

電気事業法第 106 条第 3 項の規定に基づく報告徴収
に対する報告について

2015 年 5 月 28 日

東京電力株式会社

目 次

1. 事故の状況（事故発生前における運転・管理状況、体制等を含む。）
 - 1-1. 基本事項
 - 1-2. 事故の状況
 - (1) 事故発生前における運転状況
 - (2) 事故発生前における管理状況
 - (3) 管理体制
 - (4) 事故の発生状況
 - (5) 設備被害状況（2015年5月27日までに判明した状況）
 - (6) 潤滑油と絶縁油の漏洩量（2015年5月27日までに判明した状況）
2. 他に与えた被害の状況及び当社の対応状況
 - 2-1. 湯沢発電所からの油流出防止について
 - (1) 石打発電所沈砂池付近での油発見後の初期対応
 - (2) 油流出防止追加対策の実施
 - (3) 絶縁油漏洩箇所の特定と対策
 - (4) 放水路内湧水増加に伴う油流出防止追加対策の実施
3. 事故原因分析
 - 3-1. 原因調査
 - (1) 除雪運用について
 - (2) 気象条件について
 - (3) 崩落屋根上の積雪実態について
 - (4) 屋根構造について
 - (5) 屋根崩落の状況調査結果
 - (6) トラス構成材等の材料試験について
 - 3-2. 原因分析
 - (1) 建設当時の基準・規定について
 - (2) 崩落当時の推測される積雪荷重に対するトラス構成部材の耐力について
 - (3) 屋根崩落のプロセス
 - 3-3. 結論
4. 再発防止対策（他の水力発電所を含む。）
 - 4-1. 事故直後に実施してきた対策
 - (1) 臨時点検の実施
 - (2) 除雪実施基準の暫定運用
 - 4-2. 恒久対策
 - (1) 施設対策
 - (2) 運用対策
 - 4-3. 水力発電設備の保安の向上に向けた取り組み
 - (1) トラブル事例の収集と要因の分析
 - (2) 保安向上に向けた取り組みの検討

本書は、2015年1月15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徴収について」（平成27年1月15日付20150114産保東第7号）に基づき、湯沢発電所建屋屋根崩落事故の状況、他に与えた被害状況及び対応状況、事故原因分析、再発防止対策について報告するものです。

1. 事故の状況（事故発生前における運転・管理状況、体制等を含む。）

1-1. 基本事項

(1) 件名：東京電力株式会社 湯沢発電所建屋屋根崩落事故

(2) 報告事業者：東京電力株式会社

東京都千代田区内幸町1丁目1番3号

(3) 発生日時：2015年1月10日 6時34分

(4) 事故発生 of 電気工作物

名称：湯沢発電所建屋

設置場所：湯沢発電所（新潟県南魚沼郡湯沢町大字湯沢91）

沿革：1922年(大正11年) 東京電燈株式会社にて建設

1939年(昭和14年) 日本発送電株式会社発足

1951年(昭和26年) 東京電力株式会社へ移管

諸元：【運転開始】1923年(大正12年)5月 【最大出力】15,600kW

【最大使用水量】6.121m³/s 【使用電圧】66kV

【制御方式】遠隔常時監視制御方式（無人発電所）

(破損状況は1-2(5)参照)

| | 1号 | 2号 | 3号 | 4号 |
|---------------------|---|-----------------|-----------------|----|
| 水車 | 型式： HP-1R2N 出力： 4,860kW | 同左 | 同左 | 同左 |
| 発電機 | 電圧：6.6kV 容量： 5,200 k VA | 同左 | 同左 | 同左 |
| 主要 変圧器 (単相3台) | No.1 | No.2 | No.3 | |
| | 型式： 油入水冷式 電圧： (一次)69、66、63 k V (二次)6.3 k V 容量： 9,000 k VA | 同左 | 同左 | |
| | PCB含有：0.51mg/kg | PCB含有：0.48mg/kg | PCB含有：0.44mg/kg | |
| 建屋 | 1922年(大正11年)12月鉄筋コンクリート造3階一部2階建 | | | |

(5) 事故原因分析、再発防止対策検討体制

社内関係各部を横断した検討体制を構築して原因究明と対策検討を行うため、2015年1月15日に武部常務執行役を委員長とし、共有・連携することで、適切に対応・推進する委員会を構築、随時開催して計8回の審議を行い本報告に至っている。なお、委員会メンバーとして東京工業大学の竹内教授に参画頂き、有識者の知見を取り入れ原因究明を行った。

また、2015年1月16日に武部常務執行役を本部長とする現地対策本部を設置して、現地との連携した取り組みを強化し、計45回にわたり日々の情報整理と原因究明や二次災害防止対策に対する方針を定め、現地対応を実施している。

1-2. 事故の状況

(1) 事故発生前における運転状況

事故当時の運転状況は、水車発電機4台（最大出力15,600kW）のうち3台にて出力7,900kWで運転中であった。また、湯沢発電所と電氣的に直接接続している石打発電所（最大出力5,700kW）は出力3,400kWで運転中であった。

なお、当日の天候は雪、湯沢発電所構内の積雪は2.3m程度であった。

(2) 事故発生前における管理状況

湯沢発電所建屋は、信濃川電力所建物管理保全基本マニュアルに基づき定期点検（漏水、躯体破損有無等目視確認）を1回／年の頻度で実施し、異常がないことを確認していた。

（至近の点検実績：2014年11月9日当社社員にて実施し異常なし）



写真 1-2(1)：建屋点検時のトラス状況(2014年11月9日撮影)

また、除雪実績や安全対策施設の設置高さなどから信濃川電力所豪雪対応マニュアルにて積雪1.5m程度を目安として定め、発電所建屋入口屋根で積雪高さの確認を行っていた。

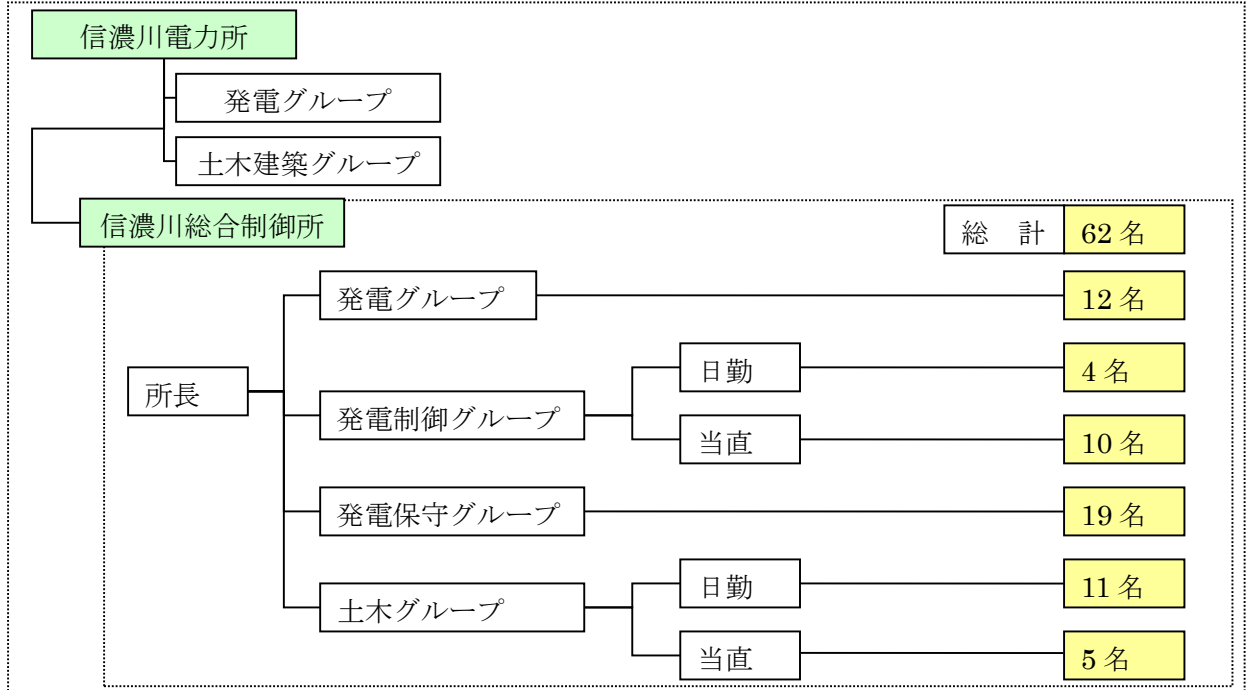
信濃川電力所豪雪対応マニュアルでは、当社社員が3回／日監視カメラにて各発電所の積雪状態を監視し、除雪判断目安相当量に達することが想定される場合には、社員を現地に出向させて目視にて除雪実施要否を判断している。

今回もマニュアルに基づき、1月5日9時に監視カメラにて1.3m程度の積雪が確認されたことから、社員が出向して10時ごろ湯沢発電所にて現地状況を確認した。同日10時30分より、信濃川電力所が所管する水力発電所を対象とした臨時の除雪会議を開催したが、湯沢発電所は現地状況の確認中であったことから、現地確認情報により改めて判断することとした。現地確認を終えた社員は引き続き石打発電所の積雪状況等も確認した後、事業所にもどり、制御所関係グループマネージャー（以下、GM）との臨時の除雪会議を開催し湯沢発電所の除雪が必要と決定した。同日16時ごろ、協力会社へ1月9日までに当該箇所を除雪を完了するよう手配を行ったが作業員の手配がつかず、調整の結果、1月14日より除雪を開始し1月16日までに完了することとした。

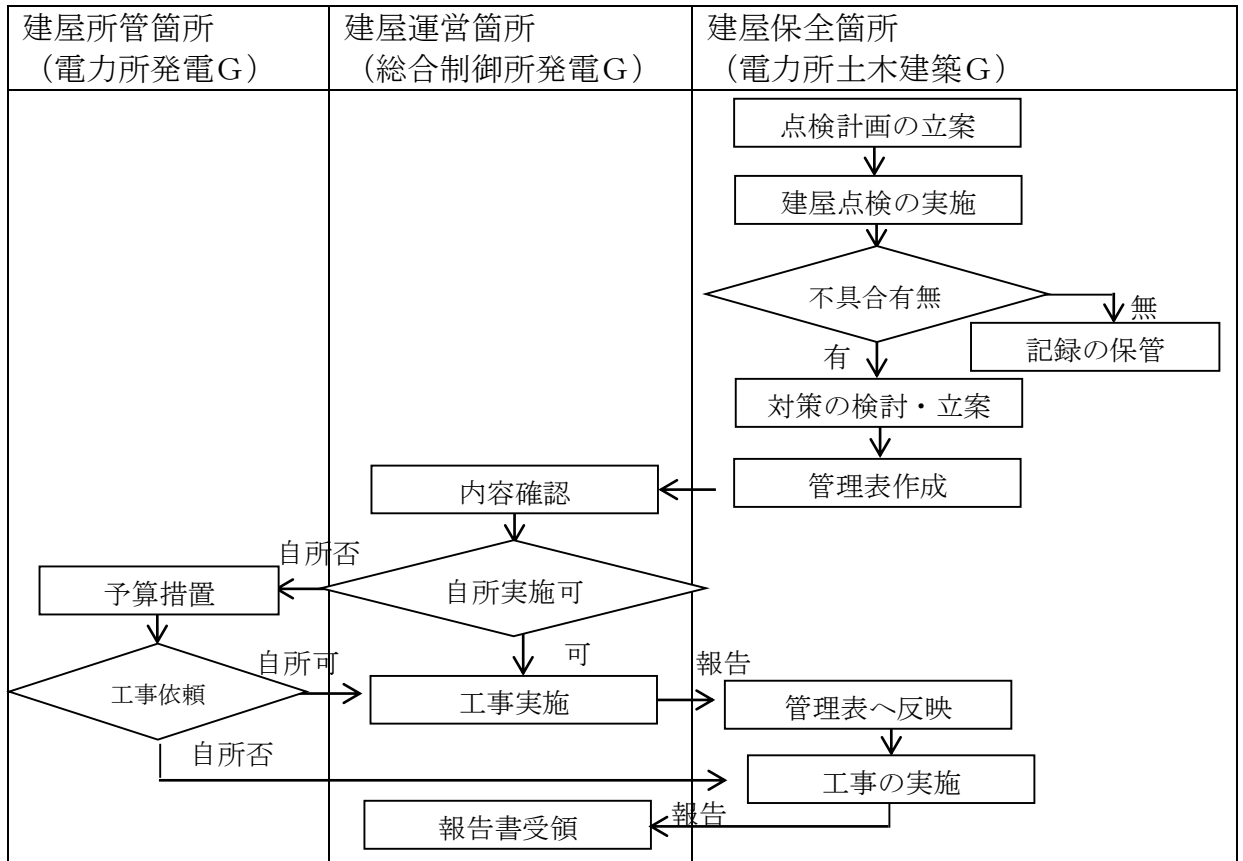
(3)管理体制

信濃川電力所には設備主管箇所として発電グループ（水力発電設備）、土木建築グループ（水土木設備）があり、その設備の運用・保守を行う第一線機関として信濃川総合制御所がある。

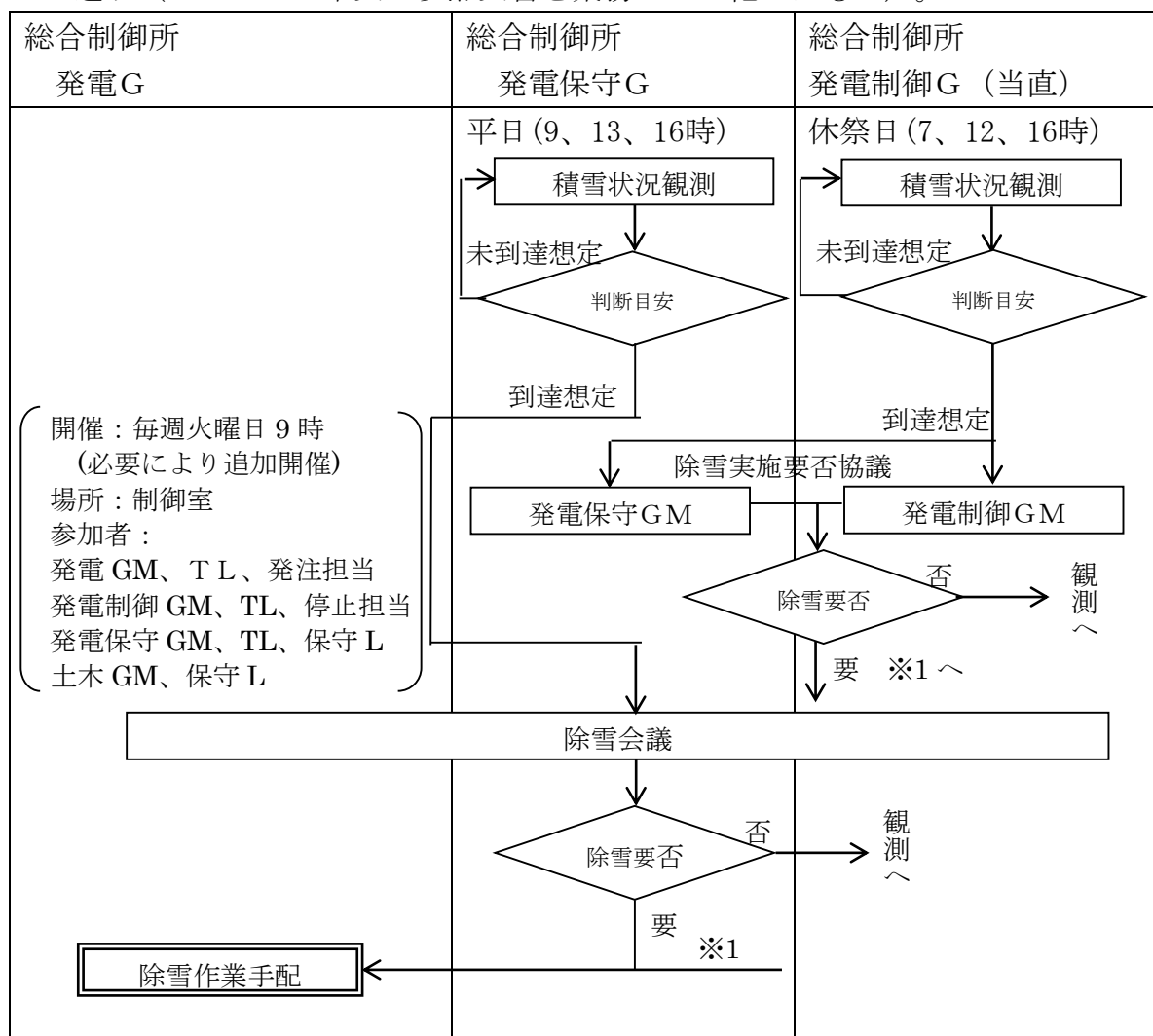
信濃川電力所信濃川総合制御所は所長以下62名が在籍している（2015年1月時点）。信濃川総合制御所の業務組織体制を以下に示す。



「信濃川電力所建物管理保全基本マニュアル」における発電所建屋に関する管理体制は以下の通り（マニュアル本文を業務フロー化したもの）。



「信濃川電力所豪雪対応マニュアル」における建屋除雪に関する管理体制は以下の通り（マニュアル本文・参照文書を業務フロー化したもの）。



(4) 事故の発生状況

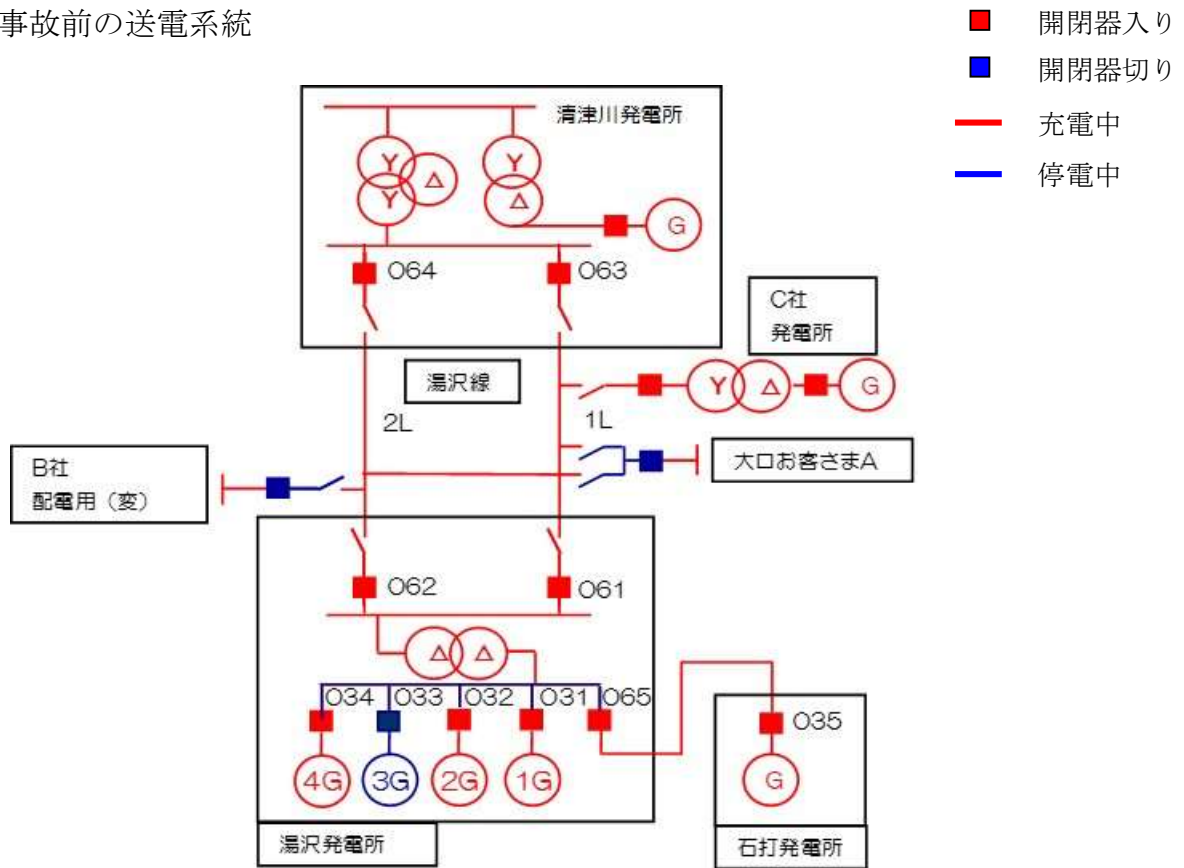
2015年1月10日6時34分、湯沢発電所66kV母線地絡過電圧継電器動作、66kV湯沢線遮断器開放、水車発電機（1・2・4号）および電氣的に直接接続している当社石打発電所の水車発電機が非常停止した。同時刻に湯沢発電所では火災警報が発生・復帰した。7時14分に当社社員が湯沢発電所へ到着し、8時32分に発電機室の屋根が崩落し壁の一部が破損していることを確認した。また、人身事故の発生はなかった。

主な時系列は以下の通り。

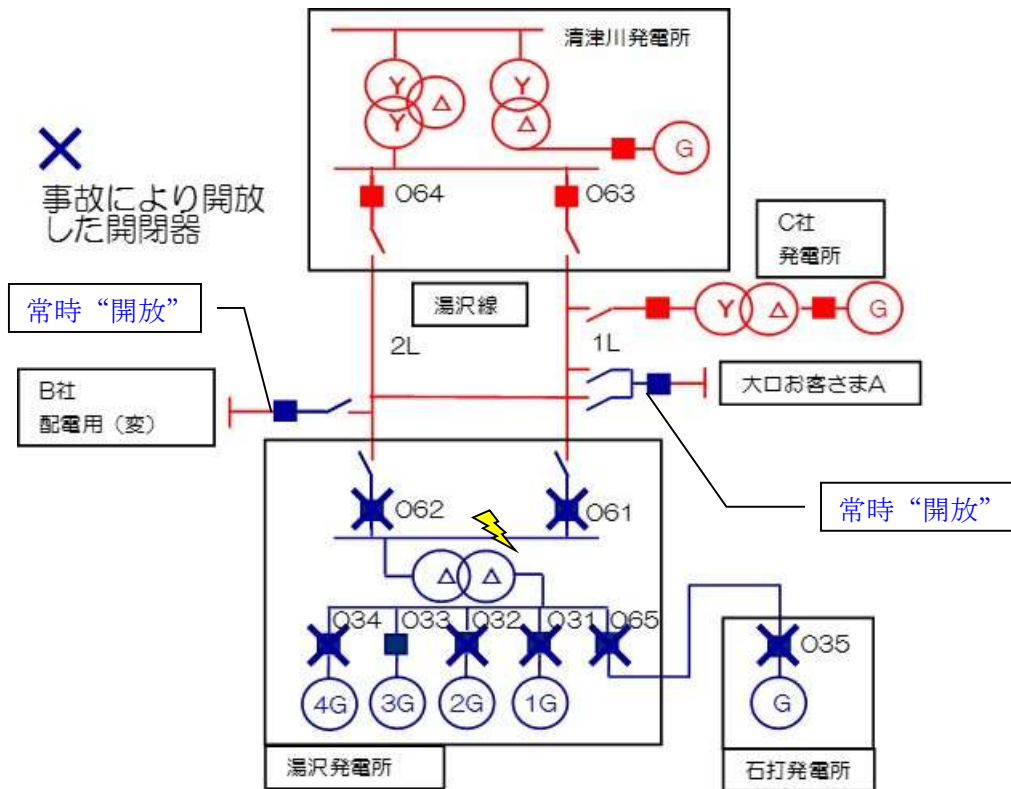
| 1月10日の対応状況 | |
|------------|---|
| 6 : 34 | 湯沢発電所 66kV母線地絡過電圧継電器動作 湯沢線 1号 O61(開閉器)開放 湯沢線 2号 O62(開閉器)開放 湯沢発電所 1・2・4号発電機非常停止 湯沢発電所火災警報発生・復帰 石打発電所発電機非常停止 |

| 1月10日の対応状況 | |
|------------|--|
| 6 : 4 6 | 南魚沼消防署へ火報動作連絡 |
| 6 : 5 0 | 石打発電所 魚野川本川取水口 取水停止 |
| 7 : 0 0 | 湯沢発電所 清津川本川取水口 取水停止 |
| 7 : 1 4 | 当社社員 湯沢発電所到着 臨時巡視開始 入口シャッター破損を確認 |
| 8 : 1 0 | 南魚沼消防署より、火災なしと判断 |
| 8 : 3 2 | 発電機室の屋根崩落、壁は一部破損を確認 |
| 10 : 0 5 | 湯沢発電所 沈砂池より放流開始 |
| 10 : 3 5 | 湯沢発電所 取水停止完了 |
| 10 : 5 1 | 石打発電所沈砂池付近にて油の浮遊を確認(当社社員) オイルフェンス設置準備開始 |
| 10 : 5 4 | 河川利水関係者・自治体など関係箇所へ連絡開始 |
| 11 : 2 4 | 当社社員が石打発電所下流の五十嵐橋で河川に油の浮遊なしを確認 |
| 11 : 3 0 | 関係箇所への油流出連絡完了 |
| 11 : 5 3 | 石打発電所 沈砂池付近にて警察・消防署と合流 |
| 12 : 4 5 | 南魚沼地域振興局より連絡有り(旭橋、姥島橋地点での油浮遊なし) |
| 12 : 5 5 | 当社社員による魚野川下流域の河川パトロール開始 |
| 14 : 3 0 | 石打発電所沈砂池へオイルフェンス設置 |
| 14 : 5 0 | 石打発電所沈砂池へオイルフェンス設置(二重目) |
| 17 : 2 5 | 石打発電所沈砂池へオイルフェンス設置(三重目) |
| 17 : 3 3 | 当社社員による魚野川下流域の河川パトロール終了(公共用水域への油浮遊は確認されず) |

a. 事故前の送電系統

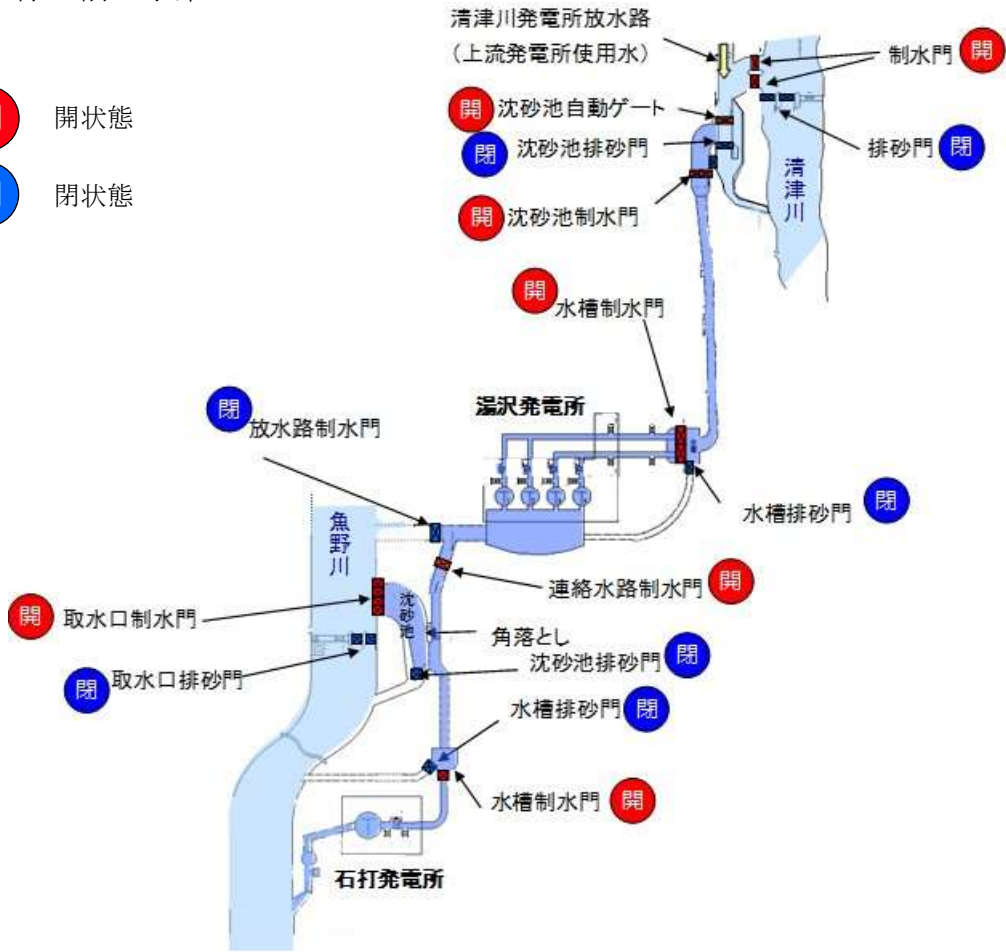


b. 事故発生時の送電系統



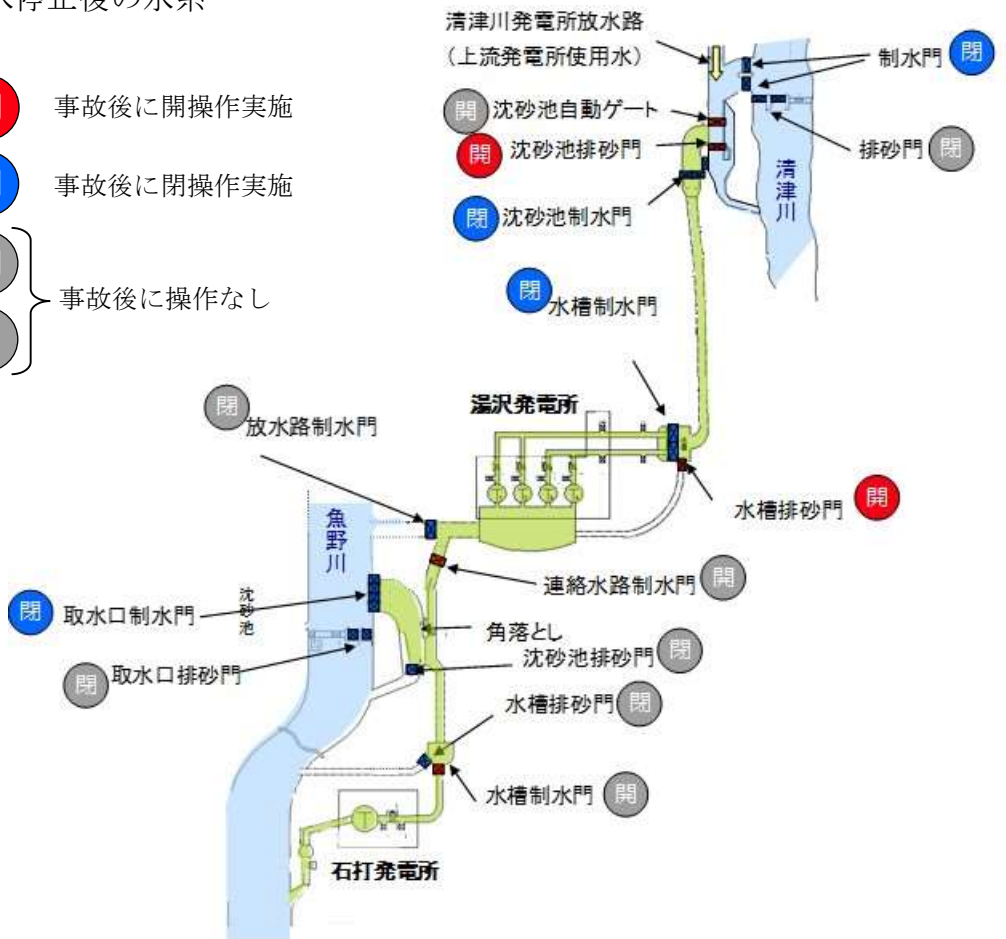
c. 取水停止前の水系

- 開 開状態
- 閉 閉状態



d. 取水停止後の水系

- 事故後に開操作実施
- 事故後に閉操作実施
- 事故後に操作なし



(5)設備被害状況(2015年5月27日までに判明した状況)

発電所建屋：屋根(602m²)崩落(詳細は3-1参照)、天井クレーン変形

水力発電設備：(主な破損部位)

水車：[1号]ケーシング分岐管(ニードル含む)、デフレクタ、调速機

[2号]デフレクタ、调速機

[3号]ケーシング分岐管(ニードル含む)、デフレクタ、调速機

[4号]ケーシング分岐管(ニードル含む)、デフレクタ、调速機

発電機：破損なし

圧油装置：入口弁用圧油装置油面計(制御用圧油装置は破損なし)

変圧器：No.1変圧器[PCB含有：0.51mg/kg]

破損なし、油漏洩なし

No.2変圧器[PCB含有：0.48mg/kg]

コンサベータ*傾斜、配管フランジ破損、
低圧側碍子破損、油漏洩有

No.3変圧器[PCB含有：0.44mg/kg]

コンサベータ*脱落、配管脱落、油漏洩有

*変圧器に充填されている絶縁油は周囲温度や通電により発生する熱によって体積変化を生じる。コンサベータとは、その体積変化を吸収する役割を担うもの。

遮断器：66kV湯沢線1号CBO61 外観上異常なし

66kV湯沢線2号CBO62 外観上異常なし

発電機並列用CBO31~O34 外観上異常なし

6kV石打線CBO65 外観上異常なし

a. 建屋被害状況

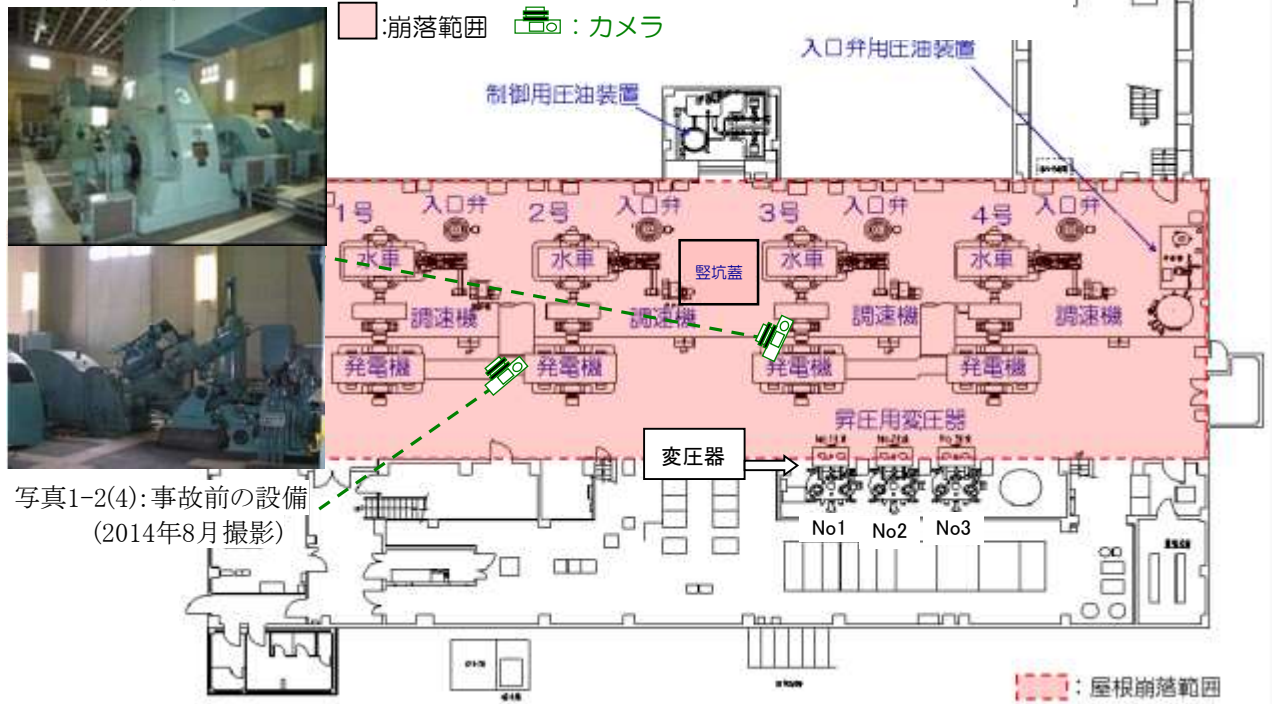


写真1-2(2):屋根崩落前の建屋(2003年11月 撮影)

写真1-2(3):屋根崩落後の建屋

(2015年1月10日 9時頃撮影)

b. 設備被害状況 (1F)



1号水車関係 (2015. 3. 23撮影)

左:

ニードル操作機構一部破損

右:

调速機破損



2号水車関係 (2015. 4. 13撮影)

左:

デフレクタ操作機構一部破損

右:

调速機破損



3号水車関係 (2015. 4. 27撮影)

左:

ニードル操作機構一部破損

右:

调速機破損



4号水車関係 (2015. 5. 20撮影)

左:

ニードル操作機構一部破損

右:

调速機破損



写真1-2(5) : 各水車関係の破損状態

圧油装置関係 [左：制御用破損なし、右：入口弁用油面計破損]



写真1-2(6):圧油装置関係の破損状態(2015年4月27日撮影)

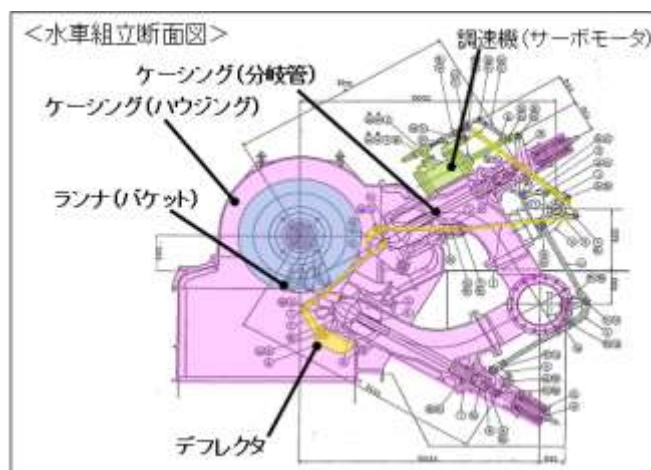
c. 1～4号水車発電機、圧油装置（制御用、入口弁用）の被害状況集約

表1-2(1):設備被害状況集約表

| 主要電気工作物分類 | 対象構成品 | 部品・装置名 | 1号機 | 2号機 | 3号機 | 4号機 |
|-----------|-------|----------------|-------|-------|-------|-------|
| 水車 | ランナ | バケット(ディスク含む) | ⑤破損無し | ⑤破損無し | ⑤破損無し | ⑤破損無し |
| | | 水車軸(フライホイール除く) | ⑤破損無し | ⑤破損無し | ⑤破損無し | ⑤破損無し |
| | ケーシング | ハウジング | ②損傷 | ②損傷 | ②損傷 | ②損傷 |
| | | 分岐管(ニードル含む) | ③破壊 | ②損傷 | ③破壊 | ③破壊 |
| | デフレクタ | デフレクタ(連結機構含む) | ③破壊 | ③破壊 | ③破壊 | ③破壊 |
| | 调速機 | 機械部 | ③破壊 | ③破壊 | ③破壊 | ③破壊 |
| | | 電気部 | ③破壊 | ③破壊 | ③破壊 | ③破壊 |
| | 圧油装置 | 制御用圧油装置 | ⑤破損無し | — | — | — |
| | | 入口弁用圧油装置 | ①変形 | — | — | — |
| | 発電機 | — | — | ⑤破損無し | ⑤破損無し | ⑤破損無し |

※破損レベル

- ①変形：従来の形から変化（曲がり、捻れ）
- ②損傷：①+キズ（えぐれ、摩耗）
- ③破壊：②+亀裂、穴、破断、折損
- ④補修可能：上記以外の破損状態で工場持ち込み
修理を実施せずに現地で修理可能
- ⑤破損無し



d. No.1、2、3 変圧器被害状況

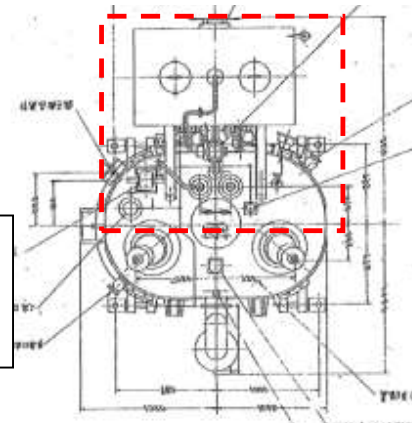
撮影ポイント



コンサベータ異常なし
配管フランジ異常なし
漏洩なし

写真 1-2(7):No.1 変圧器

(2015 年 1 月 27 日撮影)



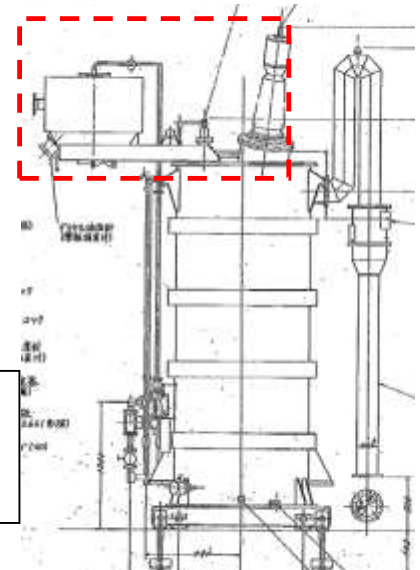
変圧器平面図



コンサベータ傾斜
配管フランジ破損
低圧側碍子破損
漏洩有り

写真 1-2(8):No.2 変圧器

(2015 年 1 月 27 日撮影)



変圧器側面図

図 1-2(1):変圧器外観図



コンサベータ脱落
配管脱落
漏洩有り

写真 1-2(9):No.3 変圧器

(2015 年 1 月 27 日撮影)

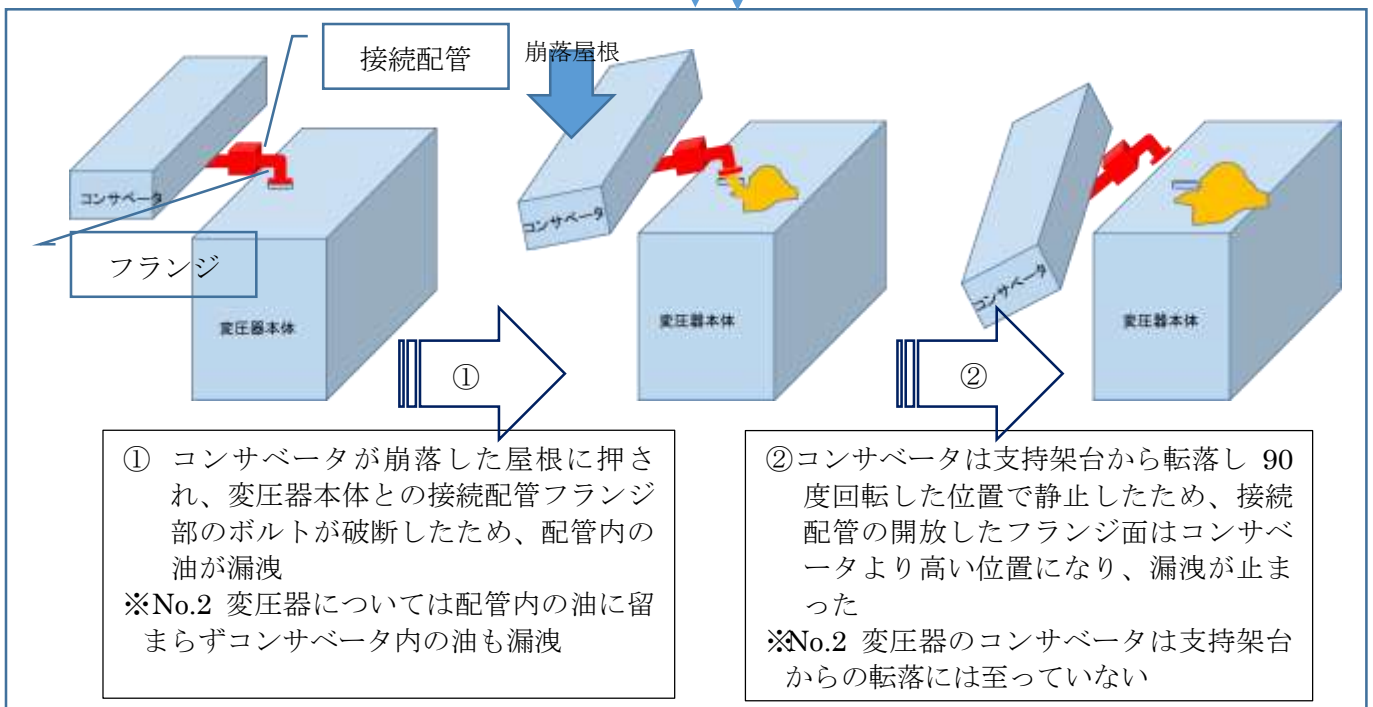


図 1-2(2):油漏洩の想定プロセス

(6) 潤滑油と絶縁油の漏洩量(2015年5月27日までに判明した状況)

表 1-2(2):潤滑油と絶縁油の漏洩量一覧表

| 項 | 油使用設備名称 | 使用総油量 | 抜油(回収)量 | 残油量 | 漏洩量(想定) |
|---|---------------|---------|---------|------|---------|
| a | 水車発電機軸受(潤滑油) | 800L | 270L | 0L | 543 L |
| b | 制御用圧油装置(潤滑油) | 2,009L | 1,000L | 0L | 1,009 L |
| c | 入口弁用圧油装置(潤滑油) | 5,383L | 2,260L | 0L | 3,123 L |
| d | 変圧器(絶縁油) | 17,880L | 17,455L | 390L | 240 L |
| | 合計 | 26,072L | 20,985L | 390L | 4,915 L |

a. 水車発電機軸受(潤滑油)からの漏洩量

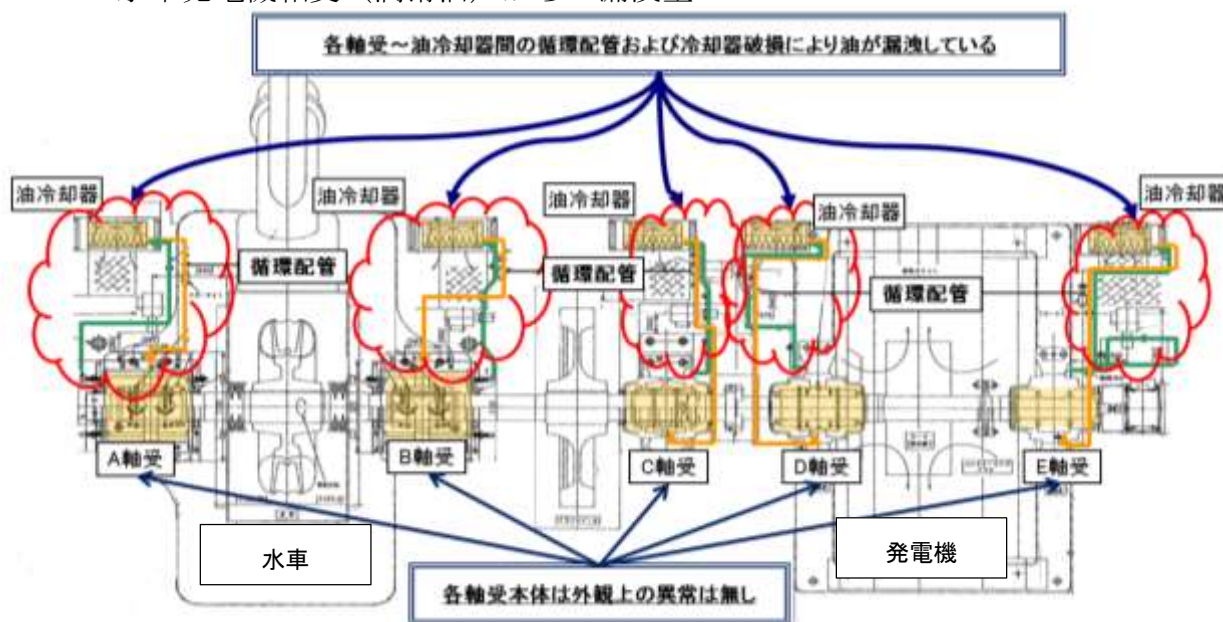


図 1-2(3):水車発電機軸受破損状況と油漏洩状況

表 1-2(3):水車発電機軸受からの油漏洩量

| | | A軸受 | B軸受 | C軸受 | D軸受 | E軸受 | 合計 |
|--------------------------|---------|------|----------|------|------|------|------|
| 1号機 回収日: 2015.3.24 | 使用総油量 | 40L | 40L | 40L | 40L | 40L | 200L |
| | 抜油(回収)量 | 1L | 53L(混水有) | 11L | 0L | 10L | 75L |
| | 漏洩量 | 39L | 0L | 29L | 40L | 30L | 138L |
| | 残油量 | 0L | 0L | 0L | 0L | 0L | 0L |
| 2号機 回収日: 2015.4.7 | 使用総油量 | 40L | 40L | 40L | 40L | 40L | 200L |
| | 抜油(回収)量 | 40L | 12L | 28L | 0L | 23L | 103L |
| | 漏洩量 | 0L | 28L | 12L | 40L | 17L | 97L |
| | 残油量 | 0L | 0L | 0L | 0L | 0L | 0L |
| 3号機 回収日: 2015.4.22 | 使用総油量 | 40L | 40L | 40L | 40L | 40L | 200L |
| | 抜油(回収)量 | 0L | 11L | 0L | 0L | 21L | 32L |
| | 漏洩量 | 40L | 29L | 40L | 40L | 19L | 168L |
| | 残油量 | 0L | 0L | 0L | 0L | 0L | 0L |
| 4号機 回収日: 2015.4.28 | 使用総油量 | 40L | 40L | 40L | 40L | 40L | 200L |
| | 抜油(回収)量 | 0L | 27L | 12L | 18L | 3L | 60L |
| | 漏洩量 | 40L | 13L | 28L | 22L | 37L | 140L |
| | 残油量 | 0L | 0L | 0L | 0L | 0L | 0L |
| 1~4号機 | 漏洩量 | 119L | 70L | 109L | 142L | 103L | 543L |

■ 漏洩状況の想定

- ・ 各軸受に外観上の異常は無く、軸受～油冷却器を接続している循環配管、および油冷却器から潤滑油が漏洩

■ 漏洩量の想定

- ・ 事故前は各軸受に使用総油量40Lを内蔵、水車1台当たり200L(4台で800L)
- ・ 回収した油量から漏洩量を算出

b. 制御用圧油装置（潤滑油）からの漏洩量

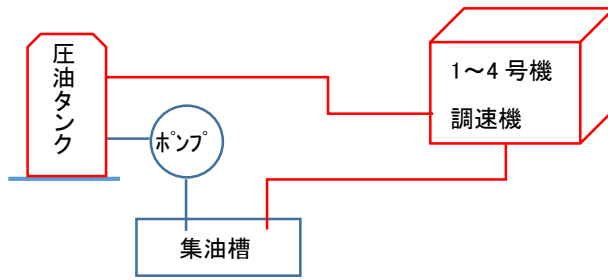


図 1-2(4):制御用圧油装置イメージ

表 1-2(4):制御用圧油装置からの油漏洩量

| | |
|----------|--------|
| 使用総油量 | 2,009L |
| 抜油量(回収量) | 1,000L |
| 漏洩量 | 1,009L |
| 残油量 | 0L |

■ 漏洩状況の想定

- ・ 调速機、配管内へ圧油供給中に事故発生
- ・ 调速機（機械部）、配管が破損し、圧油が漏洩したと想定
- ・ 圧油タンク内に潤滑油は残っていないことから、圧油範囲（図1-2(4)赤色部）は漏洩したと想定

■ 漏洩量の想定

- ・ 過去の巡視記録から、圧油タンクには1,026 L、集油槽は675Lの潤滑油があったと想定
- ・ 调速機他の機器使用油量は水車1台あたり77 L（4台で308L）
- ・ 従って全油量は計2,009 L（配管類の油量は未想定）
- ・ 集油槽から1,000Lの油を回収したことから漏洩量を1,009L程度と算出

c. 入口弁用圧油装置（潤滑油）からの漏洩量

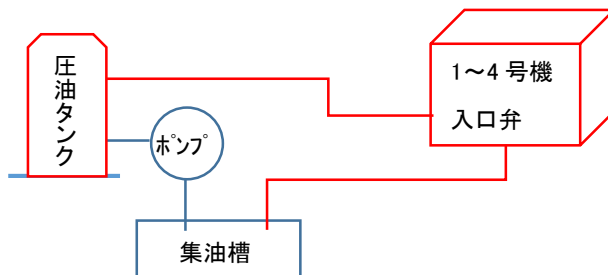


図 1-2(5):入口弁用圧油装置イメージ

表 1-2(5):入口弁用圧油装置からの油漏洩量

| | |
|----------|--------|
| 使用総油量 | 5,383L |
| 抜油量(回収量) | 2,260L |
| 漏洩量 | 3,123L |
| 残油量 | 0L |

■ 漏洩状況の想定

- ・ 入口弁サーボ、配管内へ圧油供給中に事故発生
- ・ サーボ類や配管が破損し、圧油が漏洩したと想定
- ・ 圧油タンク内に潤滑油は残っていないことから、圧油範囲（図1-2(5)赤色部）は漏洩したと想定

■ 漏洩量の想定

- ・ 過去の巡視記録から、圧油タンクには2,565 L、集油槽には2,322 Lの潤滑油があったと想定
- ・ 入口弁サーボ他の機器使用油量は水車1台あたり124 L（4台で496L）
- ・ 従って全油量は計5,383L（配管類にあった油量は未想定）
- ・ 集油槽から2,260Lの油を回収したことから漏洩量を3,123L程度と算出

d. 変圧器（絶縁油）からの漏洩量

表 1-2(6):変圧器からの油漏洩量

| 項目 | No.1 変圧器 | No.2 変圧器 | No.3 変圧器 |
|---------|---|---|---|
| 使用総油量 | 5,960L | 5,960L | 5,960L |
| 抜油(回収)量 | 1回 5,500L(2月13日) 2回 300L(3月9日) 3回 30L(4月16日) 合計 5,830L | 1回 5,300L(2月12日) 2回 270L(2月25日) 3回 20L(4月22日) 4回 20L(4月28日) 合計 5,610L | 1回 5,200L(2月12日) 2回 300L(2月26日) [水分混入] 3回 497L(4月22日) 4回 18L(4月28日) [水分混入] 合計 6,015 L |
| 漏洩量 | 0L | 220L | 20L |
| 残油量 | 130L(絶縁紙含浸分含む) | 130L(No.1 変圧器実績より) | 130L(No.1 変圧器実績より) |

■ No. 1 変圧器 油漏洩有無の検証

現地調査により確認したコンサベータ油面と油温を、事故前までに採取したデータとの相関性で確認したところ、相関は保たれていることから、外観上漏洩が無いこととあわせ、封入絶縁油の漏洩は無いものと判断した。

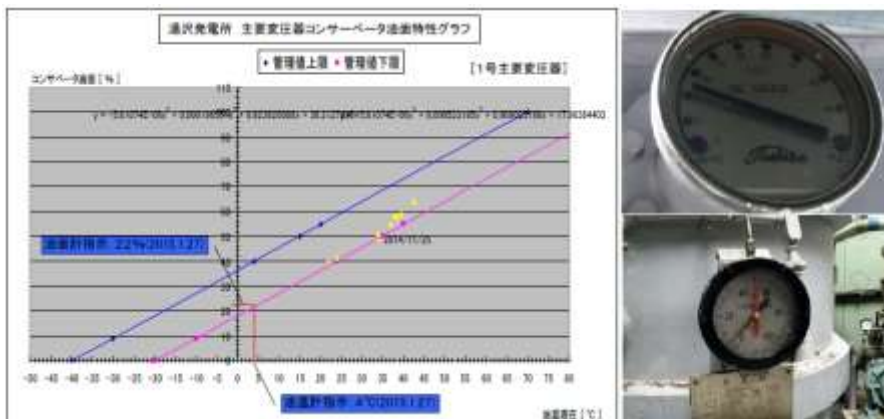


図 1-2(6):No1.変圧器コンサベータ油面と油温の関係

■ No. 1 変圧器の油量想定

- ・ 過去の巡視記録から、変圧器内部に充填されていた絶縁油量は、5,960 L と想定
- ・ 変圧器本体に損傷はないことから外部への油漏洩は無く、回収量との差は残油量と考えられるため、今後も抜油作業は継続

■ No. 2 変圧器 油漏洩状態の確認

- ・ 現地調査により、崩落した瓦礫にコンサベータが圧され、変圧器本体との接続部（フランジ）が破損したことで絶縁油が漏洩したと想定



写真 1-2(10):No.2 変圧器破損と油漏洩の状況 (2015年1月27日撮影)

■ No. 2 変圧器からの漏洩量の想定

- ・ 過去の巡視記録から、変圧器内部に充填されていた絶縁油量は、5,960 L と想定
- ・ 変圧器本体とコンサベータの残絶縁油は現時点で回収し得る全量を回収し、No. 1 変圧器と同等の残油量と想定
- ・ 充填油量と回収量との差分 220L は漏洩したと想定
- ・ 回収量との差は残油量も含まれると考えられるため、今後も抜油作業は継続

■ No. 3 変圧器 油漏洩状態の確認

- ・ 現地調査により、崩落した瓦礫にコンサベータが押し倒され、変圧器本体との接続部（フランジ）を破損し配管が脱落したことで絶縁油が漏洩したと想定



写真 1-2(11):No3.変圧器破損と油漏洩の状況（2015年1月27日撮影）

■ No. 3 変圧器からの漏洩量の想定

- ・ 過去の巡視記録から、変圧器内部に充填されていた絶縁油量は、5,960 L と想定
- ・ 変圧器本体とコンサベータの残絶縁油は現時点で回収し得る全量を回収し、No. 1 変圧器と同等の残油量と想定
- ・ 回収量には水分が混入し、回収量が使用総油量を上回っていると想定
- ・ 外観にて油漏洩を確認していることから、破損しているコンサベータと変圧器本体間の接続配管分は漏洩していると考え、配管容積分の 20L は漏洩したと想定
- ・ 残油分はあると考えられるため、今後も抜油作業は継続

2. 他に与えた被害の状況及び当社の対応状況

発電所構内での油漏洩は発生したが、公共用水域への流出は確認されていない。
今回の事故によって、人身災害や供給支障および公衆や公共の財産への被害は発生していない。

直接的に他者へ害を生じたものではないが、以下の通り、当社が対応した状況を記載する。

2-1. 湯沢発電所からの油流出防止について(図 2-1(1)参照)

(1) 石打発電所沈砂池付近での油発見後の初期対応

湯沢発電所の油入機器破損に伴い、潤滑油および絶縁油が漏洩し、下流にある石打発電所の取水口沈砂池に流下した油の滞留を確認したため、事故当日、オイルフェンスを三重に設置し、滞留油の回収を行った。

回収と並行して河川パトロール（2015年1月10日、11日）を行ったが、公共用水域への油の流出は確認されていない。以降、石打発電所沈砂池の現地監視（昼間3時間毎、夜間4時間毎）を油水分離装置稼働翌日（2015年1月31日）まで実施し、油流下の有無の確認および滞留する油の回収を行った。

また、石打発電所沈砂池で回収した油をPCB含有検査したところ、PCBは検出されなかった（2015年1月12日）。

屋根崩落した発電機フロアより油が湯沢発電所放水路へ漏洩している箇所を確認（2015年1月12日）したため、同日には湯沢発電所放水路に油受けと土嚢積みによる仮設防油堤を設け、漏洩油の流下を防止した（設置以降、石打発電所沈砂池への油流下は確認されていない）。また、建屋外への流出防止を目的に建屋出入口3箇所に土嚢積みによる仮設防油堤を設けた（現時点で建屋外への流出は確認されていない）。

湯沢発電所放水路の仮設防油堤で回収した油に対し、PCB含有検査を行ったところ、仮設防油堤内で回収した油から0.33mg/kgのごく微量のPCBを検出した（2015年1月15日）。

a. 油流出状況

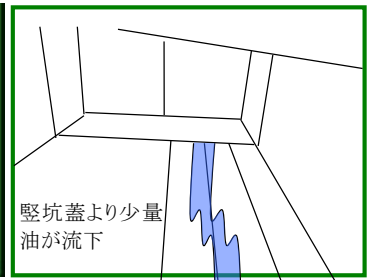
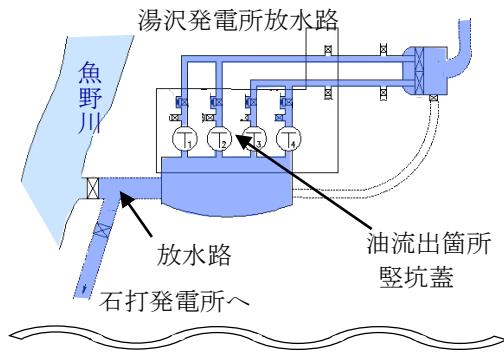


写真2-1(1):水車発電機室(1F)下部の放水路内から上部に向け撮影
(2015年1月11日 17時頃撮影)

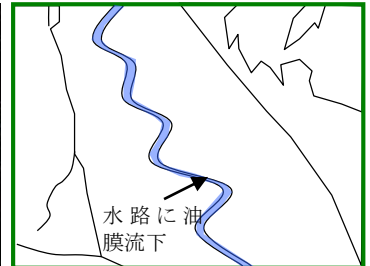
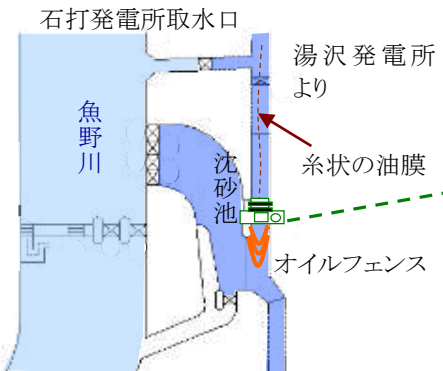


写真2-1(2):水路内を流れる浮油
(2015年1月10日 11時頃撮影)

b. オイルフェンス設置状況

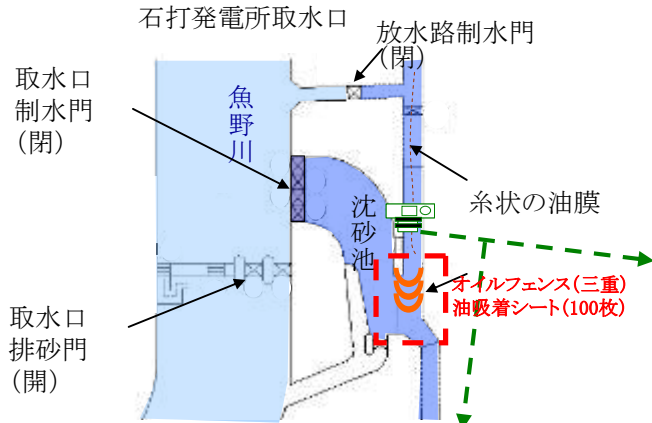


写真2-1(3):オイルフェンス状況
(2015年1月10日 17時頃撮影)



オイルフェンス内油滞留

写真2-1(4):オイルフェンス状況
(2015年1月11日 10時頃撮影)

c. 油流出防止初期対策状況 (2015年1月13日時点)

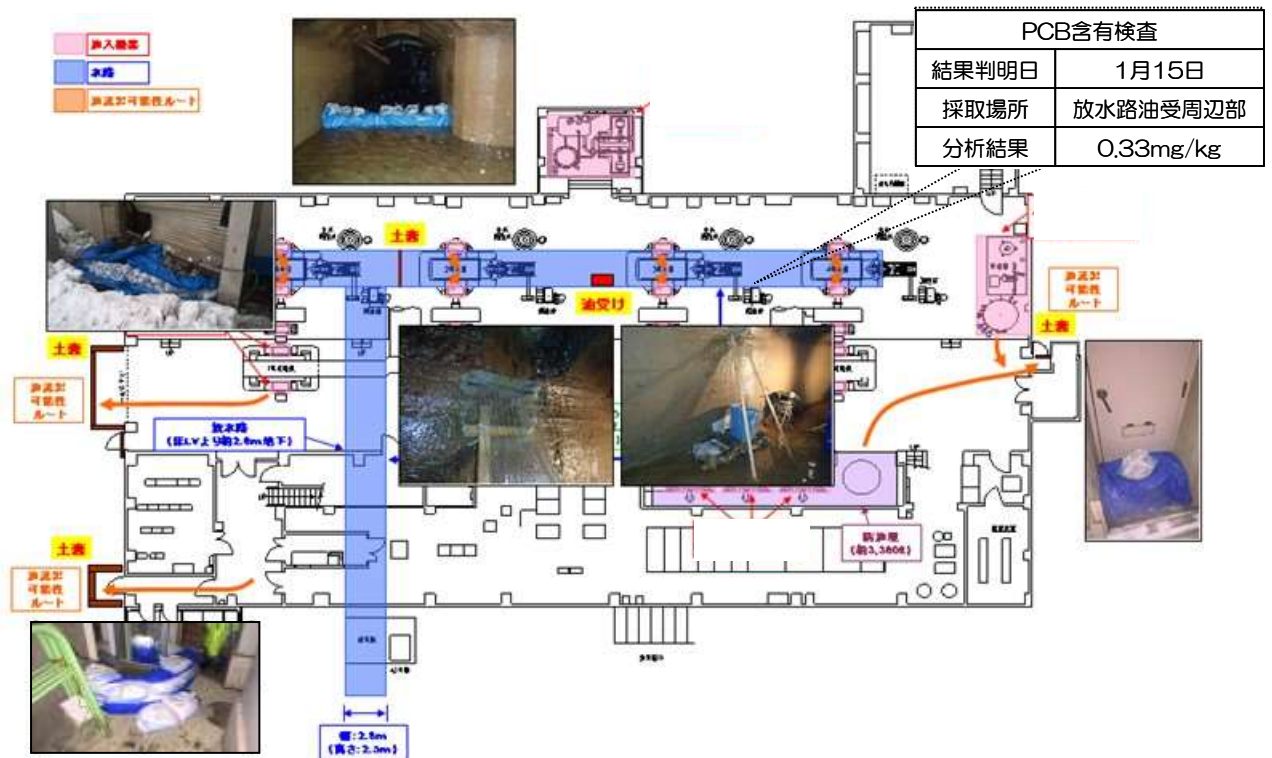


図2-1(1):油流出防止初期対策状況(2015年1月13日時点)

(2) 油流出防止追加対策の実施 (図 2-1 (2) 参照)

湯沢発電所構内で確実に漏洩油を止めるため、以下の対策を実施。

- a 放水路末端へのオイルフェンス追加設置 (2015年1月16日)
- b コンクリート壁の追加設置 (2015年1月17日、1月24日)
- c 放水路流入水の軽減 (2015年1月22日)
- d 仮設防油堤内の油を油吸着マットにて回収 (2015年1月25日)
- e 仮設防油堤内の油水をポンプにて回収 (2015年1月28日)
(ごく微量のPCBを検出した油水は全て回収しドラム缶にて保管)
- f 発電所放水路末端への油水分離装置設置 (2015年1月30日)
- g コンクリート壁による閉塞 (2015年1月30日)

(3) 絶縁油漏洩箇所の特定と対策

変圧器の状況を確認するため、変圧器室の壁を一部開口 (2015年1月26日) し、変圧器破損状況を目視にて確認した (2015年1月27日)。その際、No. 2変圧器下部のケーブル配管ピット内部より、放水路へ貫通するルートを確認した。

No. 2、3変圧器から漏洩した絶縁油が、このルートを経て、放水路へ流出したと想定されることから、発見した貫通ルートの出口には、油受けを新たに設置 (2015年1月27日)。

No. 1、2、3変圧器については、自治体との協議結果に基づき、資機材や土壌などへのPCB汚染の拡大防止に努めながら、抜油・運搬を実施している (No. 1変圧器は2015年2月13日以降複数回抜油しPCB廃棄物として処理済み。No. 2、3変圧器は2015年2月12日以降複数回抜油し廃油として処理済み)。

a. 油流出防止追加対策状況（2015年1月30日時点）

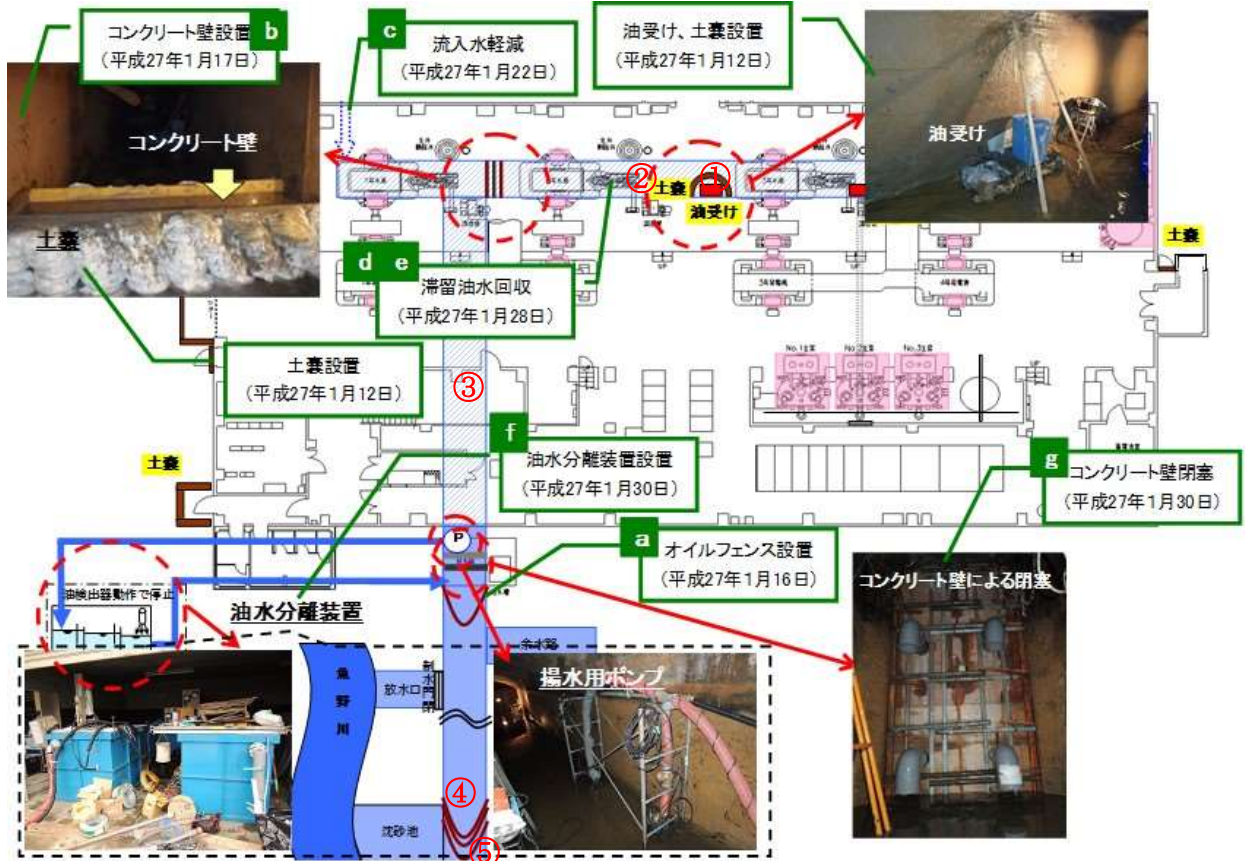


図2-1(2): 油流出防止追加対策状況(2015年1月30日時点)

(4) 放水路内湧水増加に伴う油流出防止追加対策の実施(図 2-1 (3) 参照)

湯沢発電所放水路に設置した仮設防油堤で区切ったエリアの床面より、600L/minを超える湧水が発生し、これまでの油水回収能力を上回る事象が発生したことから、追加で以下の対策を実施。

- h 保管貯留設備の追加設置（2015年3月19日）
- i 湧水箇所区分コンクリート壁の追加設置（2015年4月6日）
- j 湧水排水用ポンプの追加設置（2015年4月6日）
- k 油水分離装置の追加設置（2015年4月16日）

なお、破損した油入機器の撤去は7月末日途で完了予定。

(5) PCB分析と回収油水処理の状況

2015年1月26日以降、仮設防油堤内（図2-1 (2) ①～⑤）より回収した油水からはPCBは検出されていない（分析結果は表2-1(1)参照）。

表2-1(1): PCB分析と回収油水処理状況

| 試料番号 | 1月10日 | 1月13日 | 1月20日 | 1月21日 | 1月22日 | 1月23日 | 1月24日 | 1月25日 | 1月26日 | 1月27日 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ① | — | — | 0.3未満 | 0.3未満 | 0.3未満 | 0.3未満 | 0.3未満 | 0.3未満 | 0.3未満 | 0.3未満 |
| ② | — | 0.33 | 0.36 | 0.37 | 0.39 | 0.45 | 0.37 | 分析不可※ | 不検出※1 | 不検出 |
| ③ | — | — | 不検出 | 不検出 | 不検出 | 不検出 | 不検出 | 不検出 | 不検出 | 不検出 |
| ④ | 不検出 | — | 不検出 | 不検出 | 不検出 | 不検出 | 不検出 | 不検出 | 不検出 | 不検出 |
| ⑤ | — | — | 不検出 | 不検出 | 不検出 | 不検出 | 不検出 | 不検出 | 不検出 | 不検出 |

試料番号:油流出防止追加対策状況（2015年1月30日現在） 図示

※:油分回収により分析試料採取不可 ※1:油分減少により水質分析に移行

PCB含有分析：迅速判定法（下限 0.30mg/kg）>0.30mg/kg⇒簡易定量法（下限 0.15mg/kg）
 水質分析：ガスクロマトグラフ同質量分析法等（下限 0.0005mg/L）

各防油堤やオイルフェンスにて回収した油については、自治体と相談し、ご指導を受けながら法令に基づく、適正な処理をしている。

a. 油流出防止追加対策状況 (2015年4月16日以降)

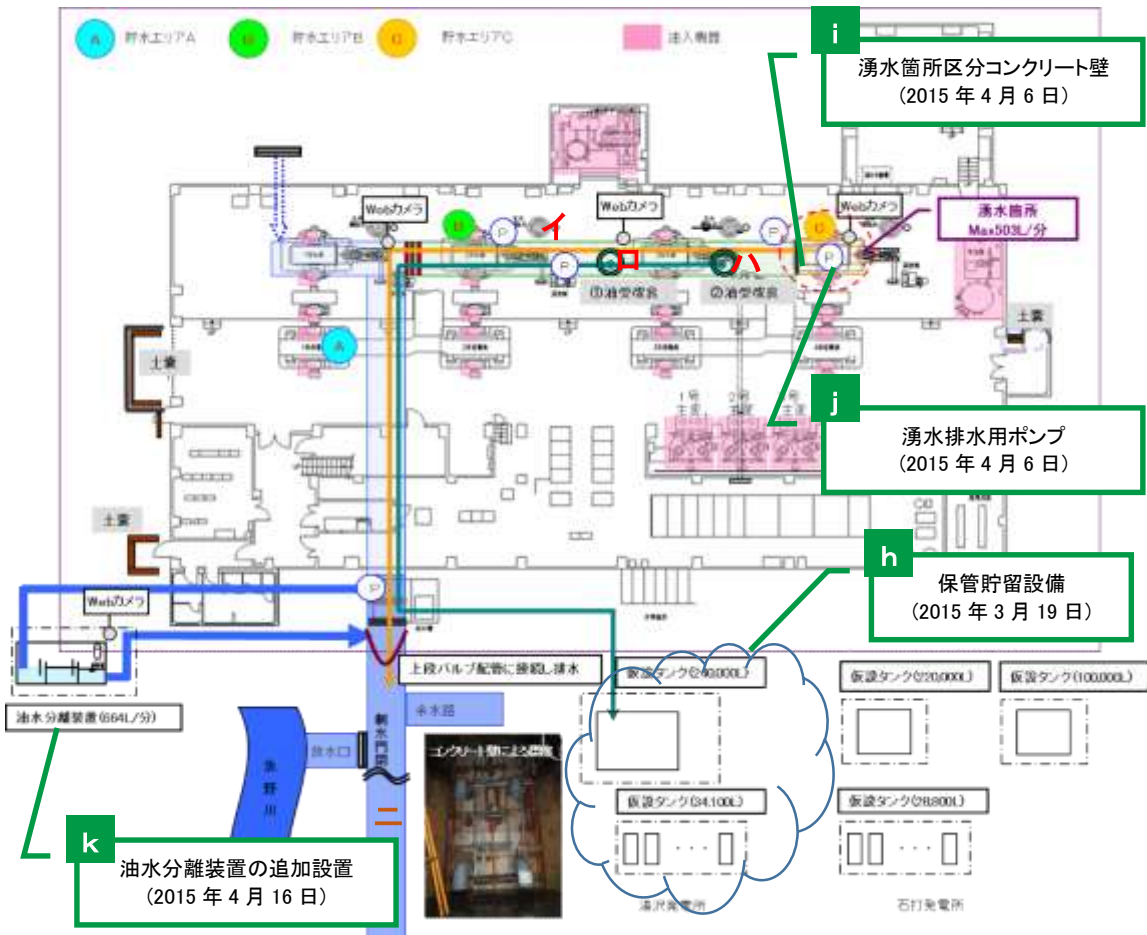


図2-1(3): 油流出防止追加対策状況 (2015年4月16日以降)

b. 漏洩油回収ポイントと回収量(2015年5月27日時点)

表2-1(2):漏洩油回収ポイントと回収量

| No. | 回収位置 | | 回収日 | 回収量 (L) | 性状 |
|-------|------------|---------------------|-----------------------------|-----------|--------------------|
| イ | 湯沢 (発) 放水路 | 防油堤内 | 1月25日 2月16日 4月14日 | 500 | オイルマット重量 (ほぼ油分) |
| | | | 1月28日～5月27日 | 5,217,104 | 油水 (ほぼ水分) |
| ロ | 湯沢 (発) 放水路 | 油受け | 1月13日～5月27日 | 3,989 | 油水 (ほぼ油分) |
| ハ | | 新設油受け | 1月31日～5月27日 | 3,095 | 油水 (ほぼ油分) |
| 計 | | | | 5,224,688 | |
| ニ | 石打 (発) 沈砂池 | オイルフェンス (4月6日撤去) | 1月10日～1月12日 (1月12日以降回収無) | 160 | 油水 (ほぼ水分) |
| | | | | 60 | オイルマット重量 (ほぼ油分) |
| 計 | | | | 220 | |
| ほぼ油分計 | | | | 7,644 | |
| ほぼ水分計 | | | | 5,217,264 | |

3. 事故原因分析

3-1. 原因調査

(1) 除雪運用について

a. 事故発生までの当社除雪計画の決定と決定後の対応状況

除雪の計画については、信濃川電力所豪雪対応マニュアルにて積雪1.5m程度を目安として定め、発電所建屋入口屋根で積雪高さの確認を行っていた。



※発電所建屋入口屋根と窓との間隔が約1.3m程度のため、この積雪高さより屋根の積雪高さを想定(当該の箇所は上部からの落雪がないため)

写真3-1(1):発電所建屋入口屋根(2015年1月11日撮影)

信濃川電力所豪雪対応マニュアルでは、当社社員が3回/日監視カメラにて各発電所の積雪状態を監視し、除雪判断目安相当量に達することが想定される場合には、社員を現地に出向させて目視にて除雪実施要否を判断している。

湯沢発電所においても、1-2 (2) 項記載のとおり、信濃川電力所豪雪対応マニュアルに基づき、除雪実施日を決定した。

除雪実施日を決定・手配した2015年1月5日以降も、監視カメラによる監視は継続しており、降雪による積雪の増加は確認していたが、過去の経験からも1.5m以上の積雪を超過しても十分に耐えられると想定し、手配済みである2015年1月14日からの除雪で対応可能と判断していた。

b. 除雪判断目安(積雪1.5m程度)の根拠

除雪判断目安(積雪1.5m程度)については、2007年2月にマニュアル化したのが、2007年以前から積雪1.5m程度を目安に除雪を実施していた。

過去の経験では、1.5mを超えると雪庇のせり出しや2段ぼりによる著しい除雪作業効率の低下があること、また、作業員が墜落しないよう安全帯を掛けるための親綱が約1.5mの高さに設置していることから、除雪実施の判断目安を1.5m程度に設定していた。

c. 現行建築基準法と照し合わせた時の除雪判断目安の評価

■ 建築基準法規定事項

建築基準法施行令第86条では、特定行政庁は多雪区域の積雪の単位荷重や垂直積雪量を定めることができるとしており、新潟県建築基準法施行細則で、積雪の単位荷重を $29.4\text{N}/\text{cm}\cdot\text{m}^2$ ($3\text{kg}/\text{cm}\cdot\text{m}^2$) 以上、湯沢町の垂直積雪量を340cmと規定しているが、新潟県垂直積雪量運用基準では、雪下ろしによる低減を考慮した場合の垂直積雪量を200cmとして計算することが推奨されている。

■ 建屋屋根の設計積雪荷重

建屋は、東京電燈株式会社が1922年に建設し、日本発送電株式会社を経て、1951年に当社へ引き継がれたものであり、建屋の概要を示した一般的な外観図はあるものの、設計図書や構造計算書がなく、当初の設計に反映した最大荷重は不明のまま、現在まで運用してきた。

■ 除雪判断目安の評価

建築基準法に基づいた建屋の垂直積雪量が200cm（雪下ろしによる低減を考慮した場合）であることを踏まえると、これまでの除雪判断目安1.5m程度は、建築基準法に基づいた垂直積雪量の範囲内であったものの、積雪の単位荷重への配慮がなく、かつ、建屋屋根の設計積雪荷重が不明な状態では、除雪実施基準として十分ではなかった。

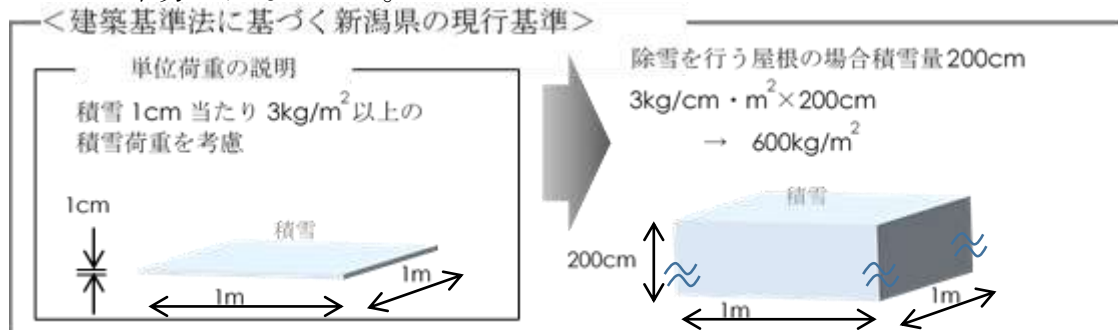


図3-1(1):建築基準法に基づく垂直積雪量

(2) 気象条件について

a. 今年度の気象状況ならびに雪質について

12月は、日本付近に強い寒気が流れ込み、月平均気温は全国的に低く、東日本の日本海側では、曇り、雪、または雨の日が多かった。特に、月最深積雪は、北陸から東北地方で2mを超えるところがあるほか、全国の観測地点（322地点）のうち、北・東日本の14地点で12月の月最深積雪の最大積雪の最大を更新した。

1月上旬は、冬型の気圧配置となる日が多く、特に上旬はじめは強い寒気が南下、全国的に気温が低くなり、日本海側では大雪となった。

（出典：気象庁報道発表資料（12月の天候、1月の天候）より）

新潟県南魚沼郡湯沢町では、2014年12月5日の積雪開始当初から、事故が発生した2015年1月10日にかけて、平年の約2倍にあたる降雪量・積雪量（223cm）を観測していた（図3-1(2), (3)参照）。この観測値は、冬期間全体では2～3年に1回以上発生する規模の積雪量（図3-1(4)参照）だが、12月としては観測史上2005年に次ぐ第二位の積雪量であった（表3-1(1)参照）。

また、積雪が100cmを超えた時期に降雨も観測（2014年12月11日、20日、30日、2015年1月5日）し、密度の高い積雪状態に成りやすい環境だった。

検証のため、湯沢発電所構内の積雪を用いて積雪深さ区分ごとの比重測定を行い、得られた結果を崩落直前の屋根積雪量に換算し、屋根への積雪荷重を想定したところ約750kg/m²となり（表3-1(2)参照）、現行建築基準法にて定められ多雪区域に求められる積雪荷重600kg/m²（雪下ろしによる低減を考慮した値）を上回った。

なお、（独）防災科学技術研究所雪氷防災研究センターの調べ（2015年1月11日 湯沢発電所から200m程度北側の平地）においても、770～800kg/m²（積雪242～245cmのサンプル結果）の積雪荷重が計測されている。

これらの調査から、積雪深だけではなく、単位荷重への配慮が重要であることを確認した。

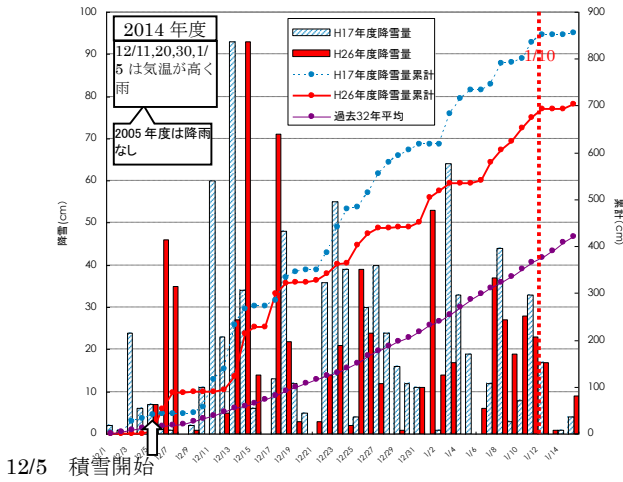


図 3-1(2)：湯沢町の降雪量と降雪累計
(気象庁データ)

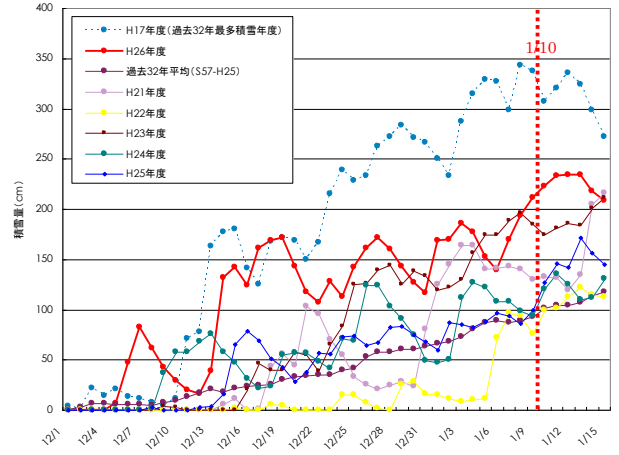


図 3-1(3)：湯沢町の最深積雪量
(気象庁データ)

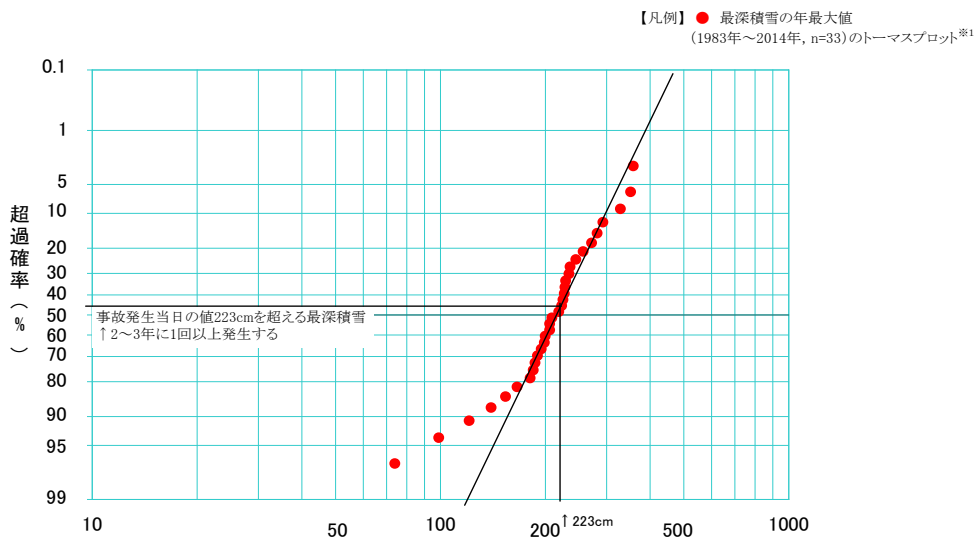


図 3-1(4)：湯沢観測所における最深積雪の年最大値 (単位 cm, 1983 年～2014 年)

※1 トーマスプロット
N個の観測値を大きさの順に並べ、
n番目の値以上の出現確率Wを、
W=n/(N+1)であらわして確率紙にプロットして
再現期間を算出する方法。

表 3-1(1)：【観測史上 1～10 位の値 (12 月)】 (気象庁データ)

| | 1位 | 2位 | 3位 | 4位 | 5位 | 6位 | 7位 | 8位 | 9位 | 10位 | 統計期間 |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|
| 日 降水量 (mm) | 72.0 (2014/12/ 17) | 72.0 (2010/12/ 23) | 62.0 (1989/12/ 15) | 61.0 (2005/12/ 13) | 61.0 (1992/12/ 11) | 60.5 (2010/12/ 22) | 59.0 (2006/12/ 27) | 58.5 (2013/12/ 15) | 56.5 (2014/12/ 14) | 54.0 (2003/12/ 20) | 1976/12 2014/12 |
| 月 降水量 (mm) | 595.0 (2005/12) | 510.5 (2014/12) | 391.5 (2011/12) | 374.0 (1977/12) | 371.0 (1992/12) | 354.0 (1983/12) | 351.0 (1999/12) | 347.0 (2001/12) | 341.5 (2010/12) | 333.5 (2013/12) | 1976/12 2014/12 |
| 積雪差 日合計 (cm) | 93 (2014/12/ 14) | 93 (2005/12/ 13) | 76 (1992/12/ 24) | 71 (2014/12/ 17) | 65 (2000/12/ 26) | 64 (1994/12/ 16) | 62 (2009/12/ 21) | 62 (1991/12/ 29) | 62 (1985/12/ 20) | 60 (2012/12/ 26) | 1982/12 2014/12 |
| 月最深 積雪 (cm) | 283 (2005/12/ 29) | 172 (2014/12/ 27) | 169 (1984/12/ 29) | 144 (2011/12/ 28) | 139 (1983/12/ 27) | 135 (2001/12/ 31) | 124 (2012/12/ 27) | 118 (1985/12/ 21) | 104 (1995/12/ 26) | 103 (2009/12/ 21) | 1982/12 2014/12 |

■ :2005年 ■ :2014年

表 3-1(2) : 湯沢発電所構内の積雪比重測定結果
(当社調べ)

| 測定地上高[m] | 比重[g/cm ³] | 雪の深さ[m] | 1m ² 当たりの荷重[kg/m ²] |
|----------|------------------------|---------|--|
| 2.3 | 0.15 | 0.5 | 75.0 |
| 1.8 | 0.29 | 0.2 | 58.0 |
| 1.6 | 0.22 | 0.3 | 66.0 |
| 1.3 | 0.46 | 0.3 | 138.0 |
| 1.0 | 0.37 | 0.3 | 111.0 |
| 0.7 | 0.43 | 0.7 | 301.0 |
| 合計(平均) | (0.33) | 2.3 | 約750 |

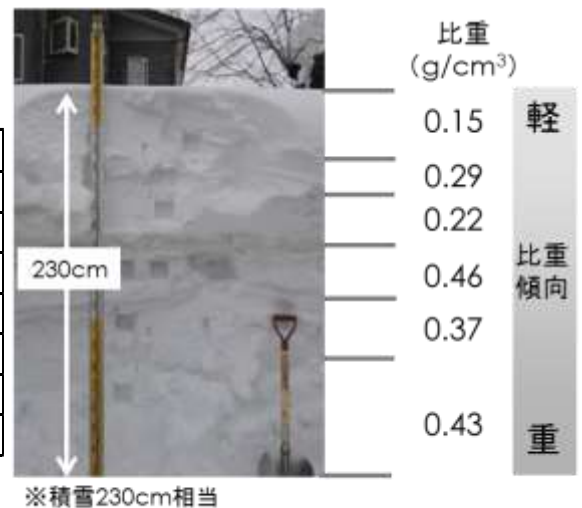


写真3-1(2):湯沢発電所構内の積雪状態

b. 過去の雪質状況および屋根上積雪実績について

気象庁公表データ（統計期間1976年～現在）、および新潟地方気象台保有の新潟県農業気象速報（保有期間1940年～1976年）を基に過去に今冬と同様な積雪状態の経験有無を調査した結果、その期間中に屋根崩落時点と同等の積雪と降雨を経験していたと思われるデータを確認した（表3-1(3)参照）。ただし、屋根への積雪状況については除雪実績等が把握できていないため不明である。

また、屋根除雪実績を可能な限り過去に遡り（2005年～2015年）、気象庁観測の積雪量と除雪タイミングから屋根上の積雪量を想定したところ、崩落時と同等の積雪量（223cm程度）が屋根上にあった可能性を確認した（図3-1(4)参照）が、当該の冬期間における気象庁公表データと突き合わせた結果（表3-1(4)参照）、今冬のように降雨等積雪の単位荷重が増加する気象事象は無かった。

表 3-1(3) : 湯沢町の過去の気象データ

| 抽出期間 | 当該期間の最深積雪 (cm) | 当該期間の降雨日数 | 当該期間の降雨合計 (mm) |
|------------------|----------------|-----------|----------------|
| 1970年12月～1971年2月 | 355 | 4 | 39.0 |
| 2014年12月～2015年1月 | 223 | 4 | 36.5 |



図 3-1(4) : 2005 年以降における湯沢発電所建屋積雪状況想定

表 3-1(4) : 2005 年以降における湯沢発電所建屋積雪状況想定に対する降雨実績

| 抽出期間 | 当該期間の最深積雪 (cm) | 当該期間の降雨日数 | 当該期間の降雨合計 (mm) |
|----------------------------|----------------|-----------|----------------|
| 2009 年 12 月 ~2010 年 1 月 | 229 | 1 | 2 |
| 2011 年 12 月 ~2012 年 2 月 | 293 | 0 | 0 |
| 2014 年 12 月 ~2015 年 1 月 | 223 | 4 | 36.5 |

(3) 崩落屋根上の積雪実態について

崩落屋根の除雪経験者から、過去における屋根上の積雪実態を聞き取り、崩落事故前の状態を想定した。

過去の除雪時の写真から、除雪基準としている1.5m程度の積雪がある場合、切妻屋根から平屋根の換気塔付近までは、雪の吹き溜まりによって、ほぼ平らな状態で積雪している。換気塔から平屋根の端までは、ほぼ自然積雪状態であった。

従って、切妻屋根から平屋根への落雪は無いものと考えられる。

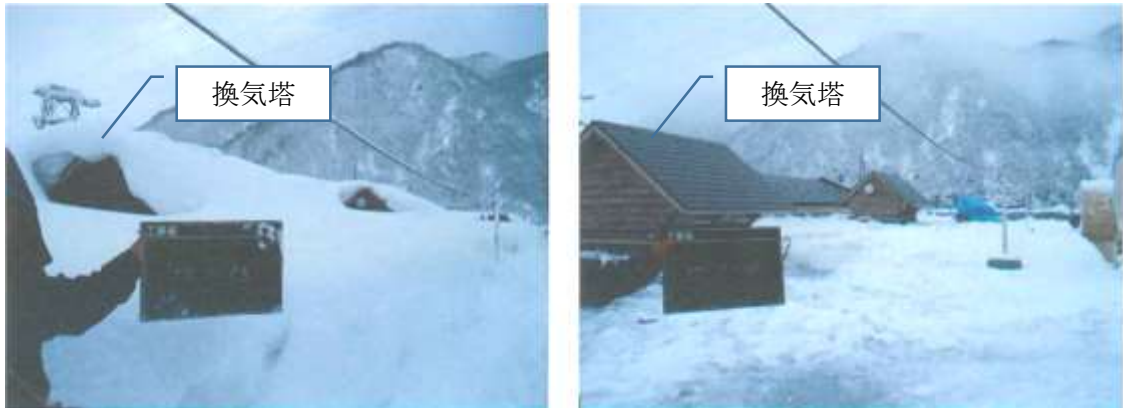


写真3-1(3) : 2005年除雪時の様子 (左 : 除雪前 右 : 除雪後 2005年1月撮影)

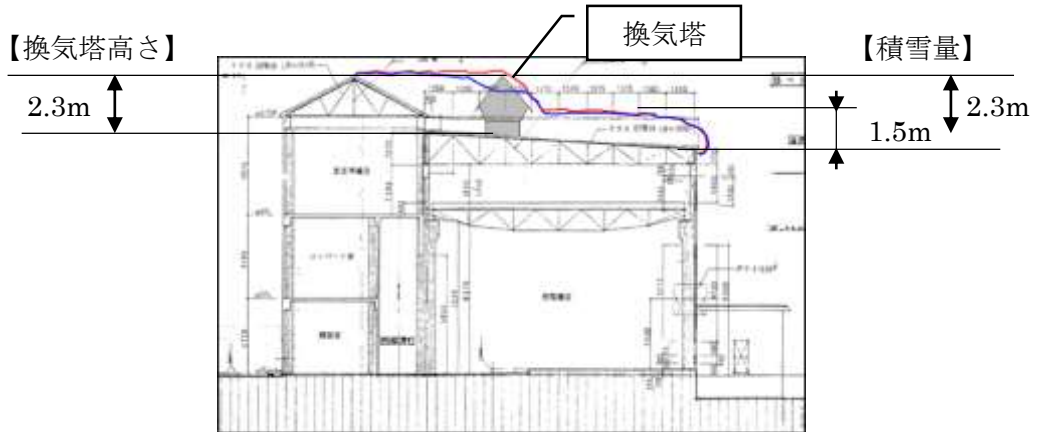


図 3-1(5) : 建屋断面図

(赤線が換気塔部、青線が換気塔の影響を受けない部分の想定積雪状況)

(4) 屋根構造について

湯沢発電所建屋は発電機室と変圧器室から構成されている。それぞれ鉄骨トラス*（以下、トラス）の架構上に屋根が設置されており、変圧器室部は切妻屋根*、発電機室部は緩勾配を有する平屋根形式である（図 3-1(6)左参照）。また、参考に模型により湯沢発電所を再現した（写真 3-1(1)参照）。

屋根が崩落した発電機室は、建屋の南北に渡されたトラスが 22 本設置されている（図 3-1(6)右参照）。トラスは、上弦材、下弦材、束材、斜材から構成されており、各材の節点はガセットプレートを通じてリベット*で接合されている。トラス端部は変圧器室側と南側壁面にある鉄筋コンクリート梁の上面にアンカーを介して設置されている（図 3-1(7)参照）。また、各トラス間はずなぎ斜材とつながり水平材で連結されている（図 3-1(8)参照）。

※注釈

トラス

- ・三角形を基本単位としてその集合体で構成する構造形式

切妻屋根

- ・山形に 2 面で構成した屋根

リベット

- ・頭部のある金属棒で接合部に穴を開けて挿し込み、余った端をつぶして金属板や鋼材などをつなぎ合わせる鉄

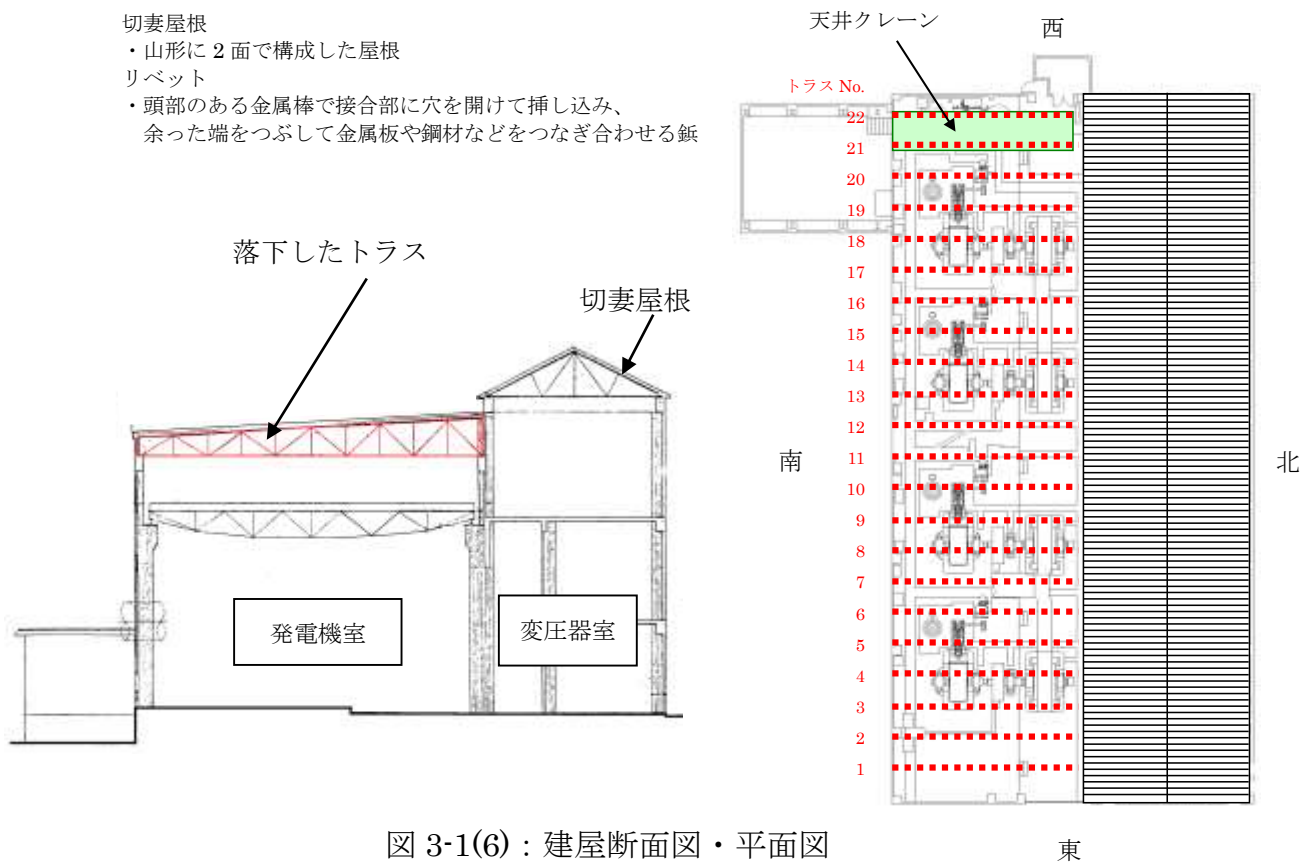


図 3-1(6) : 建屋断面図・平面図



全景



発電機室 (東面より内部)



内部より屋根トラス南面を見上げた写真

写真 3-1(1) : 模型による湯沢発電所建屋の再現

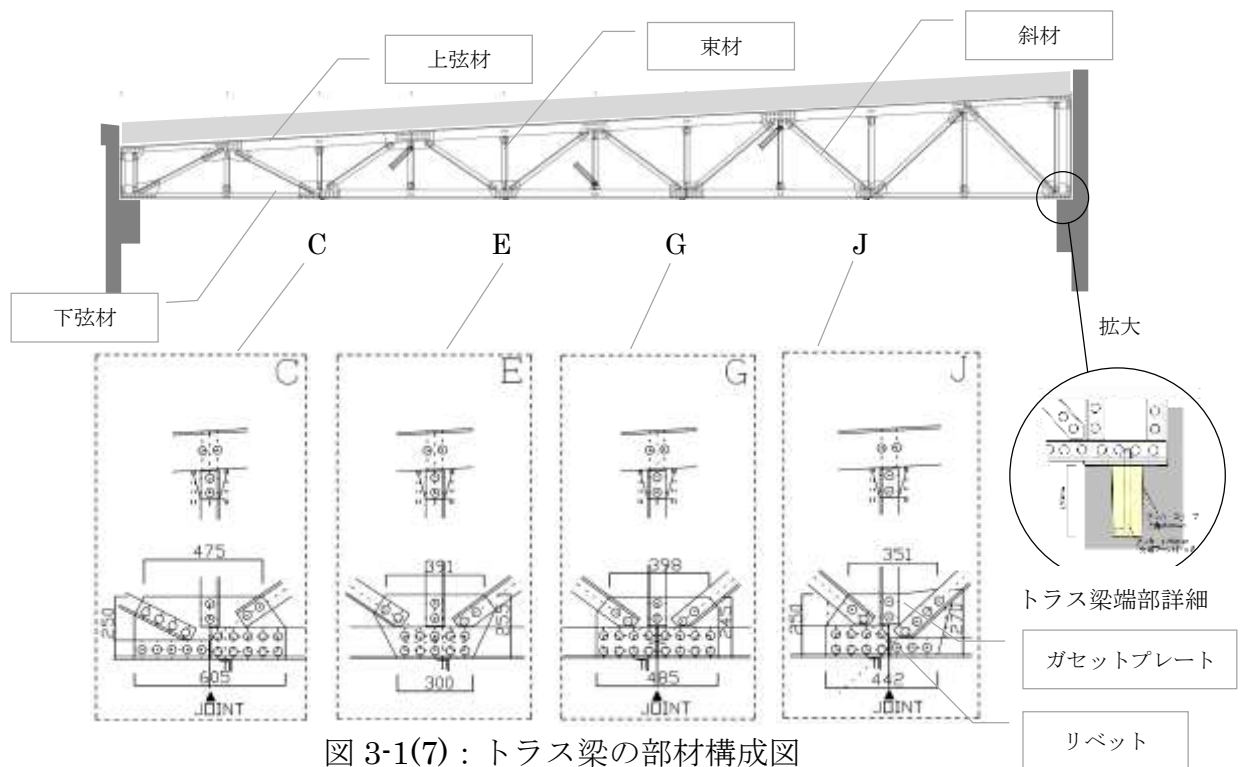


図 3-1(7) : トラス梁の部材構成図

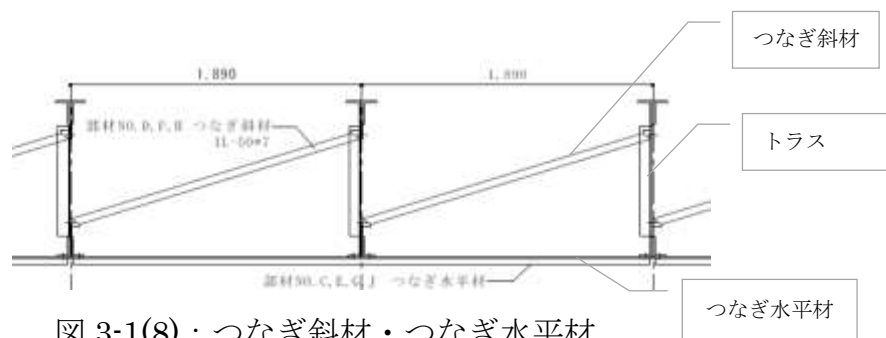


図 3-1(8) : つなぎ斜材・つなぎ水平材

トラス上部の屋根スラブコンクリート（以下、屋根スラブ）は、①キーストンププレートと呼ばれる波形の鉄板、②1層目屋根スラブ（内部に鉄筋なし）、③2層目屋根スラブ（内部に鉄筋あり）、④仕上げコンクリート（内部に鉄筋あり）の順で複数の層から構成される。②、③間と③、④間及び④の上面には防水層が施工されている（図 3-1(9)参照）。

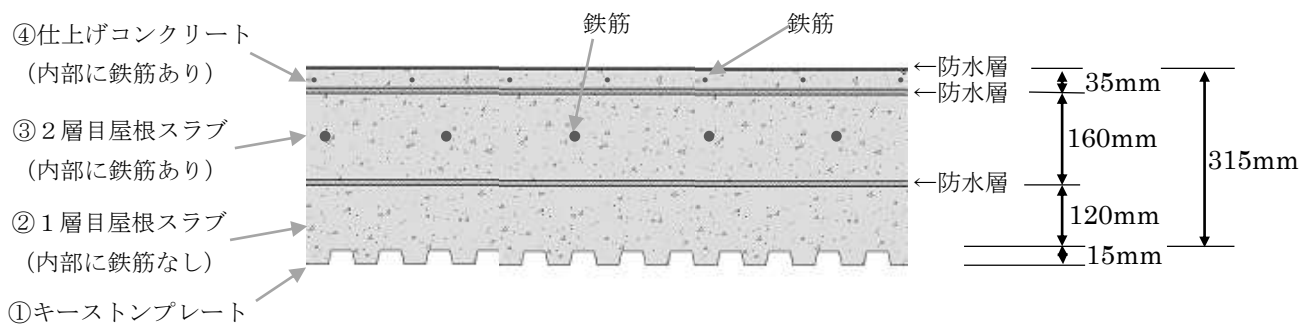


図 3-1(9) : 屋根スラブ断面図

トラス上弦材とキーストンプレートとの接合についてはプレート1枚あたり4箇所
でフックにより留められている（図 3-1(10)、写真 3-1(2)参照）。

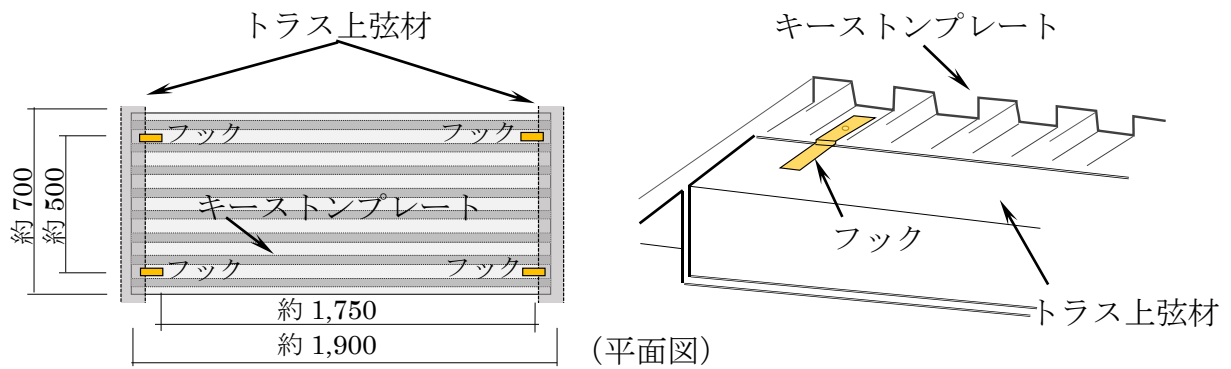


図 3-1(10)：キーストンプレートとトラス上弦材の収まり



落下したキーストンプレート全体写真



フック写真

写真 3-1(2)：キーストンプレート（2015年3月撮影）

参考として屋根崩落前発電機室内、屋上の状況を以下に示す（写真 3-1(3)参照）。



発電機室内観（南面）



発電機室内観（北面）



トラス梁



屋上

写真 3-1(3)：屋根崩落前の状況（2014年11月撮影）

(5) 屋根崩落の状況調査結果

a. 崩落屋根の全体状況

発電機室上部の屋根スラブが室内に落下した状況を写真 3-1(4)に示す。落下以降の降雪により崩落屋根スラブ上部の積雪深は更に増している。

調査に際しては、除雪と並行して落下した屋根スラブを撤去しながらトラスを露出させて落下位置や破損状況の確認を行った（写真 3-1(5)左参照）。

トラスは元の設置位置のほぼ真下、一部は北側の壁にもたれかかるような状況であり、構成材には大きな変形、破断等が認められた（写真 3-1(5)右参照）。



写真 3-1(4)：屋根落下状況（2015年2月撮影）



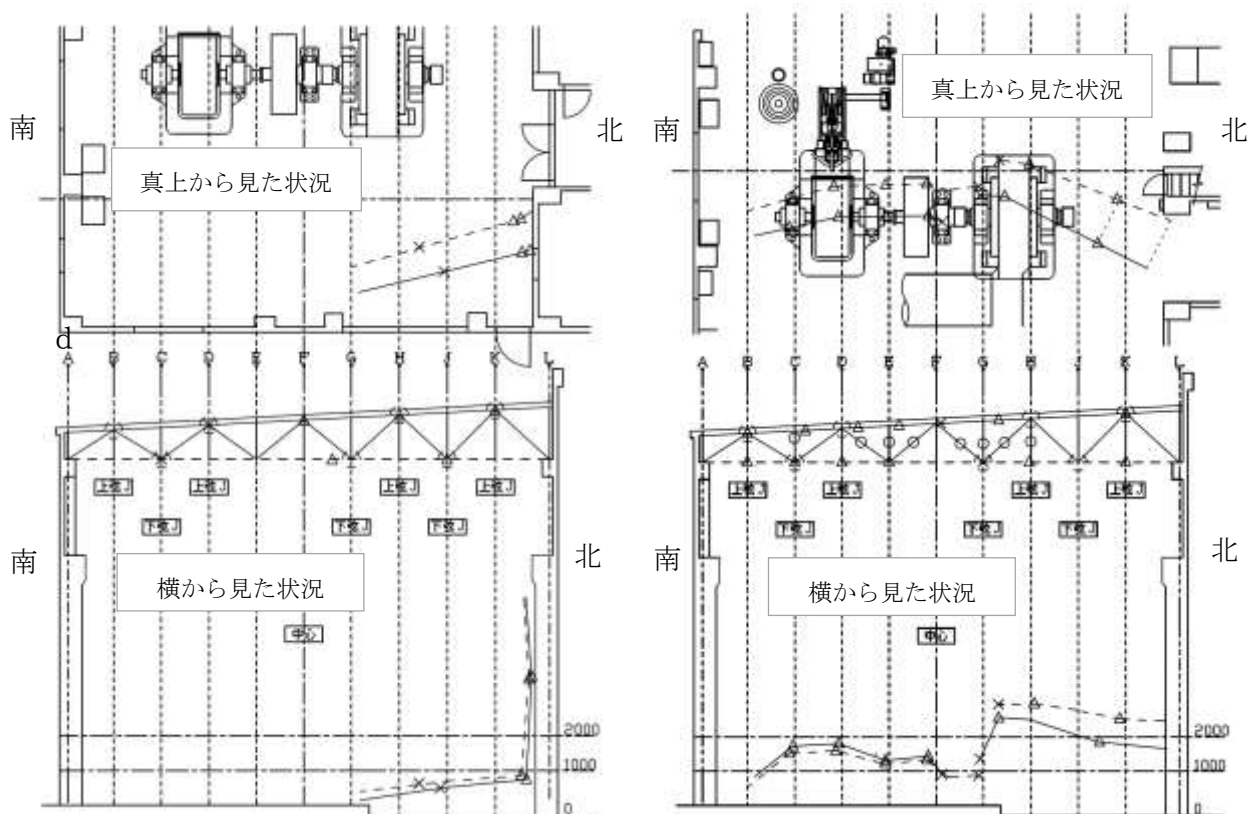
写真 3-1(5)：瓦礫撤去作業の様子（2015年3月撮影）

b. トラスの落下状況

トラス落下位置状況図(図 3-1(12)参照)、トラス破損箇所(図 3-1(13)参照)を示す。トラス No.1~7、15~20 は北寄りに落下し、特に、トラス No.1~5 については壁にもたれかかるように落下していることが確認された(図 3-1(11)参照)。トラス No.8~14 は、ほぼ真下に落下していることが確認された(図 3-1(11)参照)。トラス No.9~12 については、下部の水車発電機と衝突したことを考慮しても、他のトラスの破損度合いと比較するとやや激しい破損状態であった(写真 3-1(6)⑥、図 3-1(11)、図 3-1(13)参照)。トラス No.21,22 は、天井クレーン上に落下していることが確認された。

トラスの構成部材には曲がり(写真 3-1(6)①、②、③参照)、破断が認められたが、下弦材の接合部にあたるガセットプレートには共通して破断が認められた(写真 3-1(6)④、⑤参照)。

なお、部材の破損を崩落直前、崩落過程、落下時のいずれにどのように生じたか判別することは困難であったため、トラスの破損状況、落下位置、破損部位の詳細確認及び残存躯体の破損状況等の調査を通じて崩落原因を考察するものとした。



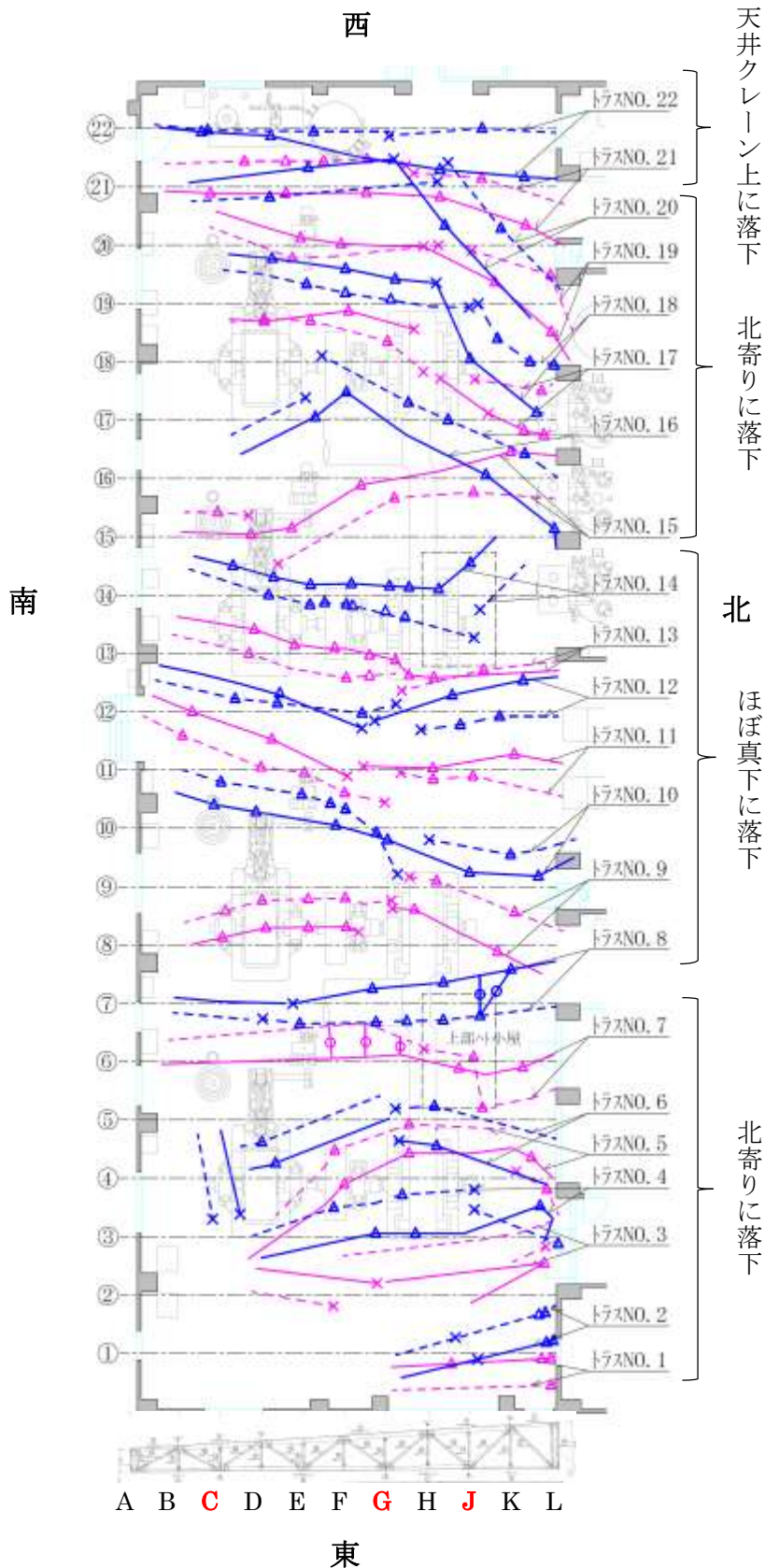
トラス NO.2

トラス NO.9

凡例 実線：上弦材 点線：下弦材

○：斜材・束材の曲がり △：上弦材・下弦材の曲がり ×：破断

図 3-1(11)：トラスの落下状況図



| ガセットプレートの破断箇所 | | | |
|---------------|----|----|---|
| トラス No. | 通り | | |
| | C | G | J |
| 22 | | × | |
| 21 | | × | |
| 20 | | × | |
| 19 | | × | |
| 18 | | × | |
| 17 | | × | |
| 16 | × | | |
| 15 | × | | |
| 14 | | | × |
| 13 | | ×※ | |
| 12 | | × | |
| 11 | | × | |
| 10 | | × | |
| 9 | | × | |
| 8 | ×※ | | |
| 7 | | × | |
| 6 | × | × | |
| 5 | | | × |
| 4 | | × | |
| 3 | × | | × |
| 2 | × | | |
| 1 | × | | |

※：ガセットプレート破断面の調査箇所

- 凡例 実線：上弦材 点線：下弦材
 ○：斜材・束材の曲がり △：上弦材・下弦材の曲がり ×：破断

図 3-1(12)：トラス落下位置状況図

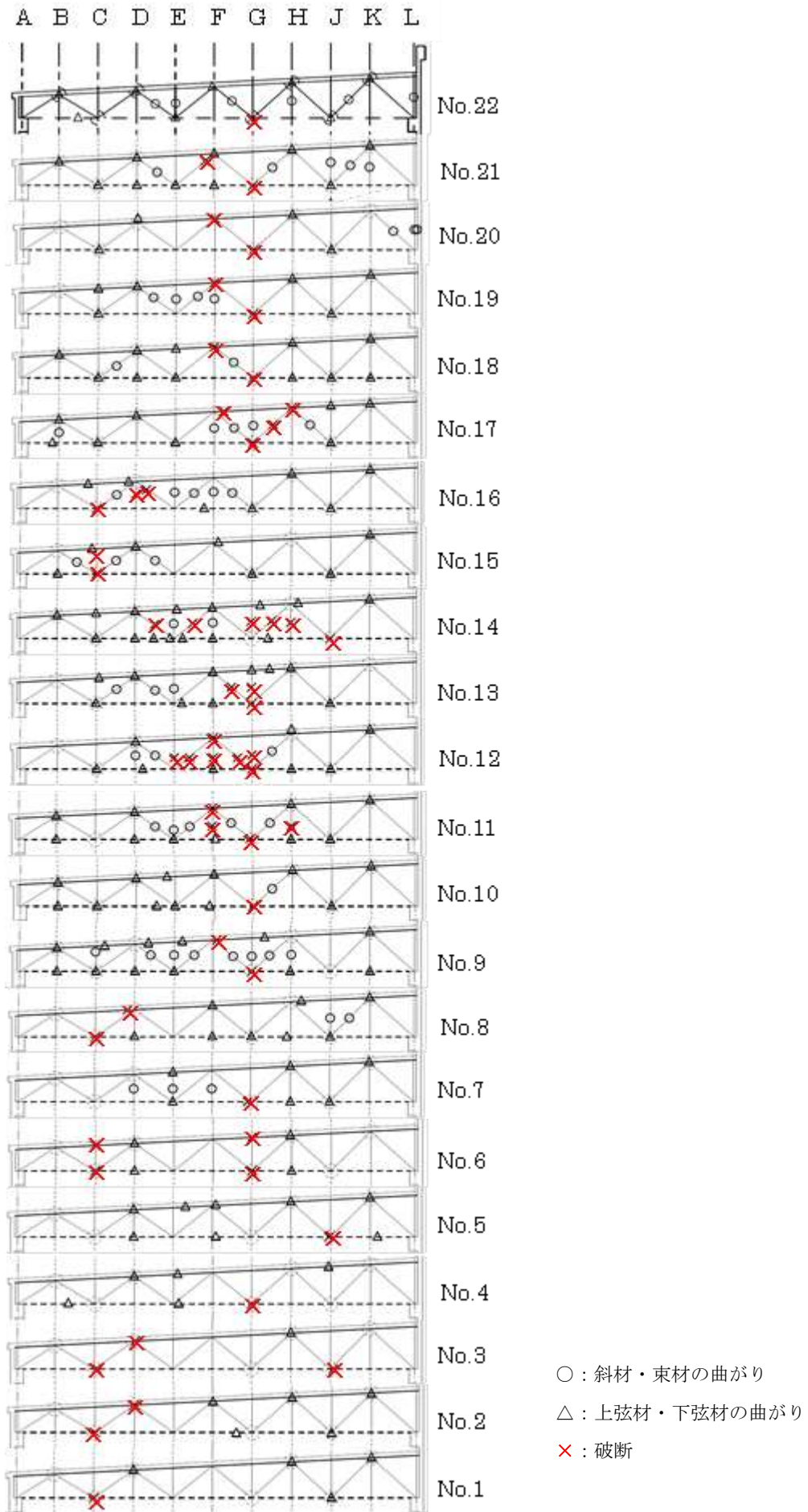


図 3-1 (13) : トラス破損箇所



斜材の曲り①(2015年4月撮影)



束材の曲り②(2015年4月撮影)



下弦材の曲がり③(2015年4月撮影)



下弦材のガセットプレートの破断④
(2015年4月撮影)



ガセットプレート取り外し後⑤(2015年4月撮影)



トラス梁の全景⑥(2015年4月撮影)

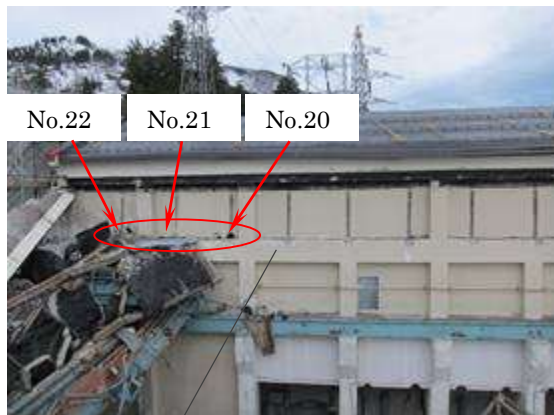
写真 3-1(6) : 崩落したトラスの破損状況

c. トラス支承部における破損状況

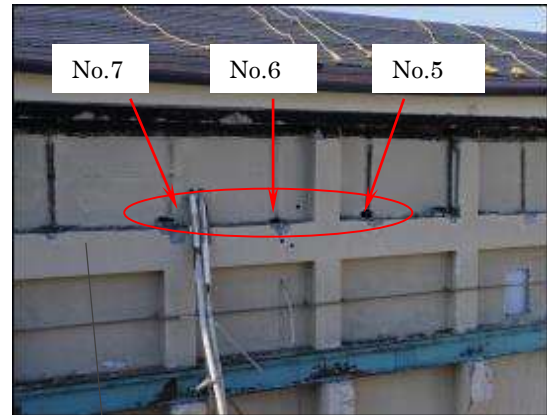
トラス No.5～7 およびトラス No.20～22 のトラス支承部においては、変圧器室の壁に、押し抜くような力が作用したとみられる破損が確認された（写真 3-1(7)参照）。破損部はトラス下弦材位置であり、トラスが落下する際に生じたものと推測される。

なお、トラス支承部は、建屋躯体上部の鉄筋コンクリート梁（以下、鉄筋コンクリート梁）の上に設置されていた。トラス崩落後の鉄筋コンクリート梁上の調査により、直径 8cm、深さ 20 cm程度の穴が設けられ（写真 3-1(8)参照）、そこにアンカーボルトが差し込まれていたことを確認した（写真 3-1(9)参照）。

構造的な観点からは常時は屋根の自重で安定していたと考えられ、トラス支承部は鉛直力のみ負担する設計思想だったと推測される。



トラスNo.20～22（2015年4月撮影）



トラスNo.5～7（2015年4月撮影）



トラスNo.20～22（2015年2月撮影）



トラスNo.5～7（2015年2月撮影）

写真 3-1(7)：変圧器室の壁の破損状況



鉄筋コンクリート梁上に設けられたアンカー穴 アンカー穴詳細（トラスNo.20）
 写真 3-1(8)：トラス支承部のアンカーボルトが差し込まれていた穴(2015年4月撮影)



トラス支承部のアンカーボルト アンカーボルト詳細（落下時に変形）
 写真 3-1(9)：トラス支承部のアンカーボルト破損状況(2015年2月撮影)

d. 崩落屋根スラブと躯体との接合状況について

崩落屋根と残存する躯体（周辺壁）との取り合いについて調査を行ったところ、トラス上の屋根スラブは南側の壁を除き、東西方向及び北側（変圧器室側）の躯体との間に鉄筋で定着を取った痕跡は認められなかった。なお、南側の壁は中央寄りの鉄筋コンクリート梁から上部は屋根崩落時に一斉に引き倒されている(写真 3-1(10)参照)ものの、東西寄りの壁は残存している。



写真 3-1(10)：鉄筋コンクリート梁より上部の壁の破損状況(2015年2月撮影)

(6) トラス構成材等の材料試験について

a. トラス構成材

崩落トラスの各構成材の健全な部分を採取し、降伏強度*、最大強度*及び伸び能力（突合せ伸び*）を確認するものとした。また、併せて成分分析も実施している。

試験の結果、試験体によるバラつきはあるものの例えば主要構成材の一つである上弦材（長 150mm×高 90mm×厚 9mm）、下弦材（長 125mm×高 75mm×厚 10mm）の降伏強度（平均値）はそれぞれ 290N/mm²、330N/mm²であり、構造解析の際、設定した一般構造用炭素鋼(SS400*)の 235N/mm²よりも大きい、また最大強度もそれぞれ 445N/mm²、483N/mm²であり、SS400 の下限の 400N/mm²よりも大きい。

伸び能力についてもいずれも 30%程度を超えており、SS400 で定められている 21%以上の値よりも大きい結果となった（表 3-1(1)参照）。

成分分析結果からは崩落要因になり得る要素は特に認められなかった。今回、破断が認められたガセットプレートも同様の結果であった。

表 3-1(1)：トラス構成部材試験結果一覧

| 試料 | 鋼材寸法 | 測定値 | | |
|------------|---------|-------------------------------|-------------------------------|-----------|
| | | 降伏強度の平均値 (N/mm ²) | 最大強度の平均値 (N/mm ²) | 突合せ伸び (%) |
| 上弦材 | L90×90 | 271 | 398 | 40.3～40.9 |
| | L150×90 | 290 | 445 | 27.1～42.2 |
| 下弦材 | L75×75 | 264 | 416 | 31.6～38.8 |
| | L125×75 | 330 | 483 | 30.3～37.4 |
| 束材 | L75×75 | 255 | 395 | 36.7～39.4 |
| 斜材 | L75×75 | 283 | 472 | 33.7～35.8 |
| ガセットプレート | — | 295 | 467 | 32.8～37.2 |
| SS400 (参考) | — | 235 | 400 | 21.0 以上 |

※SS400 は参考値：鋼材の厚さ 16 を超え 40 以下の場合

※注釈

降伏強度

- ・鋼材を引っ張った時、変形量が力に比例しなくなる時の強度（右図 A）

最大強度

- ・降伏強度を超えると急に伸び、やがてピークを迎えたあとに破断する。このピーク時の強度（右図 B）

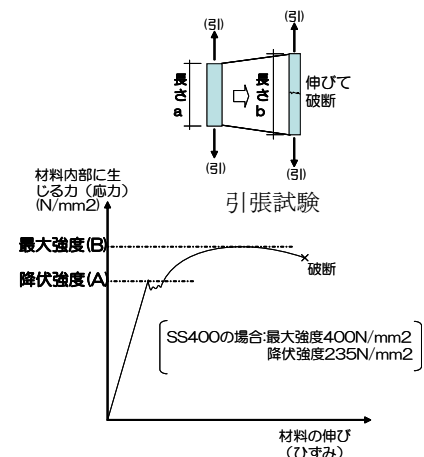
突合せ伸び

- ・右図の引張試験により、鋼材の柔らかさ（伸びやすさ）を表す指標

$$\text{伸び}(\%) = (b-a) / a \times 100$$

SS400（一般構造用圧延鋼材）

- ・日本工業規格における鋼材の規格（鉄鋼材料の中でも代表的な存在）



b. ガセットプレート破断面の調査

トラス下弦材接合部で破断が認められたガセットプレート 2 検体（トラス No.8 の C 通りおよびトラス No.13 の G 通り）を対象に破断の原因を解明するため、破面の詳細調査を実施した。

調査対象は後述する構造検討（表 3-2(1)参照）において部材に生じる応力^{*}が大きい箇所から選定した。

調査の結果、2 検体のいずれも延性破壊^{*}及び脆性破壊^{*}の形態が認められた。

トラス No.13 下弦材ガセットプレート（G 通り）の調査結果を写真 3-1(11)に示す。

破断の進展方向を矢印で示しているが、部位 5、6 間のリベット穴を起点として上下方向に破断が進展していることを確認した(写真 3-1(11) (イ) 参照)。

部位 6 の破断面を拡大したものを写真 3-1(11) (ロ) に示す。写真中の A より延性破壊による破断が発生、進行し、有効面積の減少から、強度が低下し、負荷された荷重に耐えきれず、速い割れの伝播による脆性破壊により写真中 B が一気に破断したものと推測される。

なお、疲労破壊^{*}の特徴である縞模様のパターンは見られず、長年の繰返し荷重による経年劣化は認められなかった。

※注釈

応力

- ・外力の作用に応じて部材内部に生ずる単位面積当たりの力

延性破壊

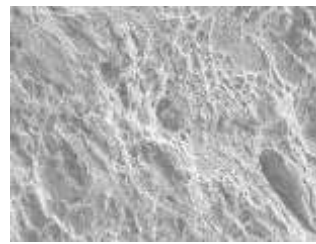
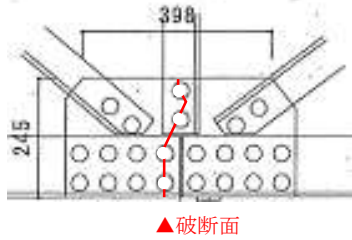
- ・破壊に至るまでに大きく変形したあと伸びを伴って破断する現象

脆性破壊

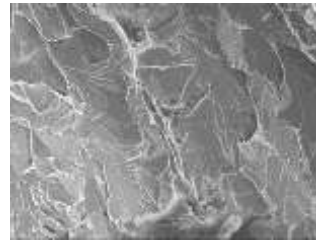
- ・破壊に至るまでに目にみえる変形をほとんど伴わず突然破断する現象

疲労破壊

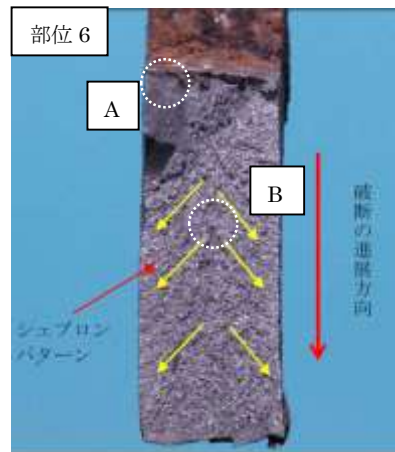
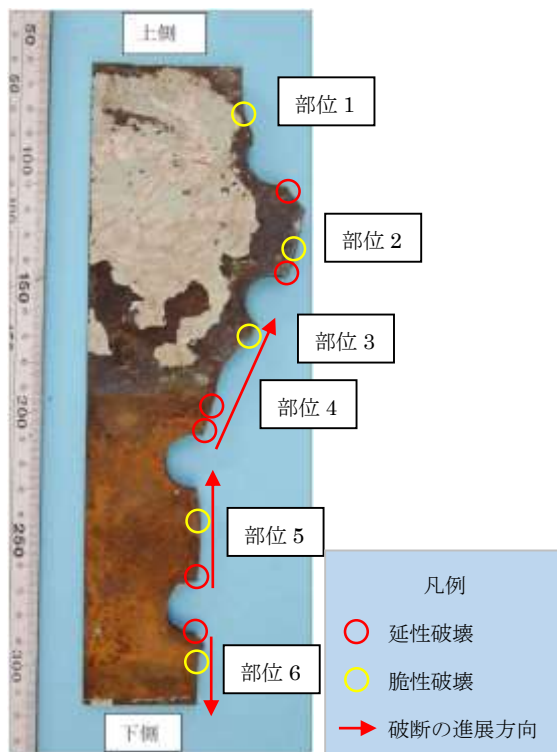
- ・繰返し荷重による変形によって、材料内に生じた微少な亀裂が進展して破断する現象



A 破面起点部は延性破壊の特徴であるディンプルパターン（空孔が連結した痕跡）を確認。



B 破面中央部は脆性破壊の特徴であるリバーパターン（川状の模様）を確認。



(イ)

(ロ)

写真 3-1(11) : トラスNo.13 下弦材ガセットプレート (G通り) の調査結果

c. 躯体コンクリート

1996年にコンクリート強度を確認しているため、比較のため採取位置（建屋1階）近傍の強度と中性化*深さを確認するものとした。また、トラス支承部近傍のコンクリート強度、中性化深さも合わせて確認した。

過去の試験結果との比較において、1996年に実施したコンクリート強度の平均17.7N/mm²に対して、今回実施したコンクリート強度の平均は24.5N/mm²であり、強度低下は特に認められず、現行の基準と比較しても同程度の強度を有していた。また、中性化は進行しているものの、躯体表面の劣化や鉄筋の錆などの異状は特に認められなかった（表3-1(2)参照）。

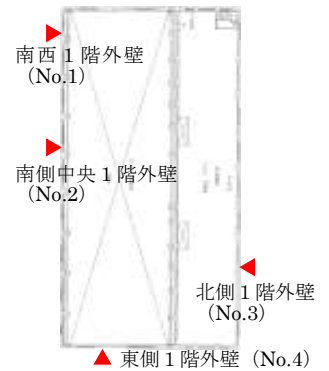
またトラス支承部近傍においては強度の平均が梁部で17.8N/mm²、梁上部の立上り壁で17.2N/mm²であり、強度や劣化の観点からは特に問題ない結果であった（表3-1(3)参照）。

表 3-1(2)：コンクリート強度試験結果一覧（1996年との比較）

| | 強度 (N/mm ²) | | 中性化深さ 平均値(mm) | |
|------|----------------------------|-------|------------------|-------------|
| | 1996年 | 2015年 | 1996年 | 2015年 |
| No.1 | 24.2 | 26.2 | 9.0 (15.0) | 14.6 (24.0) |
| No.2 | 24.2 | 20.6 | 19.0 (21.0) | 48.4 (55.0) |
| No.3 | 9.2* | 28.6 | 5.5 (10.0) | 42.9 (48.0) |
| No.4 | 13.2 | 22.6 | 33.0 (35.0) | 53.6 (60.0) |
| 平均値 | 17.7 | 24.5 | 16.6 (20.3) | 39.9 (46.8) |

参考：表中()内は最大値

※No.3の強度が他と比べて低いのは施工当時の品質のばらつきによるものと考えられる

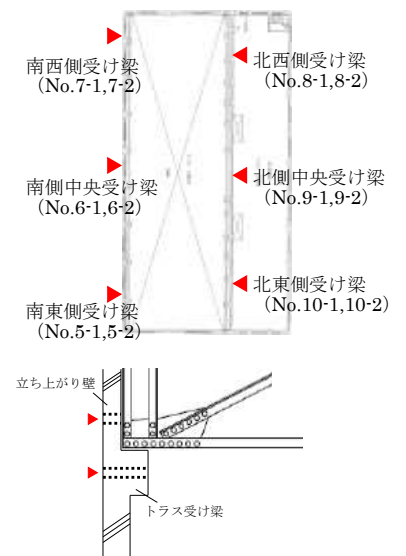


図：▲供試体採取箇所

表 3-1(3)：コンクリート強度試験結果一覧（鉄筋コンクリート梁近傍の調査）

| 受け梁 | 強度 (N/mm ²) | 中性化深さ 平均値(mm) | 立上り壁 | 強度 (N/mm ²) | 中性化深さ 平均値(mm) |
|---------|----------------------------|------------------|---------|----------------------------|------------------|
| No.5-1 | 17.9 | 7.3 (19.0) | No.5-2 | 17.3 | 21.1 (31.0) |
| No.6-1 | 12.6 | 10.9 (17.0) | No.6-2 | 15.4 | 3.5 (18.0) |
| No.7-1 | 20.1 | 9.8 (23.0) | No.7-2 | 13.5 | 1.6 (10.0) |
| No.8-1 | 19.0 | 11.4 (19.0) | No.8-2 | 13.4 | 18.4 (53.0) |
| No.9-1 | 19.6 | 15.1 (25.0) | No.9-2 | 29.3 | 32.5 (37.0) |
| No.10-1 | 17.7 | 24.1 (29.0) | No.10-2 | 14.3 | 9.1 (11.0) |
| 平均値 | 17.8 | — | 平均値 | 17.2 | — |

参考：表中()内は最大値



図：▲供試体採取箇所

※注釈

中性化

- ・健全なコンクリート（強アルカリ性）が、長い年月をかけ空気中の炭酸ガスと徐々に反応しアルカリ性を失っていく現象

d. 屋根スラブ

屋根スラブの断面図を図3-1(14)に示す。トラスの負担荷重の精度を確保する目的で1層目屋根スラブと2層目屋根スラブの部分それぞれについて比重を測定した。

各層の比重測定結果を表3-1(4)に示す。

1層目屋根スラブの比重は平均で22.6kN/m³、2層目屋根スラブの比重は平均で23.5kN/m³であった。

なお、1層目屋根スラブと2層目屋根スラブの間にはアスファルト防水層が存在すること、および屋根スラブ各層の比重が異なることから、新築後に何らかの理由により2層目屋根スラブが追加的に施工されたものと考えられる（2層目屋根スラブの施工記録は、当社の保全履歴からは確認されなかった）。

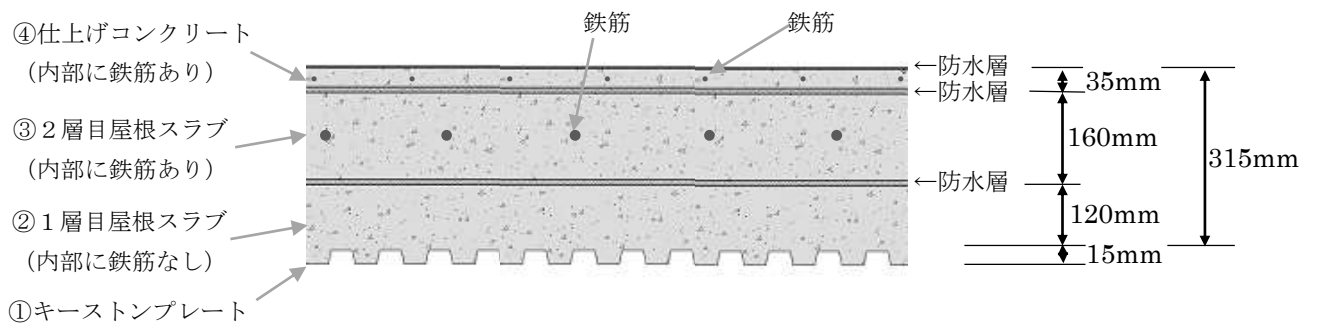


図3-1(14)：屋根スラブの断面

表3-1(4)：1層目、2層目の屋根スラブの比重測定結果

| | 比重(kN/m ³) | |
|-----|------------------------|----------|
| | 1層目屋根スラブ | 2層目屋根スラブ |
| 試料1 | 22.3 | 23.5 |
| 試料2 | 22.5 | 23.5 |
| 試料3 | 22.9 | 23.4 |
| 平均 | 22.6 | 23.5 |

3-2. 原因分析

(1) 建設当時の基準・規定について

湯沢発電所は東京電燈株式会社が1922年(大正11年)に建設し、日本発送電株式会社を経て1951年(昭和26年)に当社へ引き継がれたものであり、原構造計算書は保管されていない。

そのため、設計意図や設計時における各種設定条件、積雪荷重並びにその他外力や使用材料の強度及び設計手法が不明であり、原設計の内容を確認することは出来ていない。

当時の基準・規定に関して言えば、1920年(大正9年)11月9日、内務省令第37号として「市街地建築物法施行規則」(以下、施行規則という)が公布された。適用区域は東京、大阪、京都、名古屋、神戸、横浜の6都市である。

施行規則は全149条と付則から成り立っており、第3章第2節に構造規定が定められている。荷重に関わる定めについては材料の重量(固定荷重)と床の動荷重(積載荷重)という鉛直荷重のみが定められており、積雪荷重に関わる具体的な値は示されていない。

(2) 崩落当時の推測される積雪荷重に対するトラス構成部材の耐力について

a. 構造検討の概要

屋根崩落時点での積雪状況より推測される積雪荷重に対するトラス構成部材の耐力[※]について検討を行った。

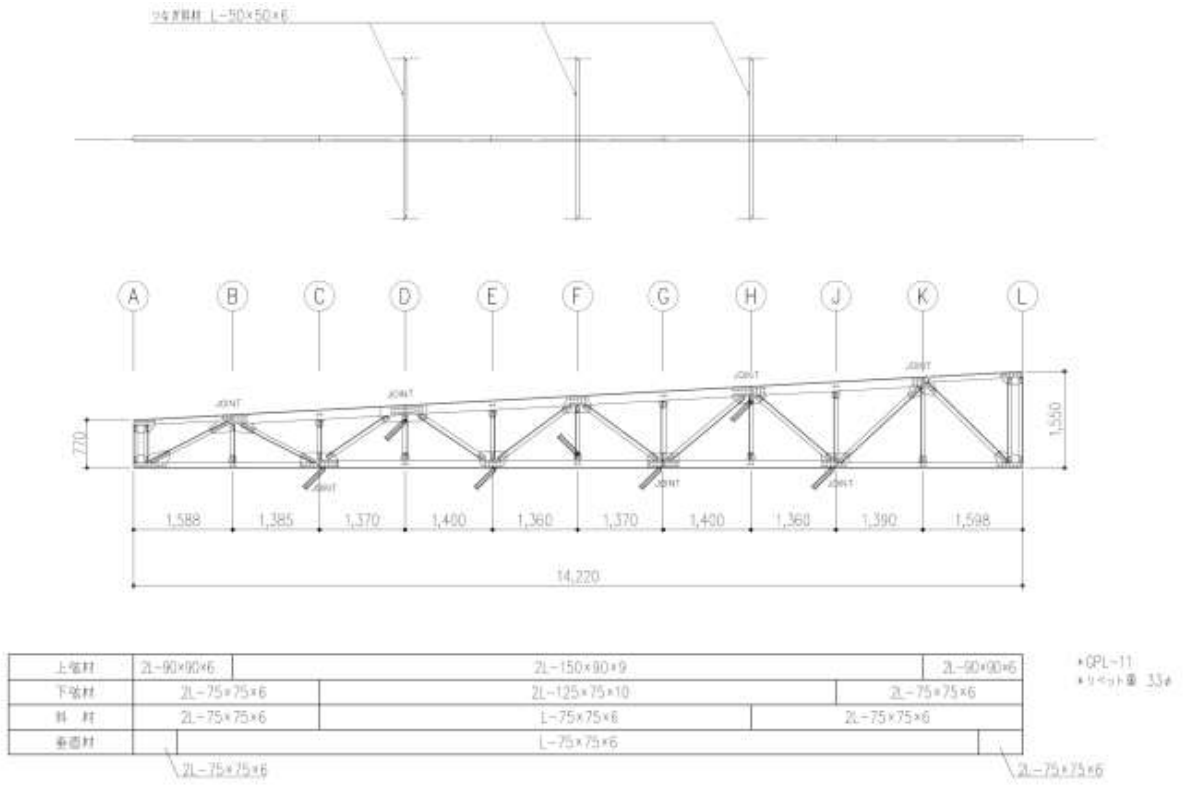
検討に際しては、設計時は積雪等に対しての明確な構造設計手法が確立されていなかったと推測されるため、現行の「鋼構造設計指針」(日本建築学会)に準拠することとした。

トラスの仕様をモデル化して検討を行った(図3-2(1)参照)。

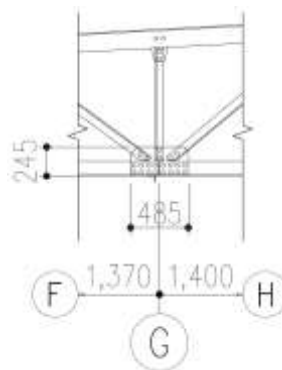
※注釈

耐力

・ 構造物が荷重に対して耐えうる応力、変形の限界



全体図



接合部詳細図

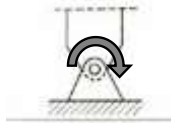
図 3-2(1) : トラスの仕様

b. 構造検討条件

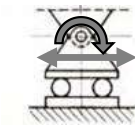
主な検討条件を以下に示す。

■ トラスのモデル化

- ・ トラスを線材としてモデル化
- ・ 端部の固定条件はローラー支持(一端はピン支持)



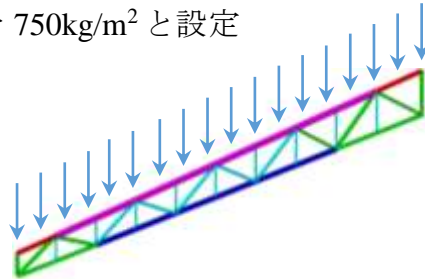
ピン支持



ローラー支持

■ 検討用の荷重

- ・ 屋根の固定荷重（屋根スラブ含む）と積雪荷重を等分布荷重として載荷
- ・ 屋根スラブの荷重は比重試験から設定
- ・ 積雪荷重は 2015 年 1 月 14 日に現地敷地内で測定した実測値（積雪深 230cm、比重 0.33g/cm^3 ）より積雪荷重を 750kg/m^2 と設定



■ 鉄骨部材（圧縮材）の座屈長さ

- ・ 斜材の座屈長さ(l_k)は「鋼構造座屈設計指針」（日本建築学会）を参照して、面外方向の座屈を考慮した節点間距離として設定
- ・ 上弦材の座屈長さはつなぎ斜材の間隔として設定

■ 鉄骨部材の耐力*

- ・ 部材特性は SS400 相当として設定
- ・ 引張材の耐力は引張試験による降伏強度から設定
- ・ 圧縮材の座屈耐力は「鋼構造座屈設計指針」の曲げ座屈耐力として設定
(ただし、座屈に対する安全率は 1.0)

■ トラスを構成する部材の検定

- ・ 部材及びリベットは、トラスの各部材の応力*が最大となる部分で検討
- ・ 下弦材のガセットプレートは、応力が最大となる部分で検討
- ・ 部材の耐力は、F 値（鋼構造設計規準による規定値）により算出した耐力と引張試験による降伏強度の平均値により算出した耐力を採用

※注釈

耐力

- ・ 構造物が荷重に対して耐えうる応力、変形の限界

応力

- ・ 外力の作用に応じて部材内部に生ずる単位面積当たりの力

c. 構造検討結果

トラスの各部材（図 3-2(2)参照）の耐力比（積載荷重による応力/F 値）を算出した（表 3-2(1)参照）。

その結果、積載荷重による応力が F 値を上回る箇所は 7 箇所確認された。

また、【 】内の数値は現場で採取した各部材毎の引張試験で得られた降伏強度の平均値にて耐力比を算出したものを表す。

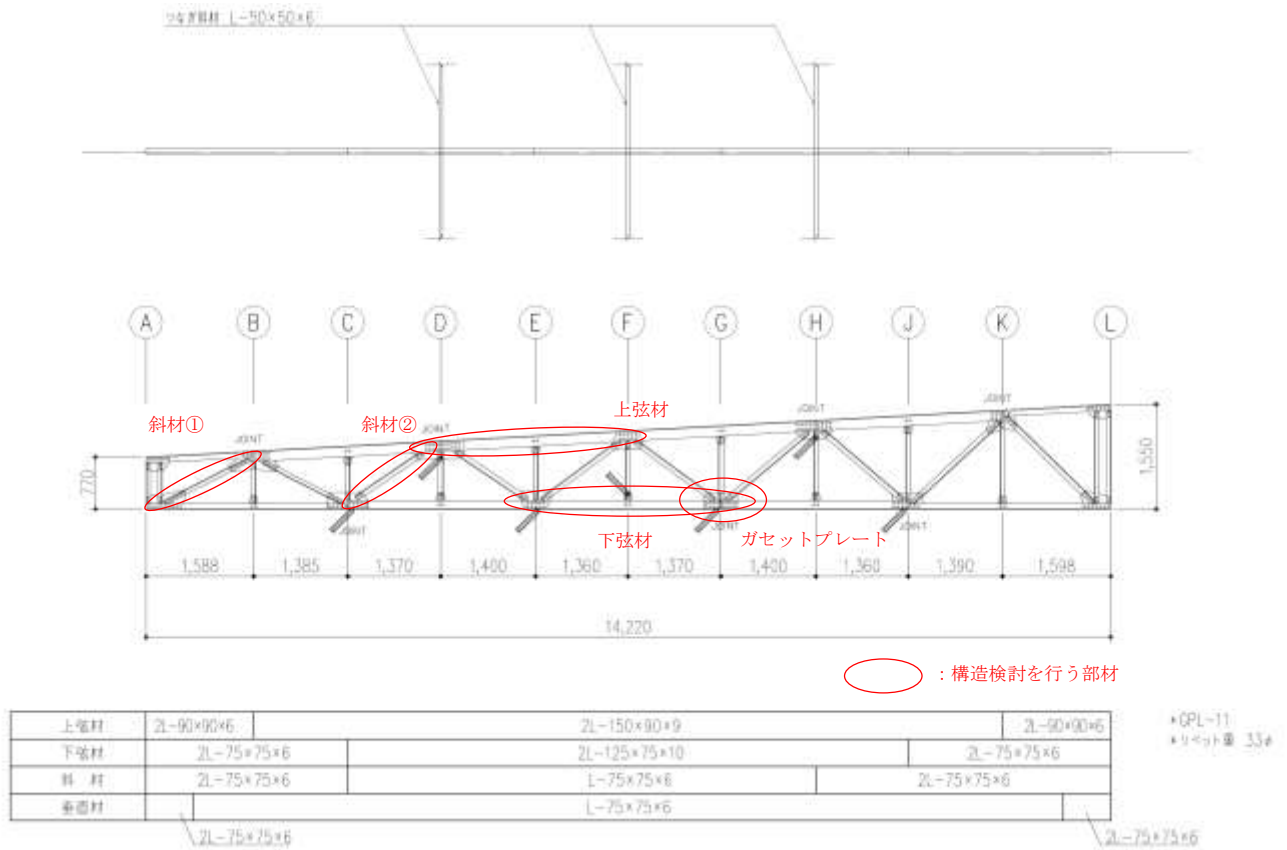


図 3-2(2) : トラスの検討対象部材

表 3-2(1) : 積雪荷重に対する耐力比一覧表

下弦材耐力比一覧表

| 位置 | L-J 間 | J-G 間 | G-E 間 | E-C 間 | C-A 間 |
|------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 部材 | 0.50 【0.36】 | 0.55 【0.39】 | 0.72 【0.51】 | 0.71 【0.50】 | 0.85 【0.60】 |
| リベット | 0.62 | 0.55 | 0.72 | 0.57 | 0.63 |

下弦材ガセットプレート耐力比一覧表

| 位置 | L 通り | J 通り | G 通り | E 通り | C 通り | A 通り |
|----|------|------------------------------|---|------|---|------|
| 部材 | 固定部 | 1.15 ^{※1} 【0.92】 | 1.61 ^{※1} 【1.28 ^{※1} 】 | 接合なし | 1.51 ^{※1} 【1.20 ^{※1} 】 | 固定部 |

※1 : 下弦材ガセットプレートの引張耐力不足

上弦材耐力比一覧表

| 位置 | L-K 間 | K-H 間 | H-F 間 | F-D 間 | D-B 間 | B-A 間 |
|------|--------|----------------|----------------|------------------------------|----------------|--------|
| 部材 | 発生応力 0 | 0.56 【0.46】 | 0.92 【0.75】 | 1.03 ^{※2} 【0.84】 | 0.83 【0.67】 | 発生応力 0 |
| リベット | 発生応力 0 | 0.54 | 0.53 | 0.60 | 0.60 | 発生応力 0 |

※2 : 上弦材の圧縮耐力不足

斜材耐力比一覧表

| 位置 | L-K 間 | K-J 間 | J-H 間 | H-G 間 | G-F 間 |
|------|----------------|----------------|--------------------|--------------------|------------------------------|
| 部材 | 0.84 【0.70】 | 0.55 【0.46】 | 0.51 【0.43】 | 0.67 【0.55】 | 0.34 【0.28】 |
| リベット | 0.32 | 0.51 | 0.79 | 1.23 ^{※4} | 0.73 |
| 位置 | F-E 間 | E-D 間 | D-C 間 | C-B 間 | B-A 間 |
| 部材 | 0.13 【0.11】 | 0.21 【0.18】 | 0.95 【0.79】 | 0.53 【0.44】 | 1.10 ^{※3} 【0.91】 |
| リベット | 0.23 | 0.38 | 1.11 ^{※4} | 0.49 | 0.59 |

※3 : 斜材の圧縮耐力不足

※4 : リベットのせん断耐力不足

上段は F 値などの規定値から算出

下段【 】内は引張試験による降伏強度の平均値から算出

d. トラスの耐力に対する積雪深さ（荷重）

トラスの耐力から求まる、積雪深さの許容値を算出した（図 3-2(3)参照）。

トラスの耐力は、屋根スラブの荷重に今冬の積雪荷重を加えた合計値を、G通りガセットプレートの耐力比 1.28 で割り戻して 12.19kN/m^2 と算出した。ここから屋根スラブの荷重 8.0kN/m^2 を引いた 4.19kN/m^2 （約 430kg/m^2 ）が積雪の許容値であり、湿った雪（比重 0.3g/cm^3 ）で約 140cm 、乾いた雪（比重 0.2g/cm^3 ）で約 210cm まで残留ひずみ*を伴わない弾性範囲に収まる構造であった。

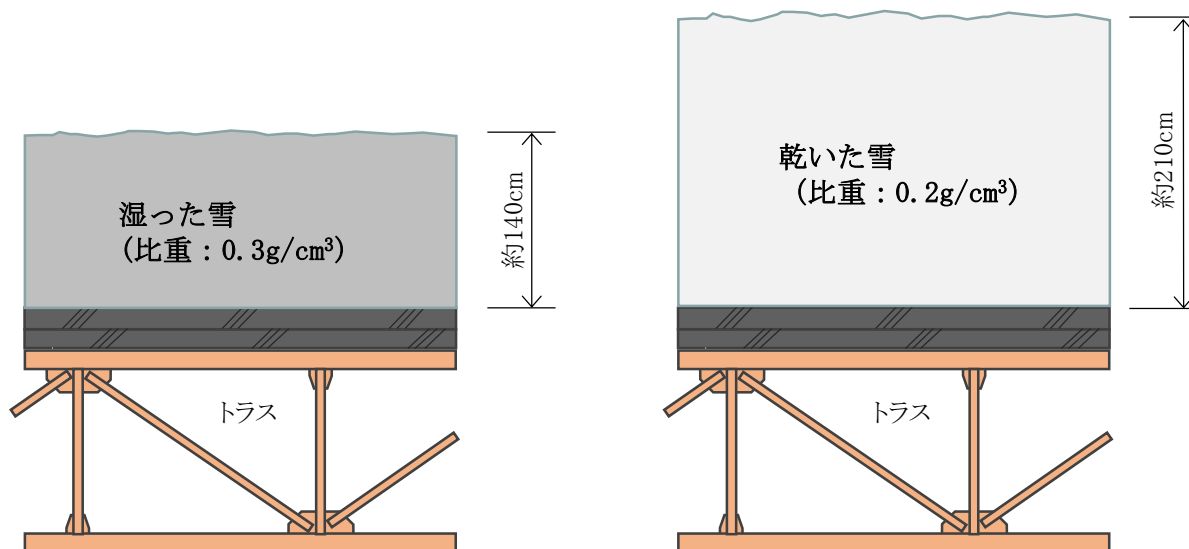


図 3-2(3)：トラスの耐力に対する積雪深さ（荷重）

※注釈

残留ひずみ

- ・荷重が弾性範囲を超えると、荷重を 0 にしても残る鋼材のひずみ（変形）

(3) 屋根崩落のプロセス

a. 構造検討結果の考察

構造検討の結果(表 3-2(1)参照)、耐力比が 1 を超え、トラス崩落の起点として考えられる要因は下記①～④の可能性が挙げられる。

- ①下弦材ガセットプレートの破断
- ②上弦材の圧縮耐力不足（面外方向座屈）
- ③斜材の圧縮耐力不足（面外方向座屈）
- ④斜材のリベットのせん断耐力不足

このうち、①は積載荷重による応力が F 値を超過し、最も耐力比が大きかった。部材の耐力に、引張試験による降伏強度の平均値を採用すると、積載荷重による応力が部材の耐力を超過したのは①のみであった。また、崩落トラスの破損調査では、下弦材ガセットプレートの破断が共通して認められていたことから、①の下弦材ガセットプレートの破断が崩落の起点となった可能性が高いと推測される。

②、③についてはトラスの破損調査において変形の存在は確認できたものの、座屈による変形か崩落の過程もしくは崩落時の衝撃によるものかの判別が難しい。部材の耐力に、引張試験による降伏強度の平均値を採用したところ、積載荷重に

よる応力が部材の耐力を下回ったため、崩落の起点となった可能性は低いと判断する。

④については、現地での目視調査によるとリベットが破損している部分は認められず、崩落の起点となった可能性は低いと判断する。

b. 屋根崩落過程の考察

■ トラスの基本構成

屋根構造はトラスによるほぼ同一形状の単純梁が 22 本配置されており、直交方向には下弦材をつなぐ、つなぎ水平材、上弦材と東側に隣接するトラスの下弦材をつなぐ、つなぎ斜材が約 2.8m ピッチで配置されている。トラス上部には厚さ 30cm を超える屋根スラブが積載されている。

■ トラスの建屋への固定状況

トラスは鉄筋コンクリート梁の上面に設置されており、構造的な観点からは常時は屋根スラブの自重で安定していたと考えられるものの、引抜力や水平力に抵抗するディテールではなかったと推測される。また、上弦材のつなぎ斜材やキーストンプレートとの接合状況から、上弦材の座屈補剛は十分でなかったと推測される。

■ 建屋中央寄りにおけるトラスの脱落

現地調査ではトラスNo.6以降の建屋中央寄りのエリアにおけるトラスの周辺の破損状況及び崩落トラスの配置状況より、トラス下弦材のガセットプレートが破断し、下方への変位が増大し、ほぼ同じタイミングでトラスが設置されている鉄筋コンクリート梁から脱落したものと推測される（図3-2(4)参照）。

また、南面鉄筋コンクリート梁上部の立ち上がり壁は屋根スラブ崩落に伴い、発電機室内側に一斉に倒れ込んでいるため、建屋中央寄りのある程度まとまった範囲で崩落した可能性が考えられる。

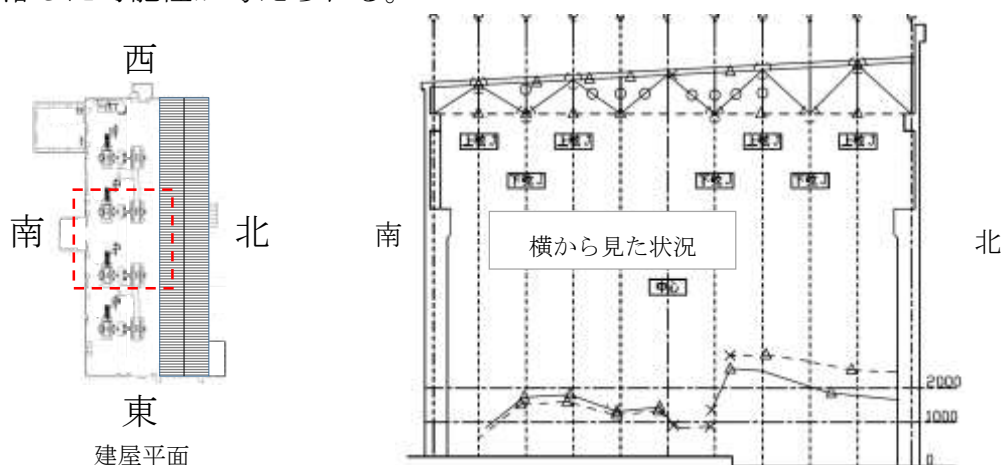


図3-2(4)：トラスの落下状況（建屋中央部）

■ 建屋東寄りのトラスの脱落

建屋東寄りのトラスNo.1～5は北側の壁にもたれかかるように落下している。これはトラスが下方に変位した際、南側のトラス端部が先行して脱落し、その後、北側が脱落したものと推測される。当該エリアと西寄りにおいては上述した南面の鉄筋コンクリート梁上部の壁は倒れていない(図3-2(5)参照)。

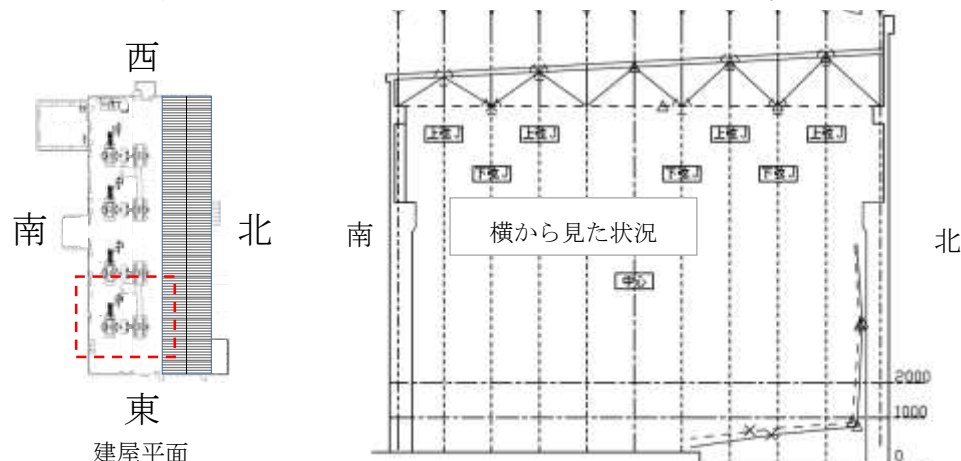


図3-2(5)：トラスの落下状況(建屋東寄り)

■ 変圧器室側壁の破損

変圧器室の壁の破損はいずれもトラス支承部の位置に相当する。これは崩落時にトラス中央が下方に変位する際、トラス端部の上端が屋根スラブ及び防水層で拘束された状態で上端を支点とした回転運動を生じて、トラス下端が変圧器室側に移動してコンクリート壁を押し抜いたものと推測される(写真3-2(1)参照)。



(トラスNo.20～22)



(トラスNo.5～7)

写真3-2(1)：変圧器室の壁の破損状況(2015年2月撮影)

■ 崩落の起点と考えられる破損

崩落トラスの破損調査ではトラス No.1～No.21 の部材で、下弦材のガセットプレートが破断している点が共通して確認されている。破断位置はいずれも下弦材の継ぎ目の位置であり、中央から西寄りには概ねG通り、東寄りにはC通りに認められる(写真 3-2(2)参照)。

ガセットプレートの破面を調査したところ延性及び脆性破壊の形態が認められた。これは延性破壊が先行して発生、進行し、その後、脆性破壊による割れが一気に伝播し、破断したのと考えられ、当該部分の破断は崩落直前に生じたものと推測される。

構造解析によれば下弦材のガセットプレート(G通り)が曲げの影響を考慮した引張軸力に対して降伏耐力を大幅に超える結果となった。これより、下弦材接合部の継ぎ目におけるガセットプレートの破断が崩落の起点となった可能性が高いと推測される。



写真 3-2(2) : 下弦材ガセットプレートの破断(2015年4月撮影)

■ 崩落過程のまとめ

前述の考察事項をまとめると中央部のトラスの下弦材ガセットプレートに、過大な積雪荷重により破断を生じて、トラスが上載荷重を負担しきれなくなり崩落したものと推測される。詳細を以下の通り示す（図 3-2(3)参照）。

(ステップ 1)

建屋中央寄り（屋上換気口の間）1 つもしくは複数のトラスの下弦材ガセットプレートが破断し、下方への変位が増大する。

(ステップ 2)

隣接するトラスは上弦材の座屈補剛材*が十分でなく、隣接トラスの崩壊に伴い負担荷重が増加し、同様に下弦材のガセットプレートにおいても破断を生じて下方への変位が増大する。

(ステップ 3)

積雪による負担は継続することから、トラスの破損が周辺に連鎖すると共に、トラスの下方への変位の増大がある時点に達したとき、トラス支承部が建屋の鉄筋コンクリート梁の上から脱落する。

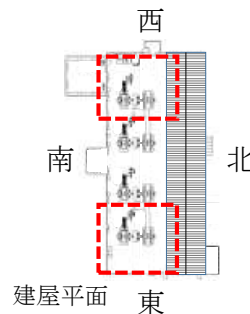
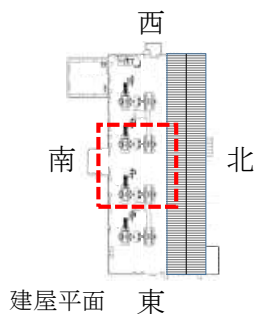
(ステップ 4)

トラスは相互につながり水平材とつながり斜材で接合されて、屋根スラブも連続しているため、トラスの破損と落下が短時間で周辺に連鎖し、全体崩落に繋がった。

※注釈

座屈補剛材

- ・圧縮力を受けた部材が横方向へ曲がろうとする力を拘束する部材



(ステップ 1) 中央寄りの傾向

東西寄りの傾向

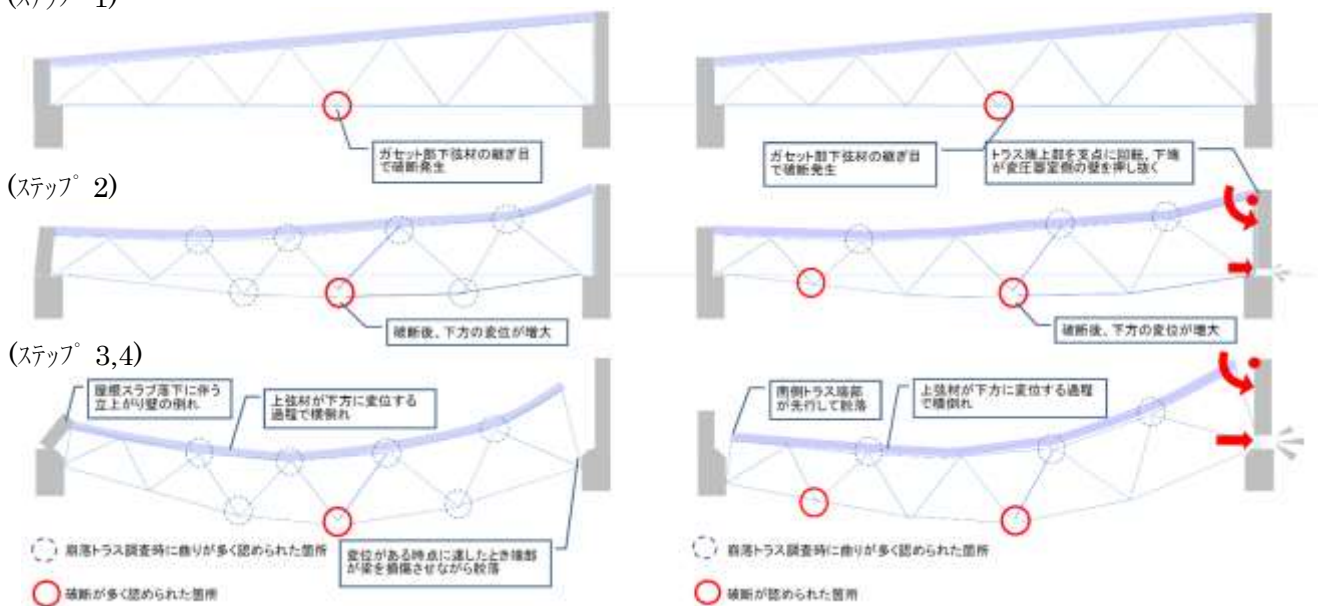


図 3-2(3) : トラス崩落過程のイメージ図（崩落過程ステップ 1~4 に対応）

3-3. 結論

- 積雪が 100cm を超えた時期に降雨を観測するなど、稀な気象状況であり、密度の高い積雪状態に成りやすい環境であった。
- 当社の除雪判断基準は、過去の経験則に基づいた積雪深のみによる除雪判断であり、建屋の構造耐力を把握した上で積雪荷重を考慮した除雪実施基準となっていなかった。
- トラス上の屋根スラブは 30cm を超える厚みであり、相当の重量であった。屋根スラブ中には防水層が複数存在すること、および各層のコンクリート比重が異なることから、新築後に 2 層目屋根スラブが追加的に施工された可能性が高く、この追加的に施工された 2 層目屋根スラブの重量が積雪量に対して不利に働いたと考えられる（2 層目屋根スラブの施工記録は、当社の保全履歴からは確認されなかった）。
- 下弦材のガセットプレート部において積雪荷重による引張力が許容耐力を超える結果となり屋根崩落の起点となった可能性が高い。なお、コンクリート及び鉄骨については現行の規格材と比較しても同程度の強度を有していた。また、破断面調査から屋根崩落の原因が構成部材の経年劣化によることを示す痕跡は認められなかった。

上記より、屋根崩落に至った原因は、屋根の許容耐力に対し積雪荷重が上回った過荷重によるものと判断する。その背景には除雪判断基準が積雪荷重を考慮したものになっていなかったこと、屋根スラブが相当の重量であったことが上げられる。

4. 再発防止対策（他の水力発電所を含む。）

4-1. 事故直後に実施してきた対策

(1) 臨時点検の実施

全164発電所を対象に、湯沢発電所建屋と類似する設備として、建築基準法で耐雪強度（積雪荷重）を規定する以前に建設された建屋（1950年に5年の裕度を加えた1955年以前）で多雪地域（最深積雪40cm以上：気象庁データ）、かつ平屋根形状（勾配が十分の三未満）の本館建屋を抽出した。抽出した22箇所に対し、従来の点検に加え、屋根崩落の兆候を事前に確認するため、主に梁のたわみ・曲がりやボルトの滑り等を集中的に調査し、異常の無いことを確認した（2月2日完了）。

また、新潟県内の水力発電所については、湯沢発電所建屋ならびに湯沢発電所建屋と類似する2発電所以外の全発電所（4箇所）の建屋についても臨時点検を実施し、異常の無いことを確認した（1月29日完了）。

(2) 除雪実施基準の暫定運用

抽出した22箇所については、次の基準により除雪を実施することとした。

a. 設計積雪荷重が明らかな建屋（5箇所）

設計積雪荷重から積雪に対する建屋の構造耐力を個別に算出し、除雪実施基準を設定。

| 発電所本館 | 設計積雪荷重 | 除雪実施基準 ※ (設計積雪荷重の75%) |
|----------|------------------------|--------------------------|
| 小野川発電所 | 1,551kg/m ² | 1,163kg/m ² |
| 秋元発電所 | 675kg/m ² | 506kg/m ² |
| 猪苗代第二発電所 | 840kg/m ² | 630kg/m ² |
| 猪苗代第三発電所 | 390kg/m ² | 292kg/m ² |
| 猪苗代第四発電所 | 510kg/m ² | 382kg/m ² |

※ 除雪実施基準に未達であっても除雪作業の安全および効率性を考慮し、

1.5m程度の積雪深を目安に実施する

b. 設計積雪荷重が不明、あるいは算定が困難な建屋（17箇所）

積雪に対する建屋の構造耐力は本来、構造躯体の調査を実施し、算出する必要があるが、現時点で不明、あるいは算定が困難な建屋については、暫定として、建屋設計において最低限見込む荷重“歩行用屋根荷重（180kg/m²）”を準用し除雪実施基準を設定。

| 発電所本館 | 除雪実施基準(暫定) |
|--|----------------------|
| 水上発電所、白根発電所、幡谷発電所、千鳥発電所、上久屋発電所、西窪発電所、今井発電所、羽根尾発電所、大津発電所、熊川第二発電所、川中発電所、松谷発電所、霞沢発電所、沢渡発電所、島々谷発電所、中津川第一発電所、信濃川発電所 | 180kg/m ² |

(参考) 180kg/m²に相当する積雪量の目安は、新雪（比重0.2g/cm³）90cm～

圧雪（比重0.3g/cm³）60cm 程度。

c. 運用方法

■ 積雪量の観測

- ・ 建屋屋根等、積雪を観測できる場所に箱尺等を設置し積雪量を観測
- ・ 観測用の箱尺等を設置できない場合は、建屋屋根の積雪を観測できる目印（窓枠、排気ダクト等）を定め観測（積雪環境が類似の地点での観測も可とする）

■ 積雪比重の観測

- ・ 積雪比重計を用いて積雪比重を観測（積雪環境が類似の地点での観測も可とする）

■ 積雪荷重の計算

- ・ 観測した積雪量及び積雪比重を用いて、下式により単位面積あたりの積雪荷重を計算

$$[\text{積雪量 (cm)} \times \text{積雪比重 (g/cm}^3\text{)} \times 10 = \text{積雪荷重 (kg/ m}^2\text{)}]$$

■ 除雪実施タイミング

- ・ 算出した積雪荷重が除雪実施基準を超えないタイミングで除雪を実施
- ・ 信濃川発電所、中津川第一発電所は除雪頻度が高いことから、連日の除雪作業が可能となるよう体制整備（2月6日完了）

d. 2014年度除雪実績

| 発電所名 | 所在県 | 除雪日数 |
|----------|-----|------|
| 中津川第一発電所 | 新潟県 | 26日 |
| 信濃川発電所 | 新潟県 | 9日 |
| 小野川発電所 | 福島県 | 4日 |
| 水上発電所 | 群馬県 | 3日 |
| 霞沢発電所 | 長野県 | 1日 |

4-2. 恒久対策

湯沢発電所と類似する設備として抽出された 22 発電所については、原因究明結果を踏まえ、再発防止対策として以下の検討を進める。

(1) 施設対策

a. 積雪に対する建屋の構造耐力の明確化（2015年9月末完了目途）

積雪に対する建屋の構造耐力が不明なものについては、屋根トラスの部材調査や試験体による強度調査から建屋の構造耐力を個別に算出する。

算出に当たっては以下の点を考慮していく。

- ・ 湯沢発電所建屋の事故原因分析において、屋根スラブの打ち増しによる過荷重が、許容される積雪量に対して不利に働いたことから、図面によりスラブ厚さが確認できない建屋は、現地で実測調査を行い、スラブ厚さを明確にしてから建屋の構造耐力を算出
- ・ 湯沢発電所建屋の事故原因分析において、ガセットプレート破断面の調査により疲労破壊の痕跡は認められなかったものの、建築基準法制定以前の経年建屋に対する耐力評価は裕度を設定

- ・ 湯沢発電所建屋の事故原因分析で明らかとなった、積雪に対して弱点となり得る構造（下弦材ガセットプレートの引張耐力不足、上弦材の圧縮耐力不足、トラス支承部の固定度不足）について、現地調査の結果を耐力評価に反映

これまでに、鉄骨トラス屋根である信濃川発電所、および鉄筋コンクリート屋根である中津川第一発電所を先行して現地調査や構造耐力の算出を進めており、この2発電所での調査実績や知見に基づき、順次、他発電所の調査を進めていく。



トラス鋼材強度試験のための試験体採取状況



コンクリート強度試験体採取状況



スラブの厚み調査（測定器による非破壊調査）



スラブの厚み調査（ドリル削孔して実測調査）

写真 4-1(1)：信濃川発電所での調査風景

b. 建屋補強（2015年11月末完了目途）

積雪に対して弱点となり得る構造を有する発電所建屋については詳細に評価を行い、補強工事などの対策を実施していく。

なお、湯沢発電所建屋と類似する設備として抽出された 22 発電所に対して現時点までに目視による臨時点検を完了しており、トラス支承部の固定が弱いと推測される建屋が 3 棟（水上発電所、霞沢発電所、沢渡発電所）抽出されている。これらについてはさらに詳細な調査を行い、必要に応じてトラス支承部の固定度を向上させる補強を実施する。

c. 融雪装置の設置（2015年11月末完了目途）

今冬の除雪実績を踏まえ、今後明確化する除雪基準に基づき除雪運用を行った場合、除雪頻度が高く実運用上困難と考えられる信濃川発電所及び中津川第一発電所建屋については、屋上に融雪装置を設置し、常に積雪荷重を低減させる対策を実施する。

また、除雪にあたって安全確保が困難（親綱施設なし、昇降設備なし）な箇所については、安全施設を新設する。

(2) 運用対策

a. 除雪業務運用の見直し・標準化(2015年10月末完了目途)

精度高く積雪量を把握可能な位置に積雪重量計(※)を設置。

※除雪頻度が高い地域の建屋のうち、各制御所の代表発電所本館建屋(所管制御所内で最上流かつ統計上最も積雪深さのある箇所)について、積雪重量計(新潟県自治体で活用)を設置する。

b. 除雪実施の考え方

建屋最寄りの観測所における過去実績(「気象庁公表データ:観測史上1~10位の値」など)から1日あたりの最大積雪増加量として、日積雪量(積雪差日合計)の最大値を抽出し、積雪荷重に換算(積雪比重を新雪 0.2g/cm^3 により算出)。換算した積雪荷重を設計積雪荷重から差し引いた値を除雪基準とする。

[除雪基準=設計積雪荷重(kg/m^2) - 日積雪量最大値(cm) $\times 0.2(\text{g/cm}^3) \times 10$]

除雪は、代表発電所本館建屋に設置した積雪重量計にて積雪荷重を観測し、除雪基準を超えないタイミングで実施する。なお、代表発電所本館建屋以外については、代表発電所本館建屋での観測結果を踏まえ、各発電所の除雪基準を超えない範囲で現地観測を行い判断する。

除雪実施基準に未達であっても除雪作業の安全および効率性を考慮し、1.5m程度の積雪深を目安に実施する。具体的な運用は以下の通り。

■ 積雪量の観測

- 代表発電所本館建屋に設置する積雪重量計にて積雪の単位荷重を観測
(観測した単位荷重を参考に、各同一水系発電所の建屋屋根等、観測している積雪量から積雪荷重を算出)
- 観測用の箱尺等を設置できない場合は、建屋屋根の積雪を観測できる目印(窓枠、排気ダクト等)を定めて観測
(積雪環境が類似の地点での観測も可とする)

■ 積雪比重の観測

- 算出した積雪荷重が除雪実施基準に達する可能性が大きくなった時点で、積雪比重計を用いて積雪比重を観測
(積雪環境が類似の地点での観測も可とする)

■ 積雪荷重の計算

- 観測した積雪量および積雪比重を用いて、下式により単位面積あたりの積雪荷重を計算

$$[\text{積雪量}(\text{cm}) \times \text{積雪比重}(\text{g/cm}^3) \times 10 = \text{積雪荷重}(\text{kg/m}^2)]$$

■ 除雪実施タイミング

- 建屋屋根上の積雪が除雪実施基準を超過しないよう、先の気象情報を参考に早期に手配を実施

■ 除雪実施基準の表示

- 建屋入り口付近には除雪基準を表示

■ 除雪実施体制の強化

- 万一、除雪手配が滞った場合には、直営による除雪を速やかに実施できるよう除雪機の配備ならびに計画的な操作訓練を実施

表4-2(1)：再発防止対策対象一覧

| 所在地 | 拠点 | 構造耐力 (kg/m ²) | 除雪基準 (kg/m ²) | 施設対策(対象:○) | | | |
|-------|----------|------------------------------|------------------------------|------------|------|---------|----------------|
| | | | | 構造耐力の明確化 | 建物補強 | 融雪装置の設置 | 除雪のための積雪重量計の設置 |
| 群馬 | 水上発電所 | ○※1 | ○※1※5 | ○※1 | ○※3 | — | ○※4 |
| | 白根発電所 | ○※1 | ○※1※5 | ○※1 | ○※3 | — | ○※4 |
| | 幡谷発電所 | ○※1 | ○※1※5 | ○※1 | ○※3 | — | — |
| | 千鳥発電所 | ○※1 | ○※1※5 | ○※1 | ○※3 | — | — |
| | 上久屋発電所 | ○※1 | ○※1※5 | ○※1 | ○※3 | — | — |
| | 西窪発電所 | ○※1 | ○※1※5 | ○※1 | ○※3 | — | ○※4 |
| | 今井発電所 | ○※2 | ○※2※5 | ○※2 | ○※3 | — | — |
| | 羽根尾発電所 | ○※2 | ○※2※5 | ○※2 | ○※3 | — | — |
| | 大津発電所 | ○※1 | ○※1※5 | ○※1 | ○※3 | — | — |
| | 熊川第二発電所 | ○※2 | ○※2※5 | ○※2 | ○※3 | — | — |
| | 川中発電所 | ○※1 | ○※1※5 | ○※1 | ○※3 | — | ○※4 |
| 松谷発電所 | ○※2 | ○※2※5 | ○※2 | ○※3 | — | — | |
| 長野 | 霞沢発電所 | ○※1 | ○※1※5 | ○※1 | ○※3 | — | ○※4 |
| | 沢渡発電所 | ○※2 | ○※2※5 | ○※2 | ○※3 | — | — |
| | 島々谷発電所 | ○※1 | ○※1※5 | ○※1 | ○※3 | — | — |
| 新潟 | 中津川第一発電所 | ○※1 | ○※1※5 | ○※1 | ○※3 | ○ | ○※4 |
| | 信濃川発電所 | ○※1 | ○※1※5 | ○※1 | ○※3 | ○ | — |
| 福島 | 小野川発電所 | 1,551 | 1,208 | — | — | — | ○※4 |
| | 秋元発電所 | 675 | 512 | — | — | — | — |
| | 猪苗代第二発電所 | 840 | 677 | — | — | — | ○※4 |
| | 猪苗代第三発電所 | 390 | 227 | — | — | — | — |
| | 猪苗代第四発電所 | 510 | 347 | — | — | — | — |

※1: 現地調査、数値解析により積雪耐力を算出中

※2: 構造計算書より、積雪耐力を逆算中

※3: 詳細調査を行い、必要に応じて建物補強を実施

※4: 所管制御所内で最上流かつ統計上最も積雪深さのある箇所

※5: 気象に関する基礎データは取集中

■ 完了までのスケジュール

| 実施項目 | 2014年 | | 2015年 | | | | | | | | |
|------------------------|-----------|----|-------|----|--------------|----|------|----|-----------|-----|--------|
| | 2月 | 3月 | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 11月 | |
| 建屋構造耐力の明確化 | — | | — | | — | | — | | — | | ▼ 完了目途 |
| 先行箇所 | 現場調査・材料試験 | | 数値解析 | | — | | — | | — | | ▼ |
| 後行箇所 | — | | — | | 現場調査・材料試験 | | 数値解析 | | — | | ▼ |
| 建屋補強※ | — | | — | | — | | — | | — | | ▼ |
| 除雪実施基準の設定 | — | | — | | 日当り最大積雪増加量調査 | | — | | — | | ▼ |
| 融雪装置の設置 (中津川第一、信濃川) | — | | — | | — | | — | | — | | ▼ |
| 中津川第一発電所 | — | | — | | — | | — | | 現場調査、現地施工 | | — |
| 信濃川発電所 | — | | — | | — | | — | | 現場調査、現地施工 | | — |
| 積雪重量計の設置 | — | | — | | 据付位置調査 | | — | | — | | ▼ |
| | — | | — | | — | | — | | — | | ▼ |

※建屋補強が 2015.11 末を超える場合は、補強前の除雪基準以下となるよう確実な管理・除雪を行う。

4-3. 水力発電設備の保安の向上に向けた取り組み

経年電力設備の中長期的な保安を確保しつつ運転継続するため、自然災害や環境汚染リスク等について、その影響度、発生可能性を軸に評価し、設備対策や防災態勢の強化、リスク顕在化時の対応方策の強化に取り組んでいる。

特に重大なリスクについては、社内委員会にて対策内容、期限、ならびに進捗を管理し、PDCAを確実に廻している。

水力発電設備については、この度の事故に鑑みて、発電設備の保安を更に向上していくことを目的として、海外・国内のトラブル事例を収集・分析し、また有識者からの指導を頂いて、取り組みの充実を推進している。

(1) トラブル事例の収集と要因の分析

海外・国内水力発電所における重大事故事例を収集し、個々の事象の要因について分析した。

社内外関係機関への聞き取りやインターネット検索・文献調査により海外事例 52 件、国内事例 66 件の事例を収集した(表 4-3(1) 参照)。

表 4-3(1): トラブル事例の収集方法

| 事例 | 収集件数 | 聞き取り先、収集方法 |
|------|------|--|
| 海外事例 | 52 件 | 当社海外駐在事務所 他電力事業者、エネルギー関連財団 重電メーカー、コンサルタント 海外電力調査会刊行物ほか収集文献 インターネット検索 |
| 国内事例 | 66 件 | 電気事業者団体間の提供情報 経済産業省ホームページ(電気事故報告) その他収集文献、インターネット検索 |

トラブルによって発生した重大な事例は、大きく 7 つに分類(表 4-3(2) 参照)。

表 4-3(2): 事例の分類と発生件数

| 事例の分類 | 発生件数 |
|-------------------------------|-------|
| I. ダム・発電所からの異常放流・流下 | 20 件 |
| II. 導水路からの溢水 | 8 件 |
| III. 高水圧の設備からの大量漏水 | 9 件 |
| IV. 火災 | 7 件 |
| V. 公共水域への油流出(油流出に至らなかった浸水を含む) | 37 件 |
| VI. 高所からの設備落下 | 9 件 |
| VII. 供給支障・長期間の発電不能(戦争・テロを含む) | 28 件 |
| 合計 | 118 件 |

また、118 件の事例について、どのような要因によって事例発生に繋がったかを分析・分類した(表 4-3(3) 参照)。

なお、複数の要因が複合して発生したものもあり、合計は事例数と合致しない。

表 4-3(3):要因の分類と発生件数

| 発生要因 | | 発生件数 |
|--------------|----------------|------|
| 1. 経年化 | 経年に対する把握・評価が不足 | 18 |
| 2. 運転・管理の不適切 | 設備保全の遅れ・不足 | 35 |
| | 誤操作・誤作動 | 19 |
| 3. 設備改修の不備 | 設計の不備 | 53 |
| | 施工の不備 | 13 |
| 4. 自然災害等 | 地震 | 14 |
| | 洪水 | 29 |
| | 地すべり | 7 |
| | 氷雪 | 10 |
| | 火山噴火・土石流 | 0 |
| | その他 | 3 |

(2) 保安向上に向けた取り組みの検討

これまでも、重大なリスクを回避することを念頭に、リスクを引き起こす要因に対して設備保安に取り組んでおり、分類した諸要因(表 4-3(3)参照)に対して、これまでの取り組みによって概ね対応してきていることを確認した。

今後は、118 件の事例について個々の要因を確認した際の気づきに加え、有識者からのご指導^{*}を得て、以下の事項について重点的に確認し、必要な対策を実施していく。

■ 重大リスクを回避するための重点的な取り組み

- ・ ハザードマップによる発電所地点での洪水、地すべりリスクの確認と対応検討
- ・ 火山の噴火による設備埋没リスクの確認と対応検討
- ・ 導水路からの溢水トラブルを鑑みた、想定リスクの明確化による意識高揚、および導水路の入口と出口での流量管理によるトラブルの防止
- ・ 所内電源喪失時の発電所の浸水回避機能(弁類の閉止・排水設備の機能)の確認
- ・ 圧油装置を有する等の重要な建屋の耐雪荷重の確認と適正な除雪
- ・ 高所に設置した重量物の取り付け部の腐食状況確認

また、重大リスク発生時に対する減災の取り組みとして、以下の事項については、継続して取り組む。

- ・ 非常災害が発生した時の対応として、人身安全の確保を最優先に、早期停電の解消と設備復旧の実現等のため、応急対策、復旧活動を推進することを基本方針とし、必要があれば対策本部を設置
- ・ 平常時からの取り組みとして、重大リスク発生時の減災を意識した関係機関との連携等も含めた対応を強化、更新

今後も引き続き、保安向上に資する情報の収集に努め、適宜、有識者からの指導を頂きながら取り組みの充実を図っていく。

※ご指導を頂いた有識者

大町 達夫 東京工業大学 名誉教授

水野 光章 元（財）水資源協会専務理事

松本 徳久 元 政策研究大学院客員教授

柳川 城二 （一財）ダム技術センター理事長

以上