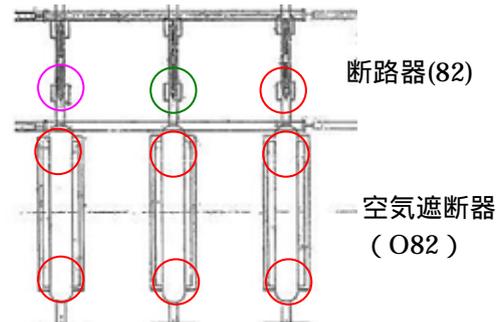
(b) 断路器
被害状況

電圧	機器名	被害様相
275kV	大熊線 2L ST r 回線断路器	碍子破損

倒壊した遮断器に接続されている断路器の操作碍子において、碍子・端子部の損傷が発生している。



大熊線 2L ST r 回線断路器(82)
碍子破損



- : 碍子破損
- : 碍子傾斜
- : 端子変形

解析結果および損傷原因

実地震動に対する安全率は3以上と高い。

接続される空気遮断器が倒壊する際に、リードを介して加わる応力を評価した結果0.56となり、安全率1を下回る。

機器名	被害部位	安全率		
		実地震動	遮断器倒壊による荷重	設計基準
大熊線 2L ST r 回線(82)	操作碍子	3.1	0.56	2.7

倒壊による発生応力：96.0 N/mm²、許容応力：53.9 N/mm² (普通碍子(2~3段積)メーカー力保証値)



(4) まとめ

被害設備の耐震解析結果（概要）を表2に示す。

表2 耐震解析結果（概要）

対象機器	安全率 ^{*1}	
	実地震動	設計基準
275kV 空気遮断器	0.80 ^{*2}	1.2
275kV 断路器	0.56 ^{*3}	2.7

* 1 実地震動に対し最も厳しくなる部位の安全率を記載

* 2 実地振動によるステアの緩みを考慮

* 3 隣接する遮断器の倒壊による影響（リードを介した荷重）を考慮

耐震解析結果より、推定される損傷原因は以下のとおりである。

- ・ 地表面地震動が非常に大きく、設計基準（JEAG-5003-2010）を超過していることが主要因で破損に至った。
- ・ 275 kV 空気遮断器については、耐震強化のため設置したステアが緩むことにより、遮断部の変位が増大して碍子破損に至った。
- ・ 275 kV 断路器については、接続される空気遮断器倒壊時の荷重がリードを介して加わるにより碍子破損に至った（空気遮断器倒壊に伴う二次的被害）。

）新福島変電所の主要変圧器・遮断器・断路器・計器用変圧器・変流器の損傷原因

(1) 新福島(変)地点における地震動推定

新福島(変)では、本震時に地震記録装置が途中で停止し、最大加速度と一部の波形データしか残っていないことから、周辺地点で観測された地震記録から基盤地震動¹を推定した。

- 1 基盤地震動：地震動設定の基礎となる良好な地盤(工学的基盤：せん断波速度が300~700(m/s)以上)における地震動。

推定方法

新福島(変)と近傍地点の過去の地震記録を活用することで、本震時の新福島(変)の基盤地震動を推定することとした。近傍の観測地点としては、地盤条件の類似性などから「電中研浪江」および「電中研木戸川」地点を選定した。

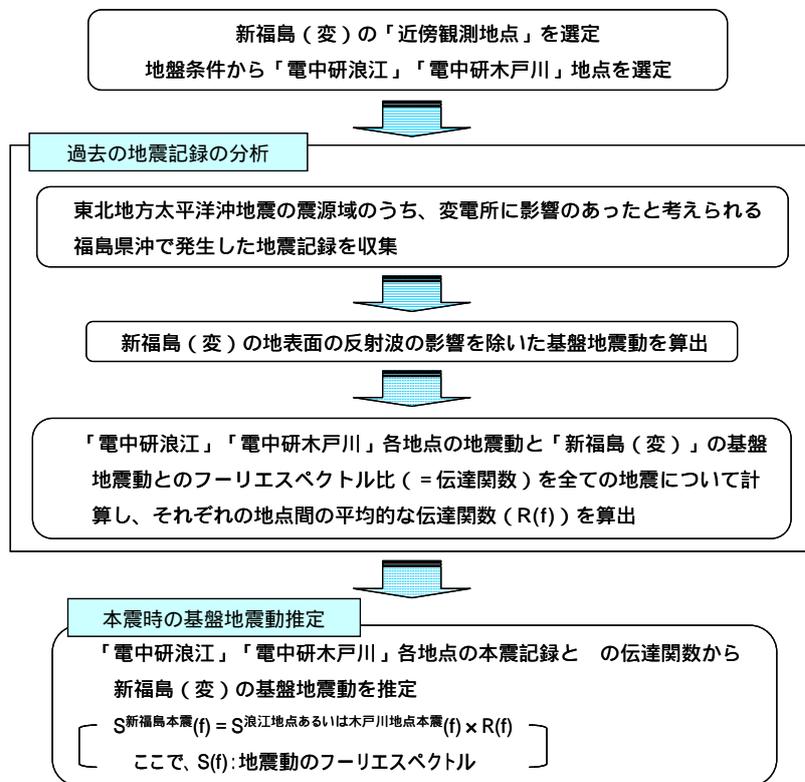


図10 新福島(変)の地震動推定の流れ

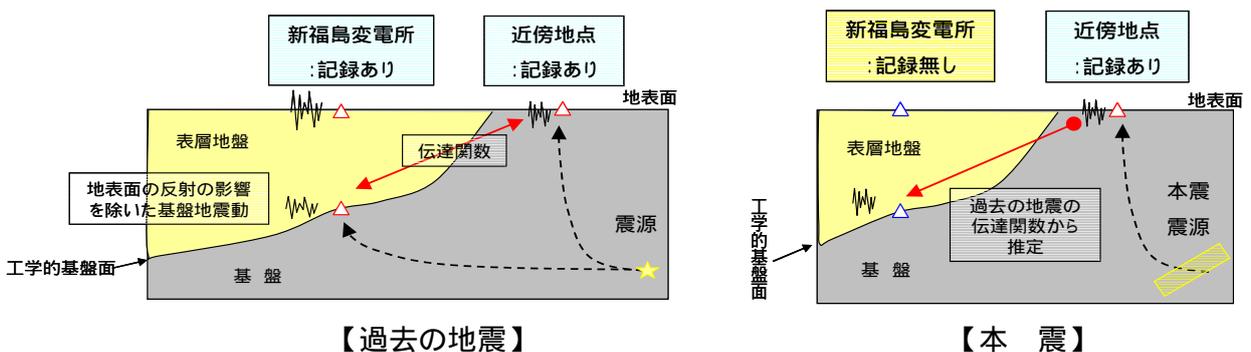


図11 過去の地震動を活用した本震地震動の推定

推定に用いた地震

過去に福島県沖で発生したマグニチュード4以上の地震のうち、新福島（変）と共通の記録がある地震を推定に使用した。

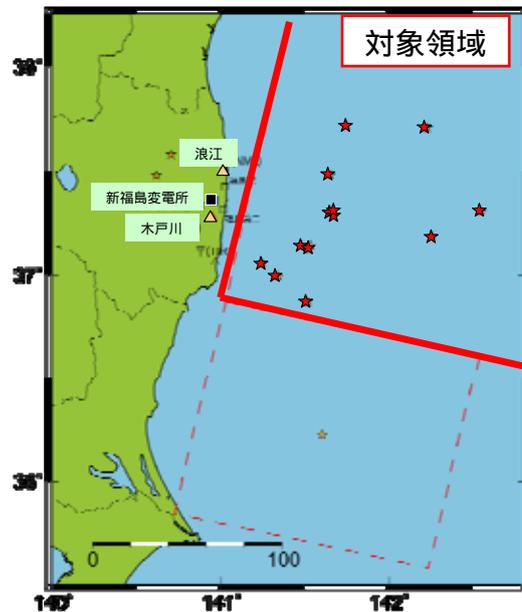


図 12 推定に使用した地震の対象領域と震源位置

「電中研浪江」、「電中研木戸川」各地点と新福島（変）間の平均的な伝達関数の算出

「電中研浪江」、「電中研木戸川」の各地点の地震動と新福島（変）の基盤地震動とのフーリエスペクトル比（＝伝達関数）を対象となる全ての地震について計算し、それぞれの地点間の平均的な伝達関数（ $R(f)$ ）を算出した。

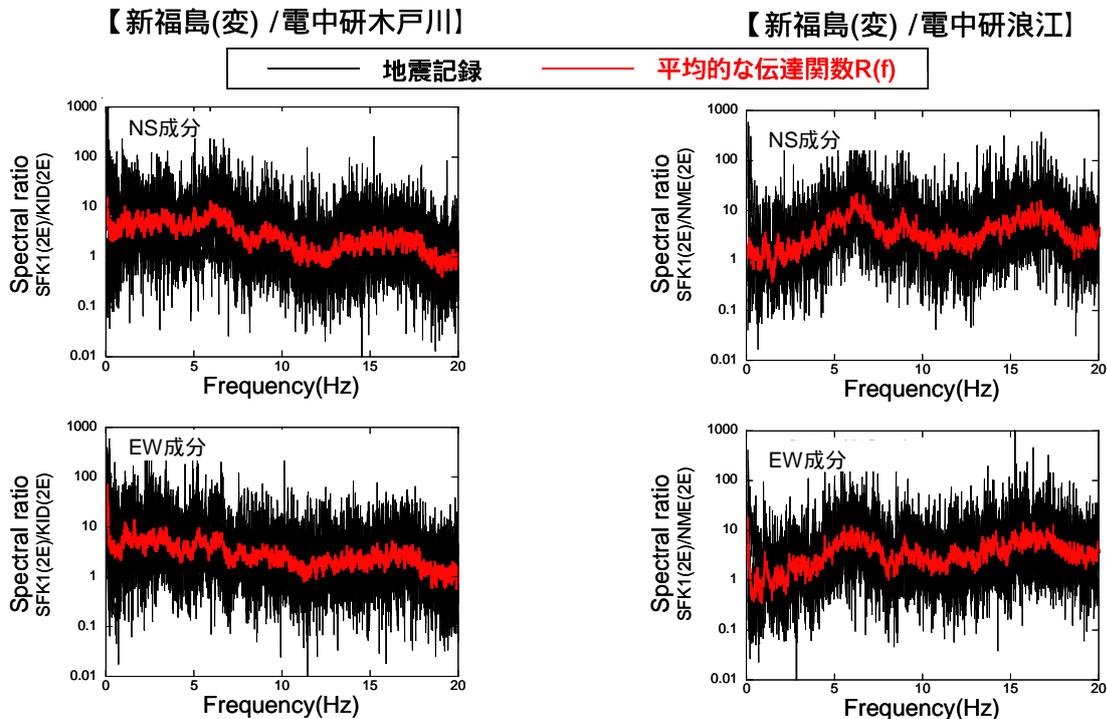


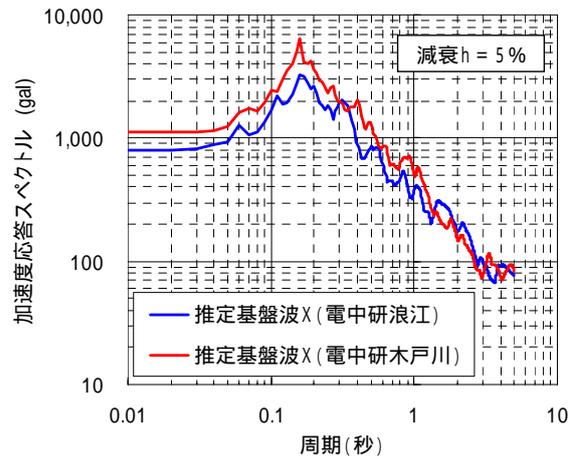
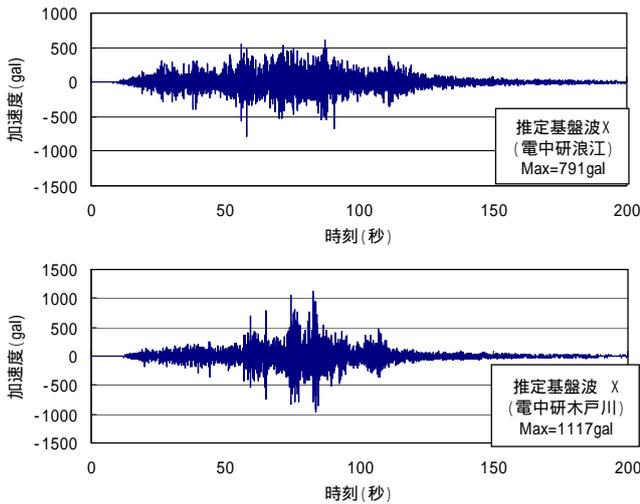
図 13 過去の地震における「電中研浪江」、「電中研木戸川」地点と新福島（変）の間の伝達関数

基盤地震動の推定結果

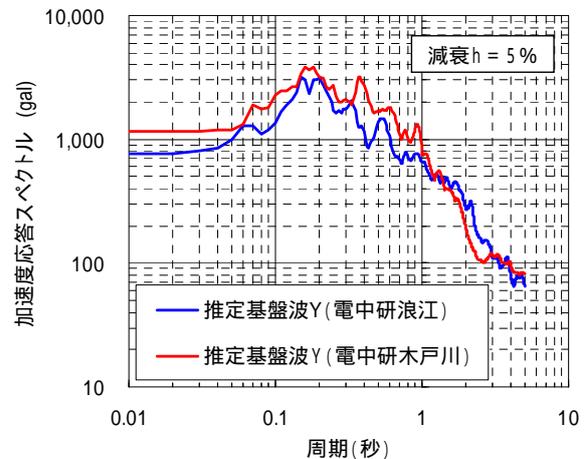
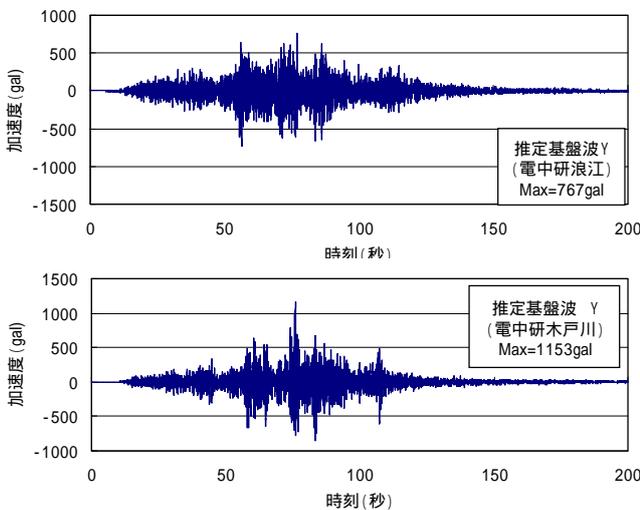
本震時の「電中研浪江」、「電中研木戸川」の観測記録と算出した伝達関数 (R(f)) から新福島(変)の基盤地震動を推定し、地震観測位置の地表面応答を計算した。その結果、「電中研浪江」からの推定地震動の方が最大加速度観測記録値に近く、応答スペクトルが小さいことから、「電中研浪江」からの推定地震動を基本に検討することとした。

耐震解析において、小さな応答スペクトルでも機器は損傷する評価となることから、機器の強度評価としては厳しめの検討条件となる。

【X方向】



【Y方向】



【X、Y座標の方向】

【最大加速度の比較】

	基盤		地表	
	X (gal)	Y (gal)	X (gal)	Y (gal)
推定波 (電中研浪江)	791	767	833	773
推定波 (電中研木戸川)	1117	1153	1083	1101
観測記録	-	-	727	791

図 14 新福島(変)の基盤地震動の推定結果

地表面地震動の推定

耐震解析の実施にあたっては、推定した工学的基盤面における基盤地震動より、被害を受けた機器配置ごとに異なる表層地盤の特性に応じた地表面地震動を算定した。

その結果、地表面加速度は 700 ~ 1000gal 程度（基盤波の 1 ~ 1.4 倍程度）であった。

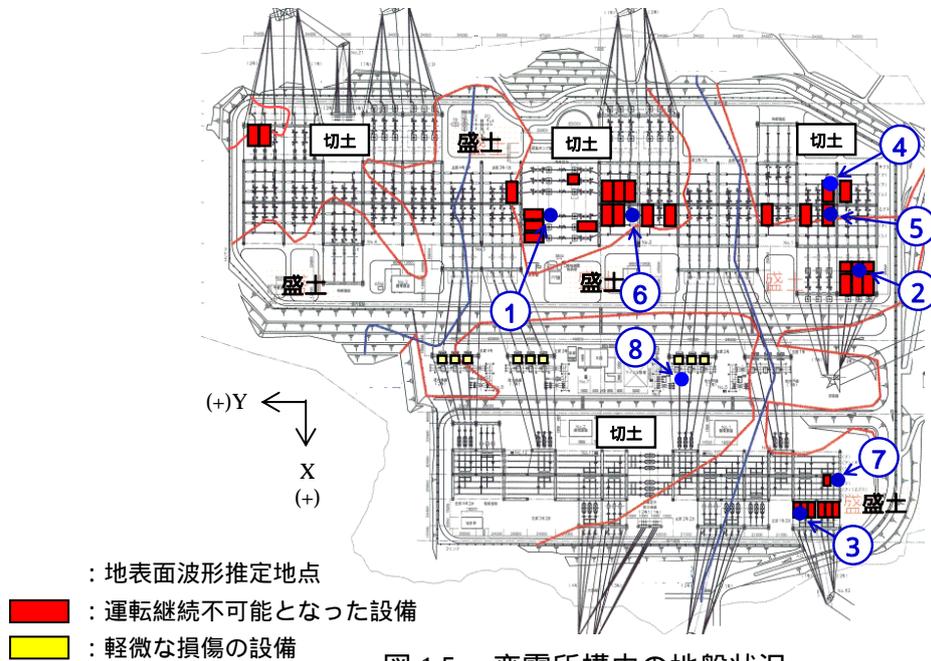


図 15 変電所構内の地盤状況

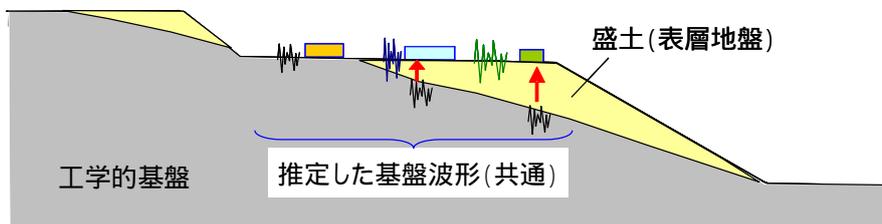


図 16 機器評価のための地震動算定イメージ

表 3 地表面地震動の解析結果

波形導出地点	解析結果 地表面加速度 (gal)	
	X方向	Y方向
基盤波 (浪江波ベース)	791	767
切土	791	767
盛土	824	890
盛土	823	1069
切土	949	1065
切土	679	765
切土	770	937
盛土	727	958
切土	833	773

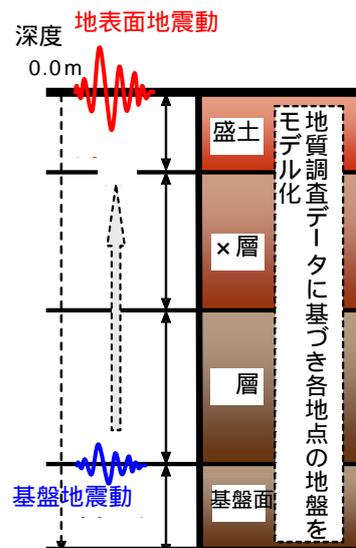


図 17 一次元応答解析概念

* 各地点の地表面地震動の波形については資料 - 1 参照。

(2) 電気設備解析モデルの作成

機器の力学的性質を忠実に表現するため、複数の要素からなる「多質点梁モデル」を作成した。

[作成手順]

機器の構造にあわせて複数の要素に分割

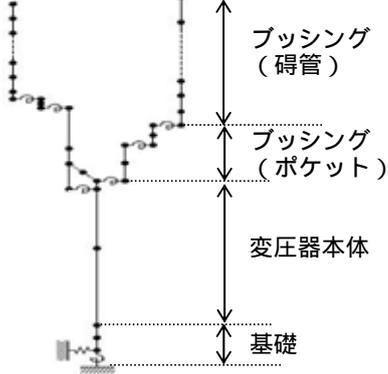
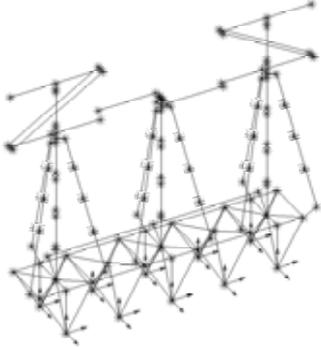
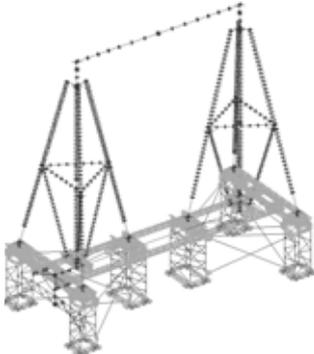
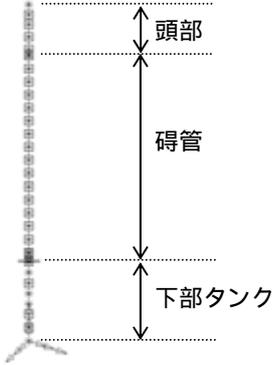
各要素について、位置（座標）、質量、断面積、材料特性（ヤング率など）などを定義

構造物間の接続箇所の剛性を剛結合、ばね接続などで模擬

部材固有の内部損失や、接続部の摩擦損失などを減衰定数で模擬

上記の手順により、変圧器、空気遮断器、断路器、変流器の解析モデル（表4参照）を作成した。

表4 電気設備の解析モデル

機 器	解析モデル ¹	
変圧器		
空気遮断器		
断路器		
変流器		

1 解析モデルについては、JEAG5003-2010に記載されている方法で作成

(3) 耐震解析および損傷原因の評価

解析方法

算定した地表面地震動を作成した解析モデルに入力して、機器の各部における発生応力・安全率^{*1}を解析するとともに、設計基準^{*2}と比較評価することなどで損傷原因を検討した。

- *1：安全率 = 材料の許容応力 / 実地震動による発生応力
- *2：設計基準（JEAG-5003「変電所等における電気設備の耐震設計指針」）
 - ・変圧器ブッシング：0.5G 共振正弦3波（ブッシングポケット下端突印）
 - ・碍子形機器：0.3G 共振正弦3波（架台下端突印）

地震動に対する機器の応答解析手法としては、「時刻歴モーダル応答解析」を用いた（地震波形に対する機器の振動モード（複数あり）の応答波形を求め、各応答波形を加算して機器全体の時刻歴応答を算出）。各機器の耐震解析の具体的な実施手順は以下のとおり。

[変圧器]

機器（詳細モデル）・基礎・地盤の一体モデルへ地表面地震動を入力し、各部の発生応力を解析する。

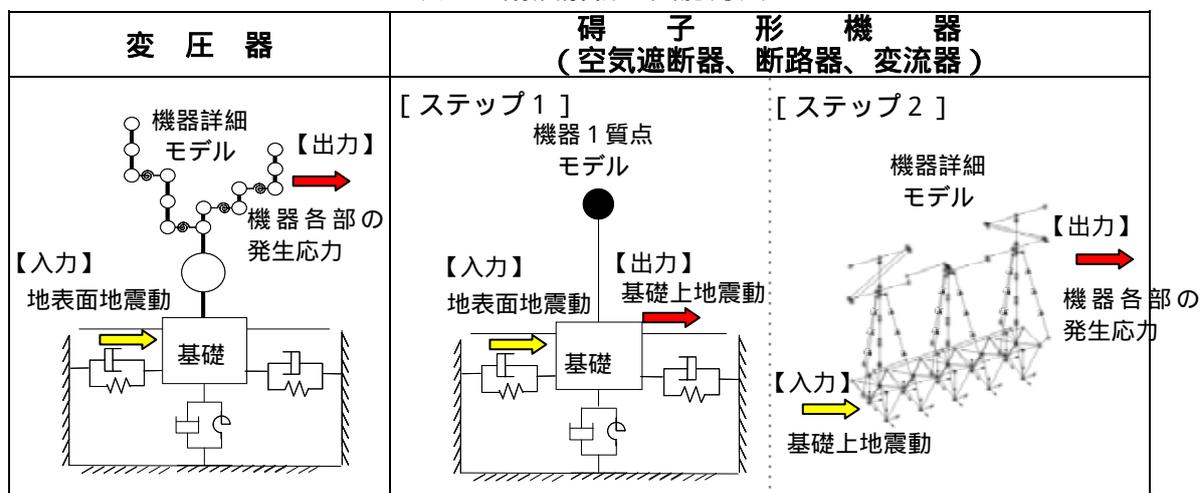
- * 変圧器本体の重量が基礎の重量と同程度のため、両者の合成重心位置が高くなり、ロッキング振動（地震の水平振動へ、回転振動が重畳した連成振動）が起こりやすいため、変圧器・基礎・地盤の相互作用を模擬できる一体モデルにより、機器各部の発生応力を直接解析する。

[碍子形機器]

機器（1質点モデル）・基礎・地盤の一体モデルへ地表面地震動を入力し、基礎上の地震動を解析する。その後、機器（詳細モデル）へ算定した基礎上地震動を入力し、各部の発生応力を解析する。

- * 碍子形機器の重量は基礎の重量の数分の1以下であり、ロッキング振動が発生しにくいこと、碍子形機器は多数の碍子を組み合わせた複雑な構造であることから、機器（1質点モデル）・基礎・地盤の一体モデルにより基礎上地震動を算出し、これを機器詳細モデル（基礎・地盤とは別の単独モデル）へ入力することで詳細解析を実施できる。

表5 耐震解析の実施方法



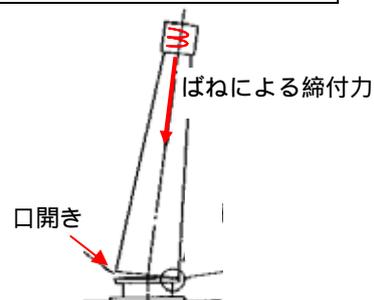
機器耐震解析結果および損傷原因

a. 変圧器

(a)被害状況

電圧	機器名	被害様相
500kV/275kV	主要変圧器 2・3・4号	漏油(ブッシング口開きによる)

口開きによる一時的な漏油
(センタークランプ方式)
碍管の損壊はなし



[センタークランプ方式]

センタークランプ方式：

頭部ばねにより中心導体を引張り、その反力で上部碍管、下部碍管の間のガスケットを締め付ける構造。フランジ方式(碍管根元をボルトで固定)よりも構造が簡素であり、275kV以下のブッシングに適用。一時的な口開きは許容し、ずれ止め金具等により碍管のずれ・コアの脱落を防止する設計を実施。

(b)解析結果および損傷原因

センタークランプ方式である二次ブッシングについては、口開きに対する安全率が1を下回る結果となった。これは、地表面加速度が大きいことに加え、地震動の卓越周期が機器の固有周期と近いことによるものと考えられる。ただし、ずれ止め金具が有効に機能し、碍管のずれ・コアの脱落は発生していない(継続運転可能)。

なお、一次ブッシングについては実地震動に対する安全率が1を上回り、解析結果通りブッシング破損は発生していない。

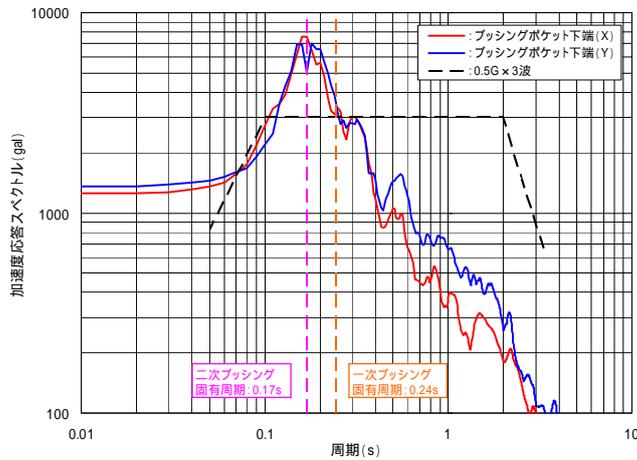
機器名	部 位	実地震動 の地点	損傷 有無	安全率	
				実地震動	設計基準
主変 2 号	一次ブッシング		-	1.27	2.1
	二次ブッシング		口開き	0.36	1.0
主変 3 号	一次ブッシング		-	1.24	2.1
	二次ブッシング		口開き	0.32	1.0
主変 4 号	一次ブッシング		-	1.24	2.1
	二次ブッシング		口開き	0.32	1.0

1 一次ブッシング

発生応力：18.7N/mm² (主変2号) 19.2N/mm² (主変3・4号)
許容応力：23.8N/mm² (500kV碍管 メーカー保証値(埋込金具形状考慮))

2 二次ブッシング口開き

発生モーメント：132×10⁶N・mm (主変2号) 148×10⁶N・mm (主変3・4号)
許容モーメント：48×10⁶N・mm (頭部ばねによる締付モーメントの設計値)



変圧器ブッシング
実地震動の加速度応答スペクトル

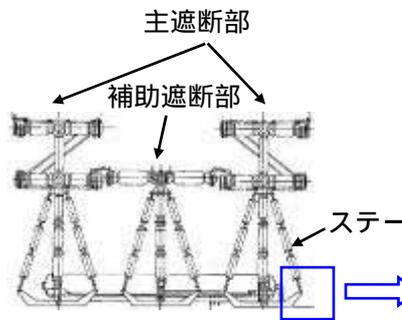
b. 空気遮断器

(a) 被害状況

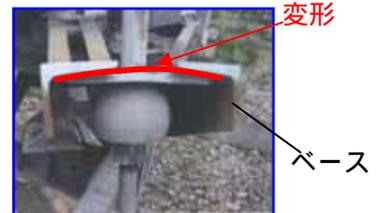
電圧	機器名	被害様相
275kV	いわき幹線 1号(041)・2号(042)	碍子破損



いわき幹線 1号遮断器
遮断部碍子全損



耐震強化のために設置したステーを支持するベース部に变形が発生、ステーの緩みを観測

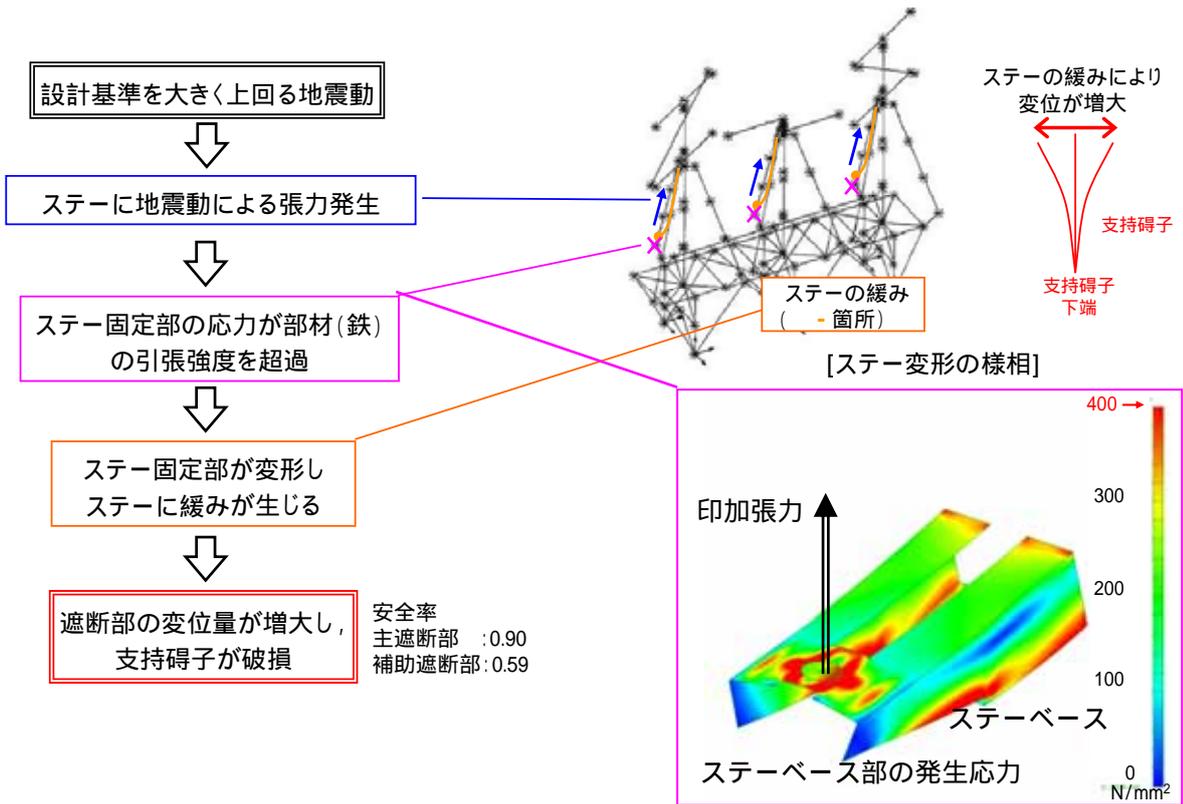


(b) 解析結果および損傷原因

地震時にステーを支持するベース部に発生する応力を解析したところ、部材（鉄）の引張強度（ $400\text{N}/\text{mm}^2$ ）を超える結果となり、地震によりステーが緩むことが確認された。このため、ステーの緩みを模擬して耐震解析を実施したところ、安全率が1を下回る結果となった。

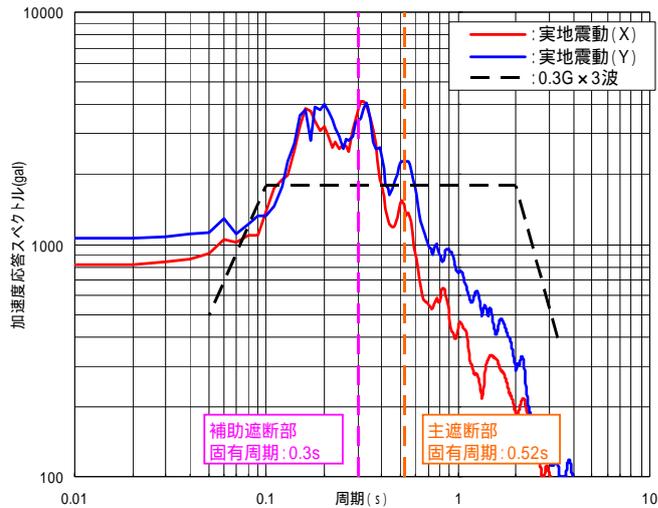
このことから、遮断器が損傷した原因は、ステーが緩むことにより遮断部の変位量が増大し、碍子破損に至ったものと考えられる

*なお、仮にステーが正規状態であっても、安全率は1を下回る結果となった。これは、地表面加速度が大きいこと、および（設計基準に対する安全率が比較的高い）補助遮断部の固有周期が地震動の卓越周期と近いことによるものと考えられる。



機器名	被害部位	実地震動 の地点	安全率		
			実地震動		設計基準
			ステー緩み	正規状態	
いわき幹線 1号・2号	主遮断部		0.90	0.94	1.2
	補助遮断部		0.59	0.73	1.7

- 発生応力 (ステー緩み考慮) : 主遮断部 55.0N/mm²、補助遮断部 83.7N/mm²
- 発生応力 (ステー正規状態) : 主遮断部 52.7N/mm²、補助遮断部 67.6N/mm²
- 許容応力 : 50N/mm² (普通碍子 メーカー保証値)



275kV 空気遮断器
実地震動の加速度応答スペクトル

c . 断路器

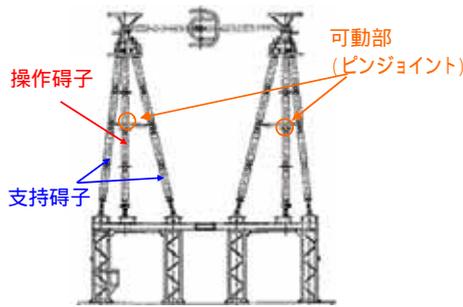
500kV 断路器

(a) 被害状況

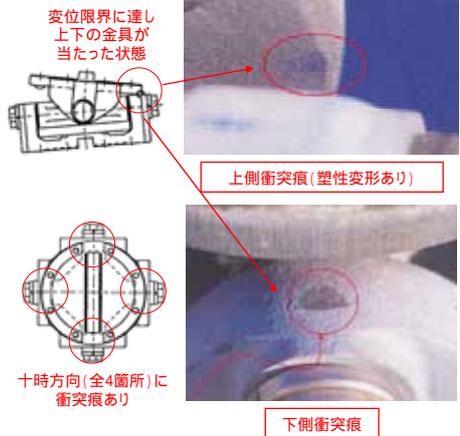
電圧	機器名	被害様相
500kV	福島山幹線 1号 (101・201)・2号 (202) 富岡線 2号 (6) 双葉線 1号 (107・207)・2号 (8・108) 主変 3号一次 (113) 500kV セクション乙 1 (R200)・乙 2 (S200) 1U ブスタイ (210)	碍子破損



500kV 福島山幹線 1号碍子破損



500kV 断路器外形図

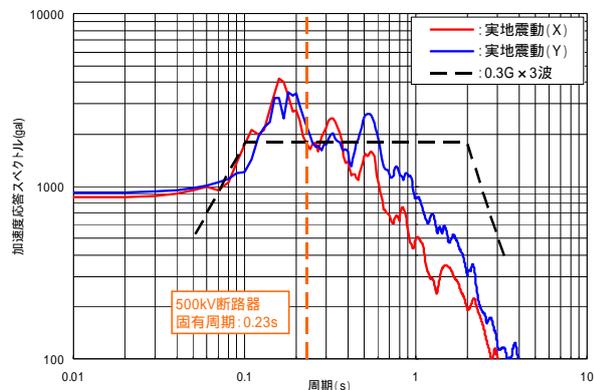
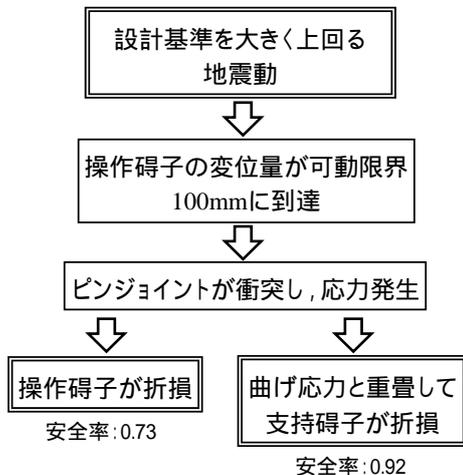


操作碍子中央の可動部 (ピンジョイント) 周辺で折損が多数発生

ピンジョイントを構成する金具に衝突痕有り

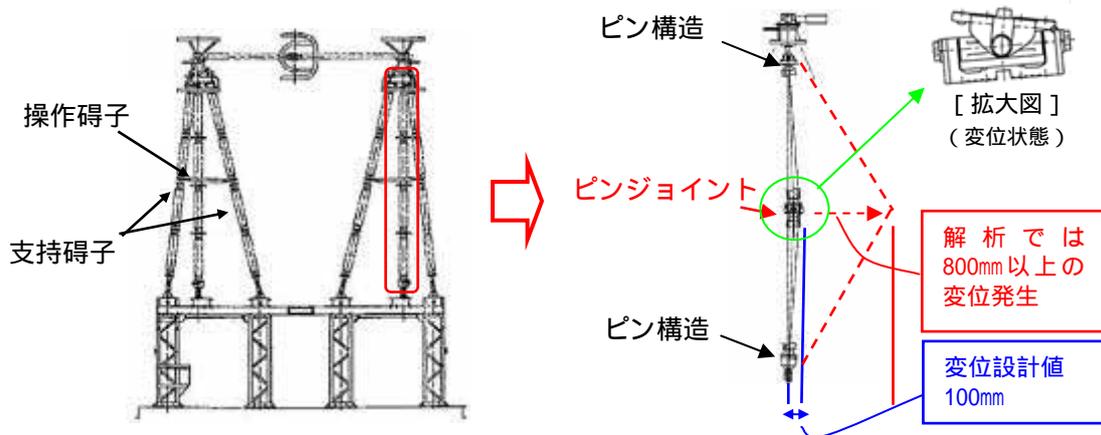
(b) 解析結果および損傷原因

操作碍子中央部の応力集中を抑制するために可動部 (ピンジョイント構造) を設けているが、地表面加速度が大きかったため、可動部の変位量が設計値を超過したことにより衝突が発生した。その結果、操作碍子および支持碍子に衝撃力が加わり、碍子破損に至ったものと考えられる。



500kV 断路器 (機器番号: 8)
実地震動の加速度応答スペクトル

発生応力: 操作碍子 100.3 N/mm²、支持碍子 53.3 N/mm²
許容応力: 操作碍子 73.5 N/mm² (高強度碍子 (4~5 段積) メーカー保証値)
支持碍子 49.0 N/mm² (普通碍子 (4~5 段積) メーカー保証値)
(機器番号: 8 の例)



機器名	被害部位	実地震動の地点	安全率	
			実地震動	設計基準*
101・201・202	操作碍子		0.79	10以上
8	操作碍子		0.73	10以上
	支持碍子		0.92	2.1
210	支持碍子		0.57	2.1
113	操作碍子		0.87	10以上
107・108	操作碍子		0.85	10以上
207	操作碍子		0.85	10以上
6・R200	支持碍子		0.82	2.2
S200	操作碍子		0.62	10以上
	支持碍子		0.82	2.2

* 設計基準に対する安全率：

操作碍子可動部（ピンジョイント）で衝突が発生しないときの碍子発生応力に対する値

275kV 断路器

(a) 被害状況

電圧	機器名	被害様相
275kV	いわき幹線 2 号 (242)	碍子破損



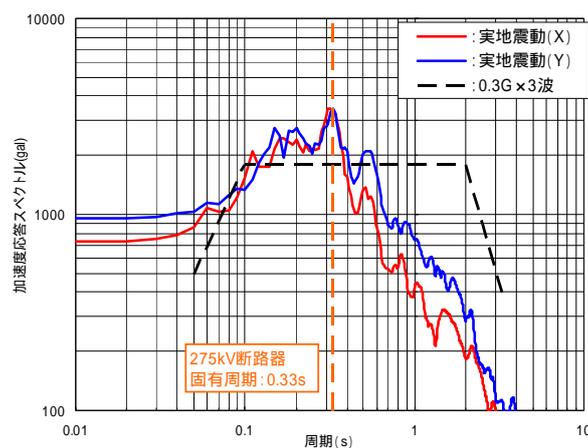
275kV いわき幹線 2 号碍子破損

(b) 解析結果および損傷原因

被害部位の安全率が 1 を下回る結果となった。これは、地表面加速度が大きいことに加え、機器の固有周期が地震動の卓越周期と近いことによるものと考えられる。

機器名	被害部位	実地震動 の地点	安全率	
			実地震動	設計基準
242	操作碍子		0.94	1.6

発生応力：86.4 N/mm²、許容応力：80.9 N/mm²（高強度碍子（2～3 段積）メーカ保証値）



275kV 断路器
実地震動の加速度応答スペクトル

d. 変流器

(a) 被害状況

電圧	機器名	被害様相
500kV	双葉線 2 号 500kV セクション (甲 1)	碍子破損



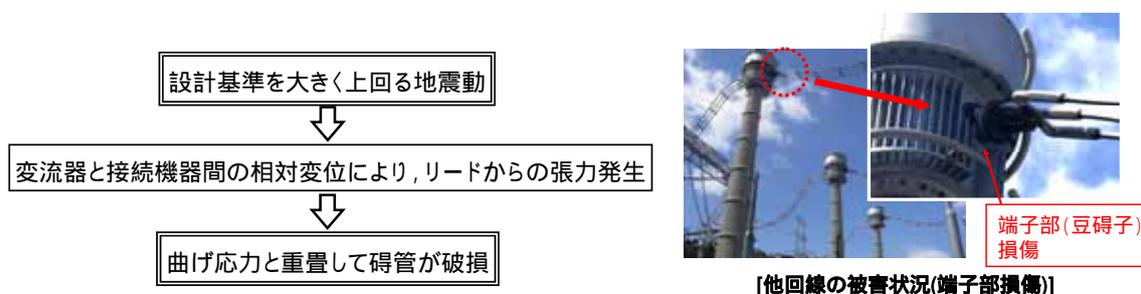
500kV 双葉線 2 号
碍子破損



500kV セクション
碍子破損

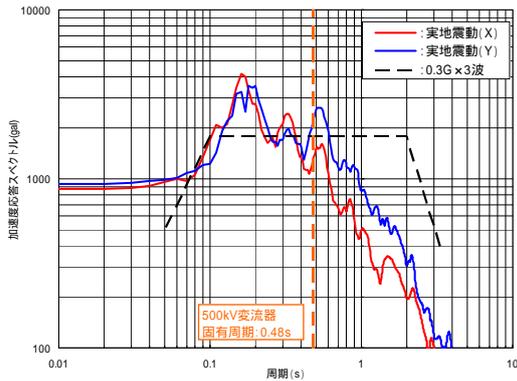
(b) 解析結果および損傷原因

変流器単体での解析による安全率は 1 を上回り、被害実態と合致しない。他回線の 500kV 変流器で端子部の豆碍子が破損していることから、接続機器との間の相対変位を解析した結果、リードからの張力を考慮することで安全率が 1 を下回った。機器の振動により碍子に発生する曲げ応力に、リードからの張力が重畳することで碍子破損に至ったものと考えられる。

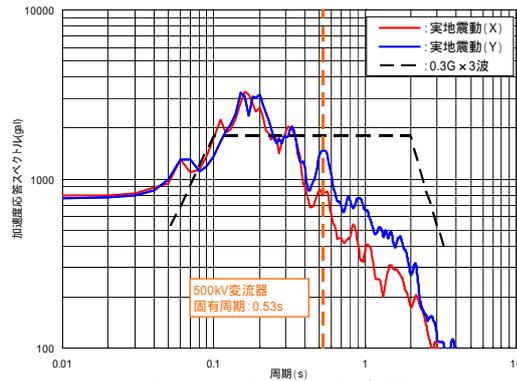


機器名	被害部位	実地震動の地点	安全率		
			実地震動		設計基準
			機器単体	リード重畳	
双葉線 2 号	碍子		1.9	0.73	2.0
500kV セクション	碍子		2.4	0.76	1.6

- 発生応力 (機器単体) : 13.3N/mm² (双葉線 2 号)、10.4N/mm² (500kV セクション)
- 発生応力 (リード重畳): 34.2N/mm² (双葉線 2 号)、32.7N/mm² (500kV セクション)
- 許容応力 : 25N/mm² (500kV 碍管 メーカー保証値)



500kV 双葉線 2号変流器
実地震動の加速度応答スペクトル



500kV セクション変流器
実地震動の加速度応答スペクトル

e . 計器用変圧器

(a) 被害状況

電圧	機器名	被害様相
275kV	大熊線 1号 大熊線 3,4号	赤・白相傾斜 全相傾斜 いずれも運転継続可能



275kV 大熊線 1号
傾斜

(b) 損傷原因

機器設置地点周辺では地盤沈下が発生しており、この影響により傾斜したものと考えられる。

(4) まとめ

被害設備の耐震解析結果（概要）を表6に示す。

表6 耐震解析結果（概要）

対象機器	安全率 ^{*1}	
	実地震動	設計基準
500kV 変圧器二次ブッシング	0.32 ~ 0.36	1.0
275kV 空気遮断器	0.73	1.2 ^{*2}
500kV 断路器	0.57 ~ 0.87	2.1 ~ 2.2 ^{*3}
275kV 断路器	0.94	1.6
500kV 変流器	0.73 ~ 0.76	1.6 ~ 2.0

*1 各機器で最も厳しくなる部位の安全率

*2 ステーで緩みが発生しないときの安全率

*3 操作碍子可動部（ピンジョイント）での衝突が発生しないときの安全率

耐震解析結果より、推定される原因は下記のとおりである。

- ・ 地表面地震動が非常に大きく、設計基準（JEAG-5003-2010）を超過していることが主要因で破損に至った。
- ・ 275 kV 空気遮断器については、耐震強化のため設置したステーが緩むことにより、遮断部の変位が増大して碍子破損に至った。
- ・ 500kV 断路器については、操作碍子可動部の変位量が設計値を超過したことにより衝突が発生し、その結果、操作碍子および支持碍子に衝撃力が加わることで破損に至った。
- ・ 500kV 変流器については、機器の振動による曲げ応力へ、リード線の影響が重畳することで破損に至った。

以上

新福島変電所 地表面地震動解析結果

	地表面波形 X方向	地表面波形 Y方向
	<p>X方向 (最大791gal)</p>	<p>Y方向 (最大767gal)</p>
	<p>X方向 (最大824gal)</p>	<p>Y方向 (最大890gal)</p>
	<p>X方向 (最大823gal)</p>	<p>Y方向 (最大1069gal)</p>
	<p>X方向 (最大949gal)</p>	<p>Y方向 (最大1065gal)</p>
	<p>X方向 (最大679gal)</p>	<p>Y方向 (最大765gal)</p>

