

# 火力発電とエネルギープラントにおける 震災被害とその影響

浅野 等 (神戸大学)

日本機械学会 東日本大震災調査・提言分科会 WG5

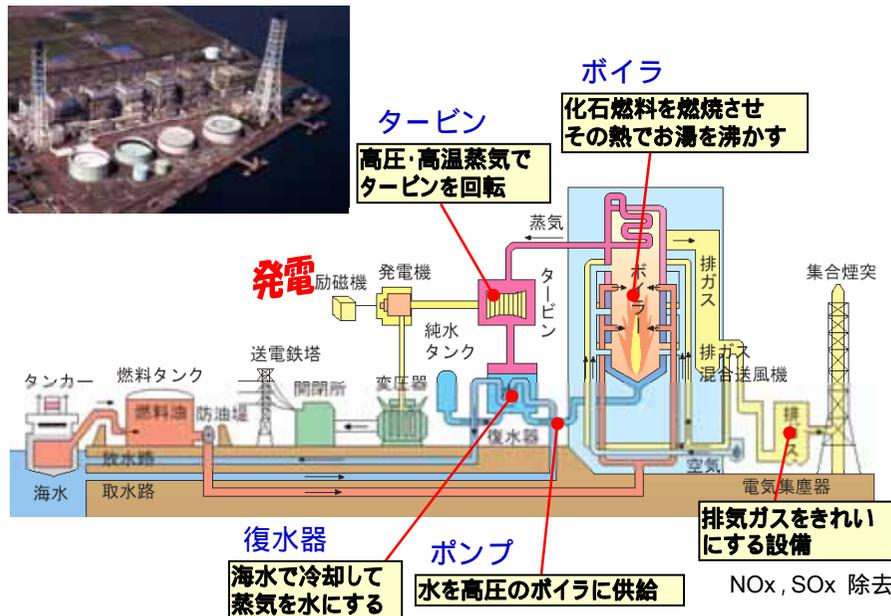
## 火力発電所

- 震災前の状況
- 震災時の状況
  - ✓ 現地被害調査
  - ✓ 被害アンケート調査
  - ✓ 送電設備, 変電所の被害
- 震災後の状況

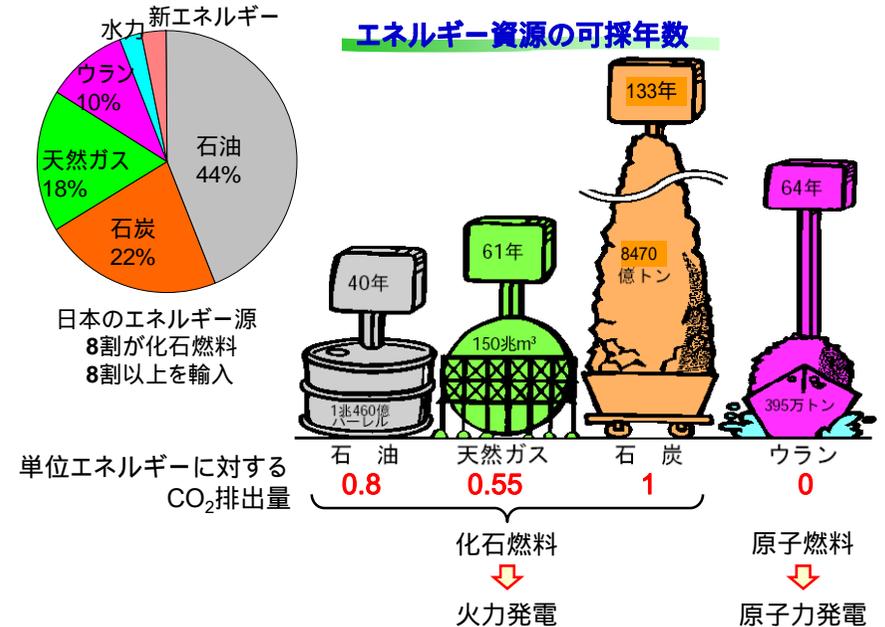
## エネルギープラント

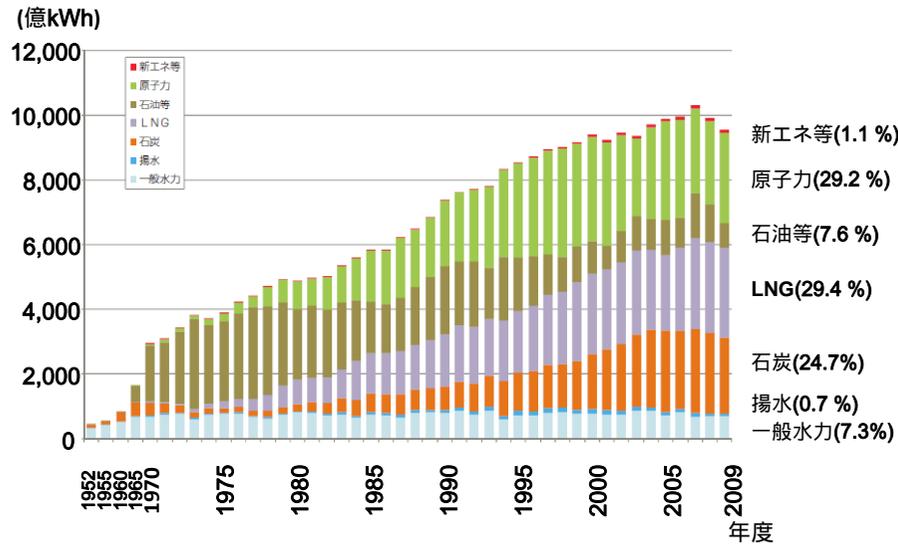
- 震災時の状況
  - ✓ 現地被害調査

## 火力発電所の構造



## エネルギー資源



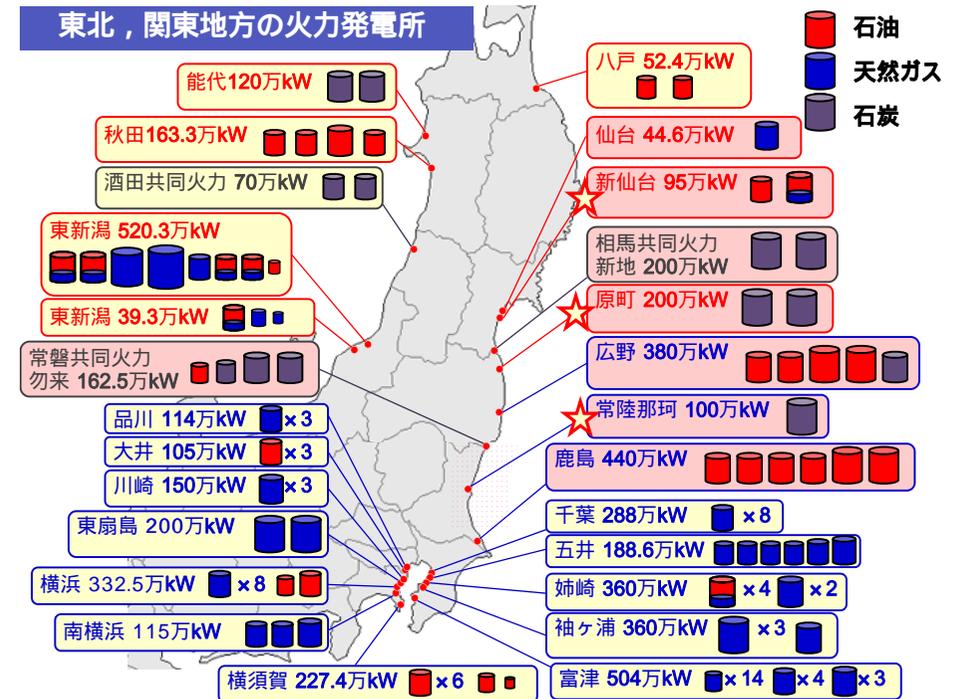
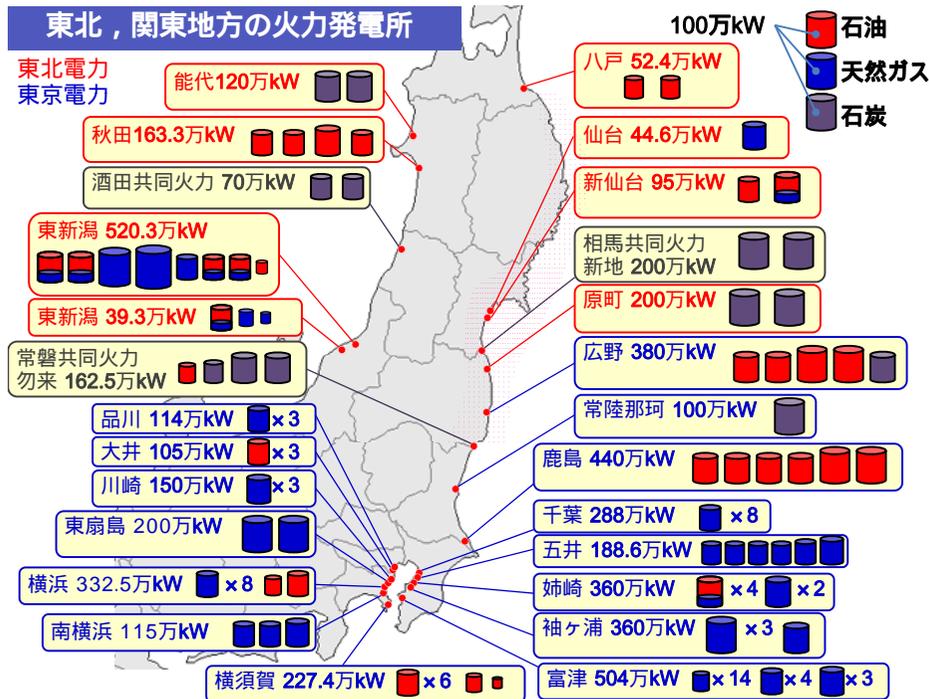


経済産業省  
「平成20年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2010）」（2010年）  
( <http://www.enecho.meti.go.jp/topics/hakusho/2010energyhtml> )

2011. 3. 11 14:46

## 東日本大震災での被害

### 火力発電所, エネルギープラントの被害調査



1. 新仙台火力発電所 (東北電力)

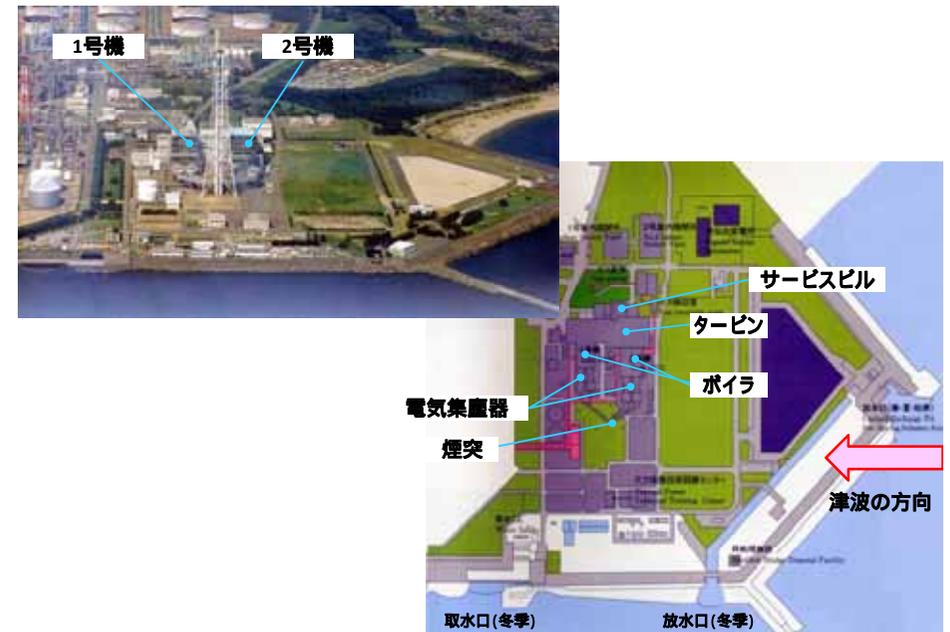
重油火力発電所(1号機) : 350 MW **受給停止中**  
 重油・天然ガス混焼 火力発電所(2号機) : 600 MW **560MW運転中**

2. 原町火力発電所 (東北電力)

超臨界圧(USC)微粉炭火力発電所(1号機) : 1000 MW **定格運転中**  
 (2号機) : 1000 MW **定期点検中**

3. 常陸那珂火力発電所 (東京電力)

超臨界圧(USC)微粉炭火力発電所 : 1000 MW **定格運転中**



	1号機 <b>受給停止中</b>	2号機 <b>56万kW運転中</b>
運転開始	1969年7月 着工 1971年8月 運開 39年7カ月	1970年10月 着工 1973年6月 運開 37年9カ月
出力	35万 kW	60万 kW
使用燃料	燃料: 重油	燃料: 重油 + 天然ガス
ボイラ	蒸気発生量: 2970 t/h	蒸気発生量: 2890 t/h
タービン	主蒸気圧力: 16.6 MPa 蒸気温度: 566 / 538	主蒸気圧力: 24.1 MPa 蒸気温度: 538 / 566

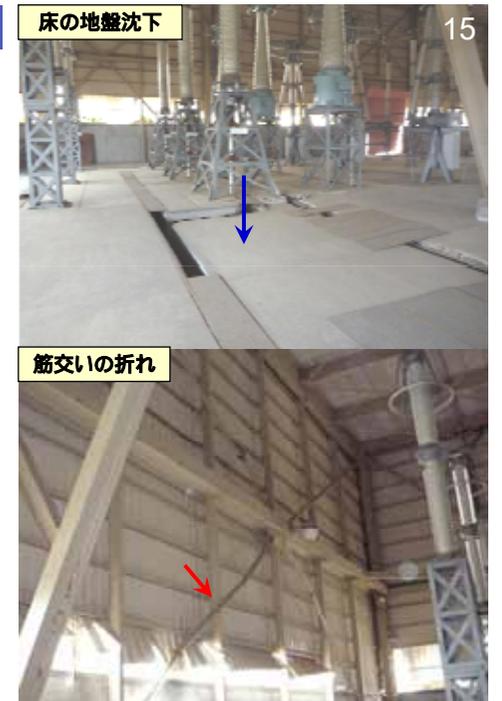
- 所内に燃料の備蓄なし
- 重油は隣のJXから調達  
天然ガスは新潟よりパイプラインで搬送

サービスビル1階



タービン建屋1階





● 地盤沈下



- 地震の揺れによる被害は小さかった 補修で済む程度
- 津波による浸水被害 補機, 電源設備の浸水
- 地盤沈下, 液状化による被害  
送受電設備の被害 が大きかったが限定的



2011. 12. 27 営業運転再開

2. 原町火力発電所 (福島県南相馬市)

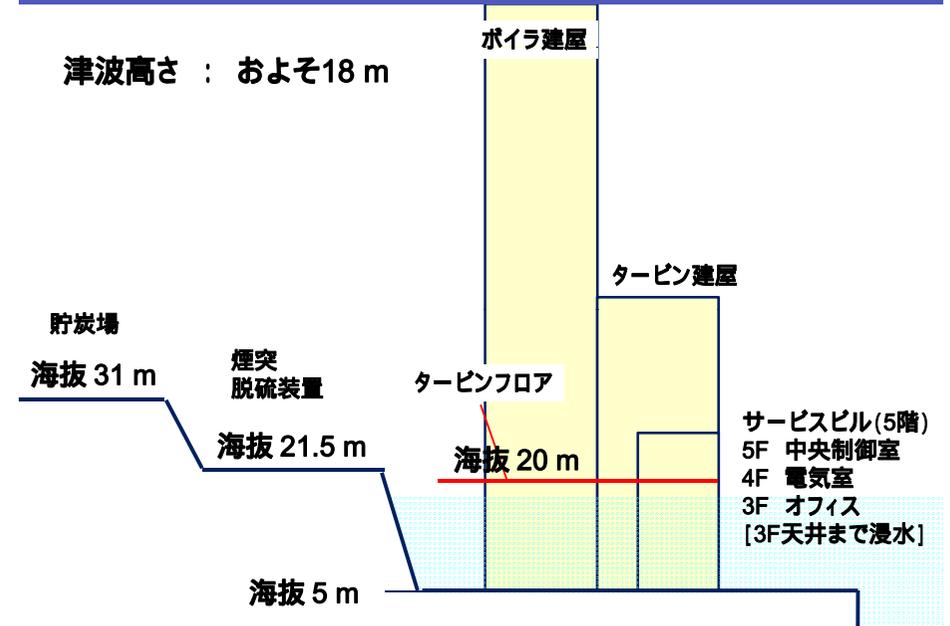


発電所設備概要

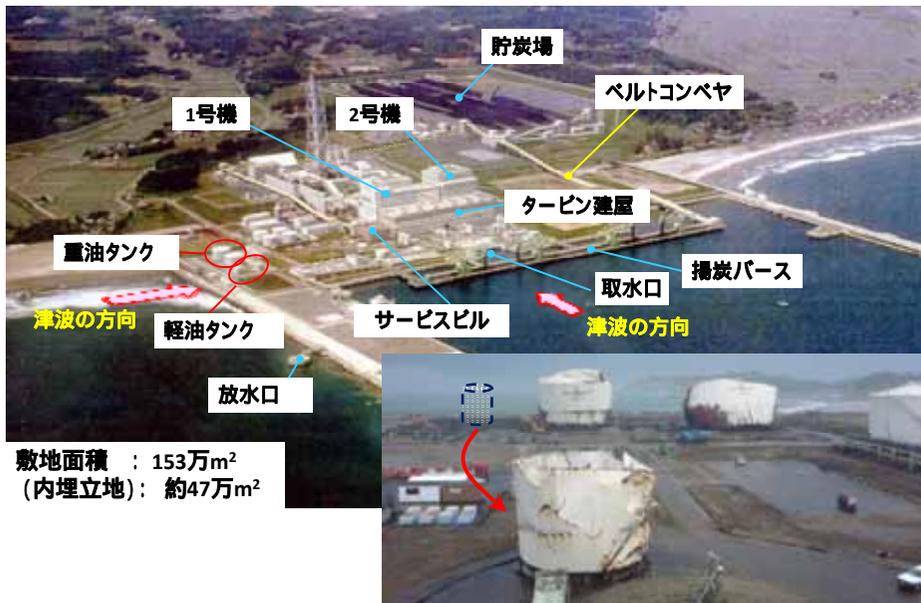
	1号機 定格運転中	2号機
運転開始	1993年2月2日 着工 1997年7月11日 運開 13年8カ月	1994年2月1日 着工 1998年7月3日 運開 12年8カ月
出力	100万 kW	100万 kW
使用燃料	主燃料: 石炭 補助燃料: 重油, 軽油	主燃料: 石炭 補助燃料: 重油, 軽油
ボイラ	蒸気発生量: 2970 t/h	蒸気発生量: 2890 t/h
タービン	主蒸気圧力: 24.52 MPa 主蒸気温度: 566 再熱蒸気温度: 593 タービン回転数: 高・中圧: 3000 rpm 低圧: 1500 rpm	主蒸気圧力: 24.52 MPa 主蒸気温度: 600 再熱蒸気温度: 600 タービン回転数: 高・中圧: 3000 rpm 低圧: 1500 rpm
発電効率	43.3 %	44.1 %

- 14:56 **地震発生**
- 1号機 定格(1000 MW) 運転中
  - 2号機 定期点検中で停止
  - 震度6弱 M9.0
  - タービン停止せず
  - 引き潮で潮位が低下したため 800 MWに負荷降下 (取水口 - 4 ~ - 7m) その後, 600 MW に降下 (15:12 600 MW に到達)
- 15:30
- ページングで所内に連絡 マニュアルに従い サービスビル3階に避難 大津波警報を受けSB5階へ タービン棟屋上へ避難
- 15:41 **津波到達**
- タービン手動停止
  - タービン発電機より白煙 大事に至らず

津波高さ : およそ18 m



発電所外観



- 津波の高さまで建造物の壁, 配管類が破壊されている



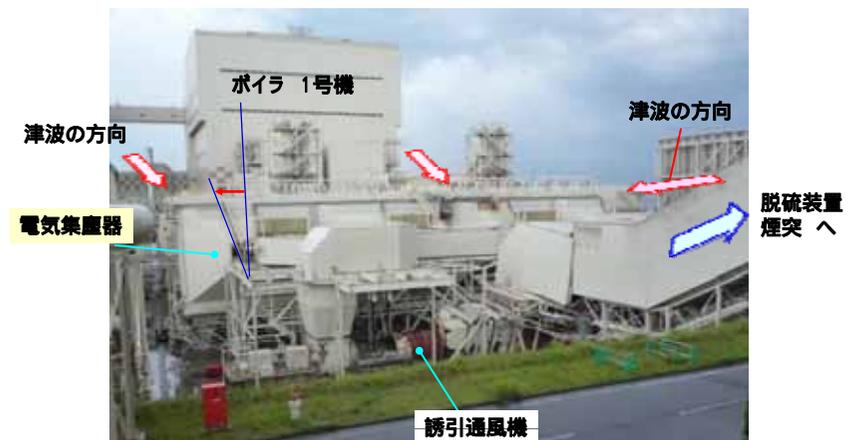
- 石炭搬出中であつた揚炭機の破損  
アンローダは破壊され、石炭船に残留
- 石炭船の座礁  
石炭の積載量が多く、津波で陸に上がることはなかった。



- 石炭船が接岸していなかった揚炭機、津波で転倒、破損



浸水時、浮力で電気集塵器が持ち上がり、津波で数m流され、着地  
誘引通風機周りのダクト、脱硫装置への接続部がダメージを受けた



● サービスビル 3階天井まで浸水

海側



5階 中央制御室 — タービンフロア  
4階 電気室 (タービン建屋3階)

エントランス



タービン建屋側



2階



5階: 中央制御室



3階



3階

- 地震発生時, 所内電力は維持されており, ページングで連絡
- マニュアルでは, 津波警報発令時, サービスビル3階に集合



マニュアル通りに適切に対応がなされた。

- 手動停止時, 非常用電源の起動指令がなされた。
- 非常用電源はタービン建屋, タービンフロアに設置されていた。
- 電源盤と制御機器はタービン建屋2階に設置されていたため, 津波で浸水し運転されなかった。



非常用電源をタービンフロアに設置したのは適切  
電源制御盤を同じフロアにすべき。

- 衛星電話が備えられていたが, 固定アンテナ式であり, サービスビル3階に設置されていた。  
津波で浸水し, 使用不能であった。
- 関連会社のバッテリー式可搬型を使用した。



衛星電話は可搬型にすべき

- 津波で重油タンク破損 (容量: 9800 kL × 2基)
- 津波では油漏出業止めの堰は役に立たず
- 漏出時, 油回収作の負荷が大きい  
海水からの回収, 敷地からの回収, 機器の洗浄, がれきの洗浄
- 重油だけでも発電運転が可能になるよう備蓄量を多くしていた.  
起動時の必要量 400 kL + 停止時の使用量

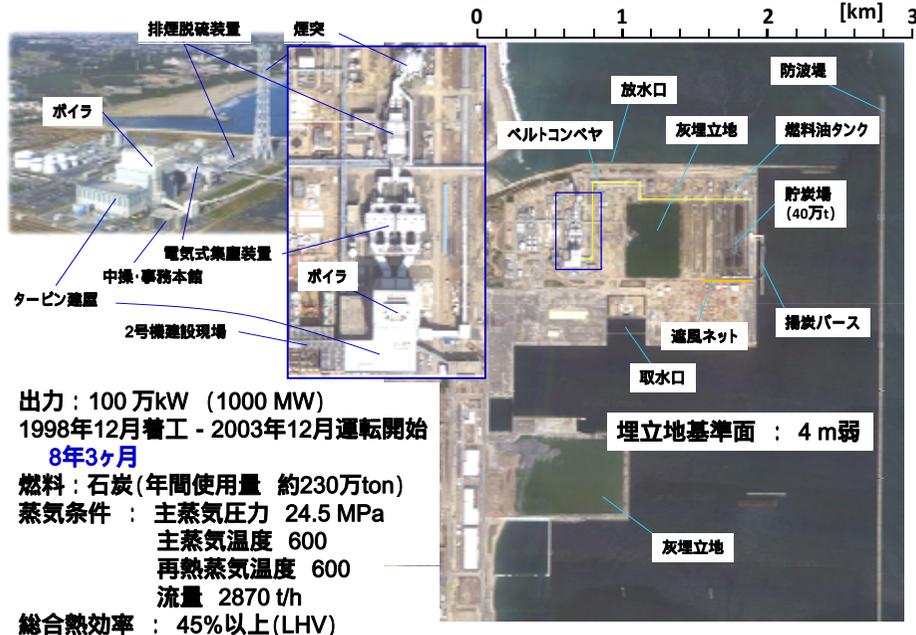


重油タンクは高台に移動  
備蓄量を減らし, 埠頭からタンクへはバッチで輸送を提案

- 貯炭場の石炭(約40万t)の発熱, 発火防止 } → 適切な処理が施された
- バンカーの残留石炭の除去
- 重油の回収
- がれきの処理  
半径30km以内なので, 難航. 油の洗浄が必要.
- 機器の分解, 点検  
微粉炭機, 給水ポンプ, 一次送風機, 誘引通風機, タービン, ボイラ
- 揚炭バースの被害調査, 座礁した石炭船の処理  
半径30 km 以内なので対応に遅れ



2012年度内運転再開にむけて復旧作業中



地震発生

外部電源喪失

津波到達

津波: 4 ~ 5m

- タービン, 燃焼自動停止
- 煙突から作業員落下
- ボイラ接続配管2カ所でチューブリーク
- 従業員, タービン建屋に避難
- 揚炭機が揚炭作業中に停止
- 発電所敷地冠水
- 石炭運搬船の強い揺動で揚炭機破壊
- ディーゼル発電 一時停止  
地絡と推測されるが直ぐに復帰
- 送炭設備(ベルトコンベヤ)が傾く

地盤沈下  
液状化

定検中の揚炭機に被害なし



撤去された揚炭機



揚炭機が揚炭作業中に停止  
↓  
石炭運搬船の強い揺動で  
揚炭機破壊



倒れた揚炭機で破壊されたベルトコンベヤ

- 主要構造物は地盤改良、杭を打っているため被害なし
- 構造物周囲の地盤沈下
- ベルトコンベヤ、配管架台の基礎が液状化でゆがんだ

破損した貯水池  
再利用水タンクは被害なし



ベルトコンベヤ中継点



杭が見える

所内道路

がれきを撤去し、通路確保

中央操作室

天井パネルの修復、耐震補強

蒸気タービン

カバーを外し、内部点検 損傷なし  
カップリング 異常なし

ボイラ

水圧試験完了  
3ヶ所のチューブリーク

ガス-ガスヒーター

脚の補強

送炭設備

ベルトコンベヤ撤去  
現在の地盤にあわせて設置

揚炭バース

揚炭機撤去  
ベルトコンベヤ修復

貯炭場

ずれた地盤にあわせて施設を設置



↓ 2か月

2011. 5. 15 運転再開

原子力および火力  
発電所



JOGMECプレスリリースより

久慈国家石油備蓄基地  
175万kL 岩盤地下タンク  
地上設備壊滅  
受電設備も×



JX仙台製油所(火災)

仙台市ガス局LNG基地製油所

JX鹿島製油所(火災)

コスモ千葉製油所(火災)

JX根岸製油所(10日ほどで復旧)

ガス供給停止が発生した県

	製油所 A	製油所 B
電源の確保	地震直後 外部電源 × 非常電源 津波襲来 全て ×	地震直後、津波襲来ともに 外部電源 GT自家発停止 プラントは手動停止
避難と緊急連絡	構内内線 携帯電話	所内放送で連絡 津波襲来までに避難完了
プラントの主な被害	タンク横転・流出、ハイスタック 座屈、反応塔基礎崩壊など いずれも補修後利用可能	地震によりLPGタンク火災による 配管等の焼失、構造物損壊 新たに建設
復旧時期	2012年3月（電気設備の納期 がボトルネック）	再開の目処立たず、部分稼働 を検討、監督行政の確認等
感震システム作動 過去の教訓など	30年周期再現レベルの地震動 に対応、例：LPG球形タンク損 傷は皆無。ソフトな対応の功 を奏し、大爆発・人命被害は無	感震システムは作動して有効 一方、想定以上の災害で、LPG 漏洩火災が発生し、訓練は十 分活かせなかった
組織の指揮系統 通信手段	製油所長が名実ともに指揮 通信手段の確保が課題	製油所長が名実ともに指揮 電話（衛星・構内・携帯）、無線
M9、15m超の対策	現状、建屋全て水没となり、回 避対策不能。避難は製油所外	再発防止策の水平展開ととも に必要であると感じている

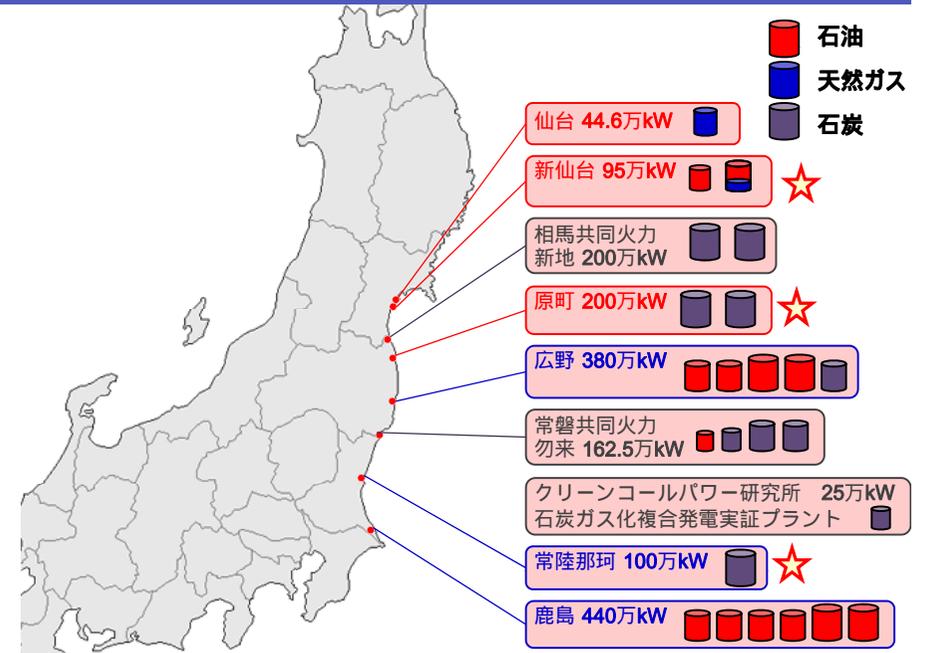
質問項目

発電プラント全体について

1. 従業員の避難状況
  - 所内従業員への連絡手段
  - 津波襲来まで避難は完了していたか
2. 災害発生時の対応状況
  - 外部との非常時通信手段の確保
  - 災害発生時の対応マニュアル、日常訓練
  - 職員の食糧、飲料水、生活空間の確保
  - 二次被害
3. 地震発生前後のプラントの状況
  - 地震発生直前 地震発生直後 津波襲来时
  - 非常電源、外部電源の状態
4. 感震装置について

システム構成機器の被害状況

5. 設備の被害状況と対応
  - 燃料供給設備（揚運炭設備、貯炭場）、[備蓄タンク、パイプライン]
  - ガスタービン、補機
  - ボイラ、排熱回収ボイラ、蒸気系統
  - 蒸気タービン、補機
  - 冷却水系（復水器、冷却水ポンプ、取水口など）
  - 通風排煙設備（環境装置[脱硫、集塵など]から煙突）
  - 受電・送電設備、非常用電源
  - 事務棟、建屋設備[エレベータなど]
  - 通信設備[衛星電話、ページングなど]
  - 岸壁、構内道路



アンケート依頼した9プラント全てから回答を頂いた。

**発電プラント全体について**

1. 従業員の避難状況
  - 所内従業員へは所内放送、携帯電話、構内拡声放送により連絡し、津波襲来前に避難完了
  - 二次災害(電源室の火災)の対応(消防の誘導)のため逃げ遅れた事例が1件
  - 主にタービンフロアに避難
2. 災害発生時の対応状況
  - 初動体制：1~2名 - 4プラント, 10~25名 - 3プラント, 60~70名 - 2プラント
  - 非常時対応マニュアルはないが、定期的に訓練が実施されていた。
  - 固定電話、携帯電話つながらず。保安電話、可搬式衛星回線電話が有効。電源確保が課題
  - 固定式衛星回線電話で浸水によって使えなくなった事例あり。
  - 非常食、飲料水が長期的には不足。
  - 排水設備の損壊でトイレを使えなくなったプラントあり。
  - 二次被害(電源室の火災)の事例あり。
3. 感震装置は有効であった。

二次被害を想定した対応マニュアルが必要

被害状況の要因別整理

**地震の揺れ**

構成要素	1	2	3	4	5	6	7	8	9
燃料設備	A	A	A	A	A	A	B	A	B
ガスタービン	B	-	-	-	-	-	A	-	-
ボイラ	B	B	B	B	B	B	A	C	B
蒸気タービン	B	A	B	A	B	A	B	A	B
冷却水系	A	A	A	A	B	B	A	B	A
通風排煙設備	A	B	A	A	B	B	A	B	A
受電・送電, 非常用電源	A	A	A	A	B	A	A	B	A
その他									
事務棟, 建屋設備	B	B	B	B	A	B	B	A	A
通信設備	A	B	A	A	A	A	B	A	A
岸壁, 構内道路	A	B	A	B	C	A	A	A	A

缶左右ケージ壁貫通亀裂  
地割れ, 陥没, 湾曲

**システム構成機器の被害状況**

**回答内容**

↓  
個々の設備, 構成機器に対して詳細なデータ

**被害の程度の分類**

- A : 損傷無し
- B : 軽微な損傷 (少しの部品交換で修理)
- C : 重度な損傷 (基礎をやり直す, 多くの部品交換)
- D : 再使用不可能

**被害の要因**

- a. 地震の揺れ
- b. 津波
- c. 液状化, 地盤沈下
- d. 複合的要因

被害状況の要因別整理

**津波**

揚炭機破損, パイプライン, ベルトコンベア破損  
タンク破損 等

構成要素	1	2	3	4	5	6	7	8	9
燃料設備	B	B	D	D	C	C	B	C	A
ガスタービン	B	-	-	-	-	-	A	-	-
ボイラ	B	B	B	C	A	A	B	A	A
蒸気タービン	A	C	B	C	C	A	A	A	A
冷却水系	B	C	C	C	C	C	B	A	A
通風排煙設備	A	B	B	D	A	A	B	A	A
受電・送電, 非常用電源	B	B	C	D	B	C	A	A	A
その他									
事務棟, 建屋設備	B	B	C	D	A	A	B	A	A
通信設備	B	B	C	C	A	A	B	A	A
岸壁, 構内道路	B	B	C	C	A	B	B	B	A

補機浸水, BFPT浸水  
潤滑油系統停止 軸受け損傷,  
タービン翼とシュラウドの一部接触 } サービスビル浸水



- 被災発電所の早期復旧
- 稼働率の増大
- 定期検査などの短縮
- 長期定期計画停止中プラントの再稼働

- 横須賀発電所 3号機 (1964年5月運転開始) **47年10カ月**  
35万kW 汽力発電 (重油, 原油)
- 4号機 (1964年7月運転開始) **47年8カ月**  
35万kW 汽力発電 (重油, 原油)
- ガスタービン1号機 (1971年7月運転開始) **40年8カ月**  
3万kW ガスタービン (軽油)
- ガスタービン2号機 (2007年9月運転開始) **4年6カ月**  
14.4万kW ガスタービン (軽油, 都市ガス)
- 常磐共同火力 6号機 (1955年12月運転開始) **56年3カ月**  
勿来発電所 17.5万kW 汽力発電 (重油)

5. 小型発電設備の大量導入

- 千葉発電所 **100.2万 kW** **東京電力 合計:284.36万 kW**  
➢ ガスタービン (33.4万kW, MHI) × 3台 (2011年8 ~ 9月) **コンバインド化を検討**
- 姉崎発電所 **0.56万 kW**  
➢ ディーゼル (0.14万kW, 現代) × 4台 (2011年4月)
- 袖ヶ浦発電所 **11.22万 kW**  
➢ ガスエンジン (0.11万kW, アグレコ) × 102台 (2011年6 ~ 7月) **リース**
- 横須賀発電所 **32.96万 kW**  
➢ ガスタービン (2.63万kW) × 7台, (2.32万kW) × 3台  
(2.53万kW) × 3台 (2011年6 ~ 7月) **リース**
- 川崎発電所 **12.8万 kW**  
➢ ガスタービン (12.8万kW, MHI) × 1台 (2011年8月)
- 鹿島発電所 **80.4万 kW**  
➢ ガスタービン (26.8万kW, GE) × 3台 (2012年7月) **コンバインド化を検討**
- 大井発電所 **20.9万 kW**  
➢ ガスタービン (12.8万kW, MHI) × 1台,  
(8.1万kW, GE) × 1台 (2011年8月)
- 常陸那珂発電所 **25.32万 kW**  
➢ ガスタービン (2011年7月)  
➢ ディーゼル

電気新聞 2011年 12月 7日 (水)より抜粋

地震の影響

- 地震による設備被害はほぼ見られず。
- 地震発生時に発電プラントは速やかに安全に停止し、タービン、ボイラの主要機器の被害は小さかった。
- 地震発生時の所員への連絡・避難は適切
- 火災発生事例, 人的事故発生事例 } **二次災害を想定した対応マニュアルが必要**
- 道路陥没など復旧の妨げ
- 送電線などに被害 **阪神淡路大震災の経験が活かされた耐震設計は概ね良好、さらなる改善へ**

津波の影響

- 波力による被害 → 揚炭機, 燃料タンクなど海岸沿いの設備
- 浮力による被害 → 電気集塵機, 誘引通風機など排気設備
- 浸水による被害 → **非常用電源**, 電力機器, 冷却水用海水ポンプ
- 人的事故発生事例 **非常用通信手段の確保, 多様性が必要**  
**非常用電源は設備のためだけでなく, 非常用通信, 所員安全確保に重要である**

液状化, 地盤沈下の影響

- 地盤改良, 基礎杭を打った建造物に被害なし
- 燃料運搬設備, 送受電設備に被害
- 土砂の堆積, 道路陥没など復旧の妨げ

**地震発生時**

- 地震の揺れによる設備被害は大きくなかった。補修で済む程度
- 地震発生時に、発電プラントは速やかに安全に停止し、タービン、ボイラの被害は、小さかった。

**地震発生後**

- 発電所の努力によって**早期復旧**が達成された。
- 原子力発電所の停止分を火力発電がカバーしている。

