

## 連携記事

# 日本でも最も環境に優しく、信頼性が高く、コストの低い発電所の実現を目指して

—住友金属鹿島火力発電所の挑戦—

How did we Restore the Sumitomo Metals Kashima Thermal Power Station from The Tohoku Region Pacific Coast Earthquake ?

谷口寿朗

Toshiro Taniguchi

住友金属工業（株） 鋼板・建材カンパニー  
IPP事業部  
発電管理室長

## 1 概要

住友金属鹿島火力発電所（以下、発電所）は、2007年6月から営業運転を開始した石炭火力発電所である（写真1）。東京電力（株）と15年間の卸供給契約を締結し、発電した電力の全量を卸売りしている。出力は47万5千kWで、これは一般家庭125万世帯で使用する電力に相当する。

発電所の建設に際しては、環境への配慮を重点的に行った。具体的には、まず大気汚染対策として排ガス中NO<sub>x</sub> 15ppm以下、SO<sub>x</sub> 25ppm以下、煤じん5mg/Nm<sup>3</sup>以下と石炭火力として国内最高レベルとした。基礎掘削の際に発生する残土は、廃棄処分せずに発電所を取り囲む緑化マウンドに活用した。緑化マウンドは、緑地率確保のほか、騒音遮蔽、粉塵飛散防止にも役立っている。緑化マウンドの効果もあり、敷地面積14万m<sup>2</sup>のうち、51%が緑地である。

CO<sub>2</sub>削減のため、超臨界圧ボイラを始め高効率の機器を採用することで、国内最高レベルの発電効率42.5%（HHV）を達成した。さらに、運転開始後に検討を加え、製鉄所内で使



写真1 住友金属鹿島火力発電所全景

用した木材パレットを粉碎した木材チップや、近隣の飲料工場で発生したコーヒー粕をバイオマス燃料として活用している。バイオマス燃料活用で石炭使用量が減少することで、2011年度は年間7千トンのCO<sub>2</sub>を削減することができる見込みである。

## 2 地震発生後の状況と設備被害

### 2.1 初期避難

2011年3月11日14時46分、東日本大震災が発生。発電所の所在する茨城県鹿嶋市でも震度6弱の大きな揺れが長く続いた。事務所及び発電所構内で働いていた従業員・関係会社社員は、直後に発令された大津波警報を受け、タービン建屋3Fの中央操作室へと避難し、全員の無事を確認できた。

### 2.2 プラントの挙動

発電プラントとしては地震の第一波に耐え、東日本の系統周波数の低下に伴って14時46分にガバナフリー動作による出力上昇動作に入り、発電端出力が地震前の486MWから527MWに大きく増加した。（ガバナフリー動作とは、電力系統全体の瞬間的な電力不足を補うため、電力不足によって生じた周波数低下を検知した発電所が出力を増加させる自動制御のこと）

14時48分頃から、タービン軸の振動、特にタービン第4軸受の振動が大きくなった。これは、今回の地震の特徴である長い揺れの影響と考えられる。14時49分、「タービン軸振動大（振動値250μm超過）」でタービントリップ。発電が停止した（図1）。

ボイラ側の挙動をみると、ガバナフリー動作により短時間で大量の蒸気をタービンに供給したため、14時47分頃から

主蒸気圧力がゆるやかに低下している。14時48分、今度はタービントリップにより主蒸気止め弁を閉止したことで急激に圧力が上昇、主蒸気圧力が26.9MPaを超過したため、非常用蒸気逃がし弁(PCV)が作動した。その後、ゆるやかに圧力が低下しており、これはPCVからの蒸気放出に相当し、蒸気管破損による蒸気漏れはなかった(図2)。

タービン・ボイラに付帯する機器は、タービントリップに伴う自動停止シーケンスが動作し、機器保護のために必要な冷却系などは冷却を継続し、止まるべき機器は正常に停止した。回転機器の振動・温度等はほぼ正常であった。また、各

種制御装置・運転履歴システム・遠隔監視モニタも正常に動作しており、通常の監視操作が可能であった(表1)。

### 2.3 津波の状況

15時30分頃、鹿嶋港に津波が到達、中央操作室から見える南防波堤がほぼ水没した。しかし、発電所前面の沿岸防波堤を越流することはなく、発電所敷地は無事であった。しばらくすると海水水位が低下してきたため、空引き運転で破損しないよう海水ポンプを停止した。発電所の海水ポンプ水位で見ると、30分程度の周期で±4～5m程度の水位変動があった

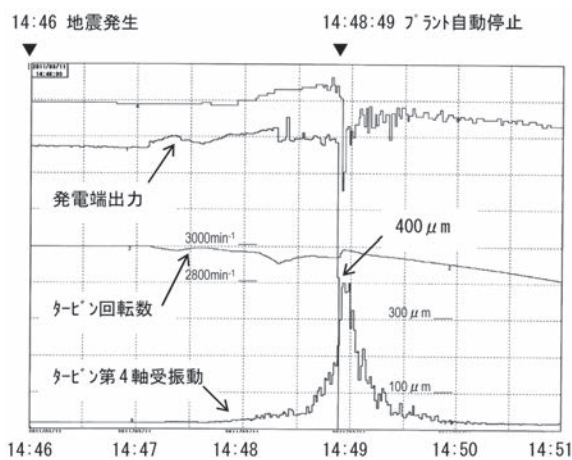


図1 タービントレンド

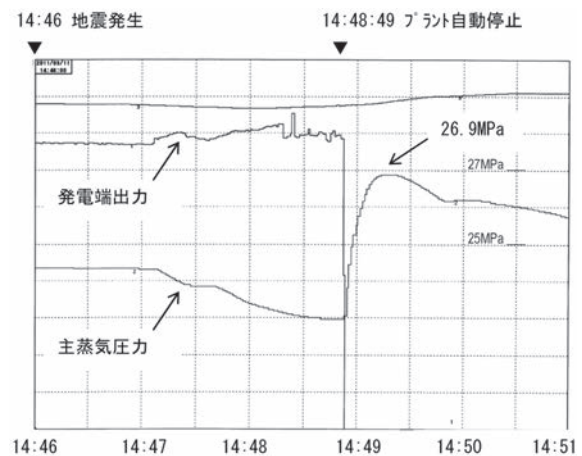


図2 ボイラトレンド

表1 地震発生直後の状況

| 日時                 | 状況                                                                                                                                                                                                                       | 特記                                                                                                                                                                                  |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2011.3.11<br>14:46 | 三陸沖で M9.0 の地震発生                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                     |
| 14:47              | 系統周波数の低下 (50Hz 地域発電所停止) に伴いガバナフリー動作により出力上昇                                                                                                                                                                               | 発電端出力 486MW→527MW(ピーク)<br>全 CV 全開                                                                                                                                                   |
| 14:48              | タービン軸受振動大で<br>プラント自動停止<br><br>・タービン軸受振動大<br>自動停止値: 250 μm<br>振動値最大: 400 μm(第4軸受)                                                                                                                                         | 自動停止動作: 全て正常に動作<br>タービン: 各主要弁緊急閉止、油ポンプ運転継続、<br>海水ポンプ運転継続<br>ボイラ: 微粉炭機停止、BFP 停止、PAF 停止、<br>FDF・IDF 運転継続 (炉内バージ、冷却)<br>脱硫: 吸収塔循環ポンプ運転継続 (ライニング保護)<br>主蒸気圧力: 26.9MPa まで上昇、PCV 1 台動作後降下 |
| ～                  | プラント自動停止中の設備状況<br>①タービン各軸受振動 : 地震時のみ振動上昇、その後正常値に復帰<br>各軸受温度 : 異常上昇なし<br>スラスト位置・伸び差: 異常変化なし<br>回転数降下時間 : 過去と同様<br>②ボイラ<br>各部流体温度: 最高使用温度を超えたが短期許容温度範囲内<br>各部圧力 : 急変なし<br>③補機<br>各軸受振動: 地震時のみ上昇、その後正常値に復帰<br>各軸受温度: 異常上昇なし |                                                                                                                                                                                     |
| 16:01              | 津波(引き波)によりポンプ井水位低下したため、海水ポンプ手動停止<br>ポンプ井最低水位 : YP-6000<br>海水ポンプ吸込口レベル: YP-6160<br>(水位変化: 図3)                                                                                                                             | 海水ポンプ停止による影響<br>軸冷水温度・油温度 : 変化なし<br>タービン低圧排気室: 補給水補給・ブローで冷却<br>タービン真空度 : 変化なし (真空破壊済み)                                                                                              |

ことが分かる (図3)。

津波は鹿嶋港の内部に入るにしたがい水高を増した。鹿島製鉄所の原料バースでは、荷役中の原料船が漂流、その際に荷揚げ設備 (アンローダ) が損傷した。港湾奥では津波が上陸し、一般住宅や商業設備が広く浸水したほか、貨物コンテナや自動車 that 流されるなどの被害が広く発生した。

2.4 地盤の状況

発電所は、鹿島製鉄所の海側に位置し、敷地は全て埋立地である。周辺の埋立地では、液状化現象による噴砂や地割れ、電柱や建築物が傾く等の被害が多く発生した。発電所における地盤変動によるトラブルとしては、①石炭コンベア基礎、石炭スタッカリクレーマ レールの蛇行、②循環水配管 (冷却用海水引き込み配管) が埋設されている場所での地盤沈下、③工水配管・飲料水配管の破損 (発電所外部) が発生した。しかしながら、発電所主要設備での地盤沈下や構内道路の損傷等の被害はなく、早期立ち上げに寄与した。

2.5 設備被害

発電設備の主な損傷個所を表2に示す。蒸気配管の噴破や高圧電気設備の電気事故など致命的な被害はないものの、GAH (排ガスの余熱回収装置) やEP (電気集じん器) では、排ガス漏れにつながりかねない損傷があり、送電再開までに修理が必要であった。また、石炭搬送系は、地盤の変動で基礎やレールが蛇行・変形するなど大きな損傷があり、これも送電再開までに修理が必須であった。このほか、地震の振動による被害として、地震受け金物の曲損や防振器の破損などが多く発生した。これらは発電に直接かかわる部品ではないが、放置すると余震の被害を拡大する可能性があるため、早期修理を実施した。電力供給を急ぐため、ボイラ・タービンを開放しての内部点検はせず、目視点検に留めた。

3 設備補修内容

3.1 送電再開までの補修内容

発電所の早期復旧に対する課題として、まず、石炭搬送系統があげられた。600mもの石炭ヤードに沿って、石炭搬送コンベアとスタッカリクレーマ (以下、SR) が設置されている。石炭ヤードの地盤が緩んだことで、本来直線であるコンベアが全体的に動き、左右方向に最大480mm、高さ方向に最大300mmのズレが生じた。SRのレールも同様に蛇行したうえ、左右のレールが別々の動きをしたことで、場所によっては100mmほど間隔が狭くなっていた (写真2)。

表2 発電設備の主な損傷ヶ所

|      | 主な損傷ヶ所                                                                                                             | 補修方針                       |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| ボイラ  | ①地震受け金物曲損 [4箇所]*<br>②脱硝入口煙道サポート曲損、ボルト破断 [6箇所]<br>③バンパー柱ねじれ、へこみ<br>④主配管防振器破断 [6台]*<br>⑤管寄振止金物変形 [2箇所]<br>⑥最終過熱器管損傷* | C<br>C<br>C<br>C<br>A<br>B |
| GAH  | ①高温側バイパスシールめくれ [2箇所]                                                                                               | A                          |
| EP   | ①集じん板上部止め金物ボルト脱落<br>②集じん板上部・中間スベサ外れ                                                                                | A<br>A                     |
| GGH  | ①スートブロワ ランステューブ脱落 [11本]                                                                                            | A                          |
| 煙突   | ①制振装置油圧ダンパ折損 [3本]<br>②制振装置カウンターウェイト外れ*<br>③電線破断 [2本]                                                               | C<br>C<br>A                |
| タービン | ①制御空気管接続部外れ [2箇所]<br>②内部車室ハンドホール蓋脱落*                                                                               | A<br>B                     |
| 石炭搬送 | ①石炭コンベア基礎蛇行*<br>②フレーム架台変形<br>③スタッカリクレーマ レール蛇行*                                                                     | A<br>A<br>A、C<br>に分割       |
| 海水配管 | ①地盤沈下 (陥没) *                                                                                                       | A                          |
| 灰輸送  | ①灰輸送管フランジずれ [18箇所]                                                                                                 | C                          |
| その他  | ①工水、飲料水供給停止                                                                                                        | A                          |

\*: 次項で個別説明  
A: 運転再開までに修理必須、B: 別途停機時に修理、C: いつでも修理可

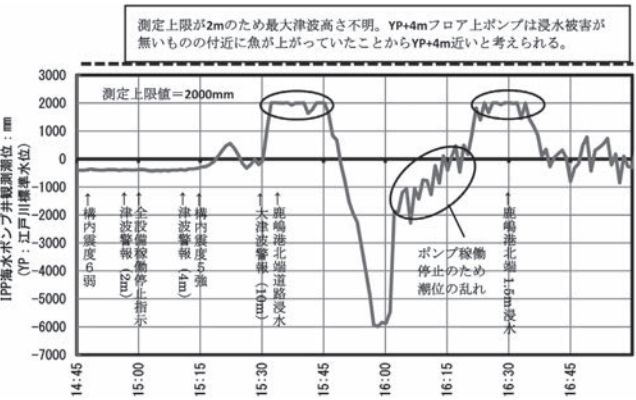


図3 発電所海水取水所における津波水位



写真2 湾曲した石炭コンベア・SRレール



石炭コンベアについては、基礎150箇所中90箇所について高さ・左右ズレの調整が必要であったため、ひとつひとつ異なる沈み込み量・ズレ量に合わせてH形鋼を加工し、基礎から立ち上がるスタンドに継ぎ足していく工事を実施した(図4)。

SRレールについては、552mに亘って精度よくレールの軌道を復旧する必要があった。高さが適正になるよう枕木の下部に碎石を補充しながら、レール・枕木の配置を修正する。測量しながらの調整が必要なものもあって石炭コンベアの修理よりSRレール補修が遅れてしまう。そこで、全体を3ブロックに分け、当面の石炭運搬に必要な南側のみを先行、残りは運転再開後に継続修理を行うこととした。しかしながら、当面の石炭が置いてある場所の被害が最も大きかったこともあり、このレール補修がクリティカル工事となった。

そこで、レール補修完了を待たず発電再開するための方法を検討した。当発電所に石炭を運ぶ方法は3通りある。通常使用するのはSR、予備として製鉄所側のホイールローダー(これはSR以上に地震被害を受けていた)、3番目が石炭緊急投入装置、これは2008年に強風低気圧の影響でSR・WLの運転に支障が出たことへの対策として設置された設備で、トラックをピストン輸送して石炭コンベアに石炭を乗せることで、緊急避難的に石炭を投入できるようにした設備である。数台のダンプとショベルカーを連続的に運転して、石炭を投入する必要があるため、長期間の使用は難しいが、石炭コンベアの修理が完了してSRの修理が完了するまでの2日間は、この設備を活用することで、工程短縮を図った。

次に、工業用水ラインである。発電所で使用する工業用水は、鹿島製鉄所から受け入れているが、鹿島製鉄所本体としても大きな地震被害を受けており、設備だけでなく、道路・ユーティリティ(海水系統、工水系統、各種ガス系統)が寸断されている状況であった。補修すべき箇所は数多くあり、安全面・設備保安面・重要性などから順位をつけて修理を行っ

ており、発電所の運転再開に必須のラインは優先順位を上げて対応した。

各地で震災復旧工事が始まり、工事の作業者を確保するのが困難な時期であったが、これには、製鉄所の総力を結集することで対応した。

これらの工期短縮調整により、3月中の発電所復旧という目標に対し、3月25日送電再開という復旧工程を策定、計画通り25日16時58分に送電を再開し、翌午前0時57分に100%負荷である47万5千kWを出力した。

### 3.2 送電再開後の補修内容

送電再開後も継続して設備補修を行い、停機が必要な項目は、定修を待って施工した(定修は当初4月に予定されていたが、電力事情が安定するのを待って5月に延期して実施)。送電再開後及び定修で実施した補修内容をいくつか紹介する。

#### 3.2.1 ボイラ地震受け金物曲損

高さ67mの石炭炊きボイラは熱による伸びを吸収するため、天井から吊るされた形となっている。ボイラが地震で揺らされる際に、揺れを抑制する地震受け金物が4か所で曲損した。発電には支障ないものの余震の被害が拡大する恐れがあるため、交換部品が届き次第、更新した(写真3)。

#### 3.2.2 ボイラ主配管防振器破断

上記同様、蒸気配管の揺れを防止する防振器が、設定以上の揺れを吸収したため破断した。ボイラ6F及び9Fフロアの高温再熱蒸気管用防振器4台及び給水加熱器管用防振器2台が破断し、新作品に更新した(写真4)。

#### 3.2.3 ボイラ最終過熱器管損傷

ボイラ内部に吊るされた最終過熱器とボイラ本体の接点に

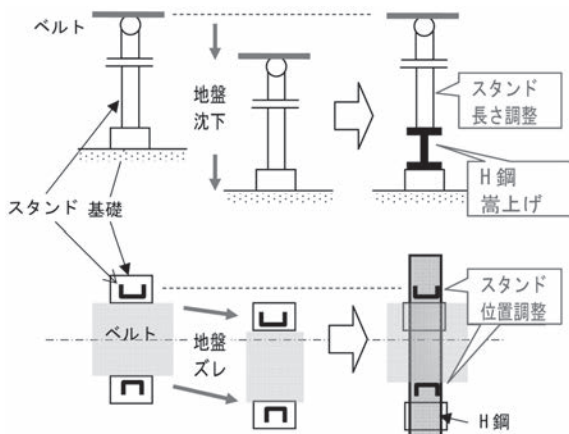


図4 コンベア高さ・通り調整



写真3 ボイラ地震受け金物

当たる天井貫通部を点検したところ、荷重支持管天井貫通溶接部の割れを確認した。蒸気管そのものが損傷し、蒸気漏れを起こしている場合、交換のために長期間の停機を必要とするが、目視及び停機時の蒸気圧力挙動から蒸気管そのものの損傷には至っていないと判断した。3月の仮補修では、缶前側・缶後側両方のスリーブとクラウン天板を溶接して再起動することとした(写真5)。

荷重支持管天井貫通溶接部の破損により、最終過熱器タイロッド部に過大な荷重がかかっていると想定されたため、5月の定修でボイラ内を点検しタイロッド部を確認したところ、缶前側タイロッド部に亀裂を発見した。放置すると蒸気管の損傷に至るため、あらかじめ用意した新作タイロッドと交換を行った(写真6)。

### 3.2.4 煙突制振装置損傷

180m煙突の最上部に位置する制振装置内部にある油圧ダンパー及びカウンターウェイトが損傷した。その一部は地上に落下し、事務所のすぐ横で発見された。写真は中間階に落下したカウンターウェイトである(写真7)。



写真4 高温再熱蒸気管用防振器



写真5 最終過熱器管缶前側荷重支持管天井貫通溶接部

### 3.2.5 低圧タービン内部車室ハンドホール蓋脱落

6月頃、プラント効率が若干低下していることが分かり、機器別の効率を精査したところ、低圧タービンで何らかの効率低下が起きていることが判明した。更に検討を進めた所、タービン内部で何らかの蒸気漏れが発生している可能性が高まった。そこで、タービン外部車室をサーモビュアで温度測定し、温度分布を確認することで内部車室ハンドホールが破損または脱落していることを特定した。夏季需要期が落ち着いてから開放点検し、ハンドホールの交換を実施した(写真8)。



写真6 最終過熱器管タイロッド部

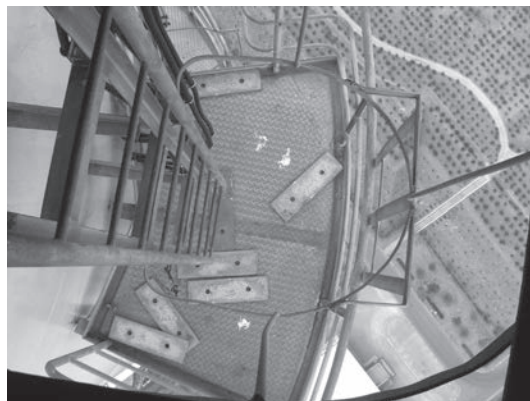


写真7 中間階に脱落した制振装置カウンターウェイト

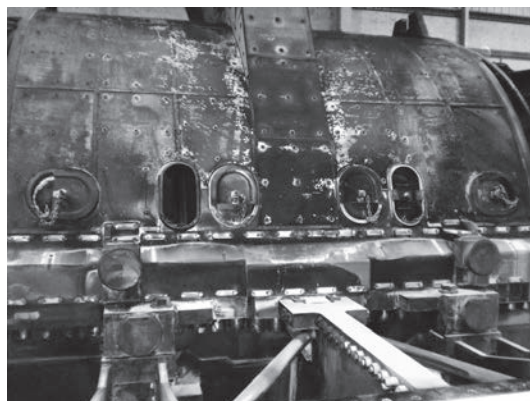


写真8 低圧タービン内部車室外観

### 3.2.6 循環水管地盤補強

循環水管（タービン蒸気の復水に使用する冷却用海水の配管）が交差する箇所で地盤沈下が発生した。埋設管理め戻し土の強度不足と考えられるため、硬化剤の高圧噴射工法で地盤改良を行った（図5）。

## 4 環境取り組み

### 4.1 バイオマス発電の推進

発電所の環境取り組みの一環として、石炭を燃料とする際に発生するCO<sub>2</sub>を削減するため、植物由来のバイオマス燃料を活用した「バイオマス混焼発電」に取り組んでいる。2009年度から、製鉄所で使用した木材パレットの燃料利用を開始し、また2010年度からは、大手飲料会社と提携することで、缶コーヒーの製造過程で発生するコーヒー粕を石炭代替燃料として活用している。

具体的には、原料となるコーヒー粕を飲料メーカーから購入し、石炭ヤードで石炭と混ぜ合わせた後にボイラ内で完全燃焼させる（図6）。

コーヒー粕の特徴として、高水分のため発熱量としては小さいものの、高揮発分で燃えやすく、灰分が少ないことなどがあげられる（表3）。2011年度は、年間約1万2千トンのコーヒー粕を混焼し、これにより、年間約7千トンのCO<sub>2</sub>排出量を削減することができた。

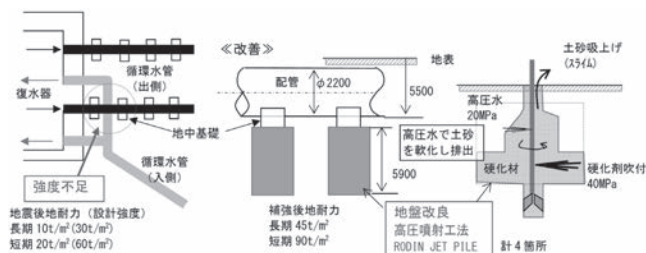


図5 循環水管補強

表3 コーヒー粕の特徴

|               | 石炭      | コーヒー粕   | 高水分のため発熱量が小さいが高揮発分で燃えやすく、低灰分 |
|---------------|---------|---------|------------------------------|
| 総発熱量[kcal/kg] | 約 6,500 | 約 2,000 |                              |
| 水分[%]         | 10      | 65      |                              |
| 灰分[%]         | 13      | 1       |                              |
| 揮発分[%]        | 27      | 29      |                              |

### 4.2 発電所ゼロエミッション

発電所では、年間約120万トンの石炭を利用しており、その副産物として約13万トンの石炭灰と約3万トンの脱硫石膏が発生する。このうち石炭灰は主にセメント原料として、石膏は石膏ボードまたはセメント原料として全量リサイクルし、発電所のゼロエミッションを実現している。しかしながら、近年国内のセメント生産量は伸び悩んでおり、セメント原料の需要も減少している。路盤材や建材向けとして新たな需要の発掘に取り組むことで、今後とも副産物ゼロエミッションを堅持するよう努めたい。

## 5 電力安定供給に向けて

住友金属鹿島火力発電所としては、運転開始時に「日本で最も環境に優しく、信頼性が高く、コストの低い発電所を実現すること」という事業部ビジョンを掲げ、①安全最優先、②環境保護、③電力の安定供給、④低コストの実現、の4つの価値を意識して運営してきた。

東日本大震災後、長年当たり前だと思われてきた日本国内の電力安定供給体制に不安が生じた。そんな中、我々住友金属鹿島火力発電所としては、電力供給体制の一翼を担うものとして、最短の補修期間で復旧し、安定的に電力を供給するよう努めてきた。復旧以降も震災影響とみられるトラブルが断続的に続いているものの、4月から実施する定検期間内に可能な限りの補修作業を実施し、信頼性の高い電力供給に努めたい。

(2012年2月20日受付)

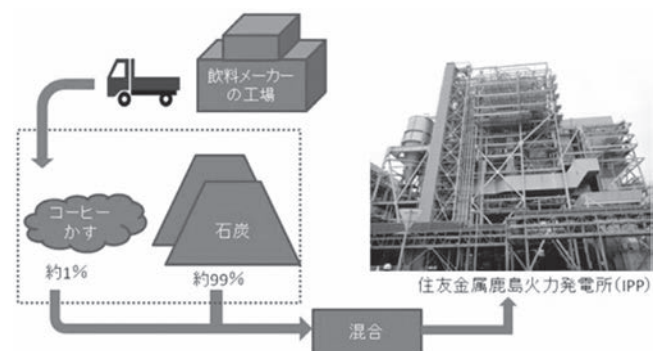


図6 コーヒー粕を利用したバイオマス発電の流れ