

地熱発電所運転データ解析システムの開発

(Development of plant performance analysis system for geothermal power station)

中尾 吉伸^{*1} ・ 進藤 一種^{*2} ・ 中木 仁^{*2} ・ 高橋 徹^{*1}
(Y. Nakao) (I. Shindou) (J. Nakaki) (T. Takahashi)

地熱発電分野では、要素機器の経年劣化や蒸気条件の変化などによるプラント性能の低下が深刻な問題となっているが、プラント性能解析手法が未だ確立されておらず、性能回復施策による効果を定量的に評価することができない。そこで、当研究所で開発した各種発電システムの熱物質収支解析を行うプログラム「EnergyWinTM」を地熱発電所向けに改良して、実運転データを基にしたプラント性能解析を半自動的に行う「運転データ解析システム」を開発し、東北電力㈱澄川地熱発電所に適用した。

Geothermal energy is considered as one of the renewable energy and comparatively abundant. The geothermal power generation system has little environmental impact (0.015kg-CO₂/kWh), and it is expected to help to remove carbon dioxide emissions to the atmosphere. In our institute, we have developed general-purpose software (EnergyWinTM) by which static thermal characteristics of power generation systems can be analyzed easily and quickly. It can analyzed the plant performance, and investigate the influence of each component's performance loss or of atmospheric conditions changes on power output quantitatively. We have developed a new plant performance analysis system using actual operation data for geothermal power station. Then, applied the system to Sumikawa Geothermal Power Station, we have evaluated the plant performance before and after periodic inspection.

1. はじめに

当研究所では、発電システムの熱物質収支解析プログラムの開発を進めており、これまでに「発電システム熱効率解析汎用プログラム」(以下、EnergyWinTM)を開発し、国の新型発電システム開発プロジェクトなどにおいて新型発電システムの解析、比較評価、および最適化などに活用してきた[1]。また、既設火力発電所の熱物質収支解析も可能であり、プラント構成機器の性能把握、プラント効率の低下要因の解明などに活用してきた[2]~[4]。さらに、これまでに培ってきた熱効率解析・評価技術を活用して本プログラムに改良を加え、ユーザサイドで運転中のプラントの内部状態を明らかにして各要素機器の状態を把握することでプラント効率低下要因の解明と定量的評価を行い、運用の改善、さらには的確な保守・管理設計の策定を行えるようにすることを目的としたツールの開発を進めている。

一方、地熱発電プラントでは、要素機器の経年劣化や地熱貯留層状態の変動による蒸気条件の変化などに起因したプラント性能、発電機出力の低下が大きな問題となっており、有効なプラント性能回復施策が求められている。しかしながら、地熱発電プラントの性能評価手法は未だ確立されておらず、プラント性能回復施策を実施することによる効果を事前に評価することができない。また、東北電力㈱

では管轄内の地熱発電所の運転状態を本店でも監視するため「全地熱発電所運転データ監視・処理装置」[5](東北電力㈱本店に設置されている地熱統括センターのPC端末より、各地熱発電所のデータサーバへリモートデスクトップにてアクセスし、運転データの監視・収集を行う装置)を開発し、各地熱発電所運転データを基にしたトレンド解析を実施しているが、この解析には地熱プラントに関する専門知識を必要とするとともに、定検前後1分間データや1年分1時間データを基に解析を実施するには多大な労力を要する。

そこで当研究所では、EnergyWinを核にして、実運転データを基に、地熱発電所のプラント性能を迅速且つ容易に解析できる「運転データ解析システム」を開発した。

本稿では、本システムを東北電力㈱澄川地熱発電所へ適用した事例について報告する。

2. 発電システム熱効率解析汎用プログラム「EnergyWinTM」の概要

本プログラムは普段使い慣れたWindowsアプリケーションとして開発しており、マウスを用いた直感的な操作が可能である。

これまでに、膨張タービン、圧縮機、ポンプ、熱交換器

など、発電システムの構成に必要な不可欠である基本的な機器モデルだけでなく、既設火力発電設備、石炭ガス化炉、燃料電池などを含む 60 種類以上の定格特性機器モデルを組み込んでおり、様々な発電システムの熱効率解析が行えるものとなっている。この度、地熱発電プラントの熱効率解析を実施するため、地熱発電プラント特有の要素機器である蒸気井、直接接触式復水器、スチームエゼクタおよび冷却塔の解析モデルを新たに開発し、EnergyWin に組み込んだ。

本プログラムの特長としては、

- ・ パソコン上で利用でき、計算が高速
- ・ 同一のプログラムで様々な発電システムの計算が可能（横並び評価が可能）
- ・ 設定条件やシステム構成の変更が容易
- ・ 燃焼器出口温度を設定して空気流量を算出するなど、様々な計算条件の設定に柔軟に対応可能

等が挙げられる。

3. 運転データ解析システムの開発

3.1 澄川地熱発電所用プラント性能解析プログラムの作成

澄川地熱発電所では第二段エゼクタ及び後段冷却器を真空ポンプに置き換える改造（ハイブリッド化）工事を実施しており、現構成における設計熱平衡線図は存在しない。そこで、建設時の設計熱平衡線図を基に、タービン断熱効率及び発電機効率などの主要な構成機器の性能を算出し、現構成における熱平衡線図（基準熱平衡線図）を EnergyWin にて構築し、プラント性能を解析したところ、プラントの熱効率は 16.6% と試算された。

ここで、熱効率は次式で定義した。

$$\text{熱効率(\%)} = \text{発電機出力} / \text{蒸気井蒸気熱量}$$

このようにして作成した現構成における熱平衡線図を基に、全地熱発電所データ監視処理装置の運転データ及び定期的実施される巡視点検結果より、澄川地熱発電所の熱効率解析を連続的に実行可能な解析プログラムを作成した。性能解析に必要な機器固有値、及び、実計測が困難であるが解析条件として必要な項目等については、上述の基準熱平衡線図より推定した。

3.2 澄川地熱発電所用運転データ解析システムの構築

東北電力(株)では管轄内の地熱発電所の運転状態を本店でも監視するため「全地熱発電所運転データ監視・処理装置」を開発し、各地熱発電所運転データを基にしたトレンド解析を実施しているが、この解析には地熱プラントに関する専門知識を必要とするとともに、定検前後 1 分間データや 1 年分 1 時間データを基に解析を実施するには多大な労力を要する。

そこで本研究では、「全地熱発電所データ監視・処理装置」の発電所運転データを基にしたプラントトレンド解析を、マウス操作のみ（巡視点検時データの入力を除く）で実行可能なシステム「運転データ解析システム」を構築した。本システムの概要を図 1 に示す。「全地熱発電所データ監視・処理装置」より出力された Excel 形式の運転データより、瞬時毎の解析条件を時系列に沿って羅列した CSV 形式の EnergyWin 連続自動計算用入力データファイルを作成し、このファイルを EnergyWin に読み込ませてプラント全体の瞬時毎の熱効率を連続的に解析する。解析結果は入力条件とともに CSV 形式で出力され、発電機出力、真空度、タービン断熱効率、冷却塔能力などのトレンドグラフ、相関グラフを容易に作図することができる。なお、入力データファイルには、タービン弁開度のように、解析には使用しないがデータ整理に有用となる測定データを記載しておくこともできる。

また、EnergyWin では、入力条件設定を自由に変更することができるため、プラント性能劣化要因分析や設備改造施策事前評価等に活用することも可能である。

4. プラント性能のトレンド解析事例

平成 20 年 10 月 7 日～10 月 31 日に実施された定検の前後のプラント性能を比較・評価した事例について紹介する。平成 20 年 9 月 16 日～30 日、及び、平成 20 年 11 月 1 日～14 日の期間における 1 時間毎運転データを基に、開発した「運転データ解析システム」を用い、プラント及び主要機器性能値等のトレンド解析を実施した。以下に主要機器毎の解析結果を示す。

(1) 蒸気井

澄川地熱発電所では平成 20 年定検前後において、噴気停止・併入など、蒸気井の運用変更を実施しており、それぞ

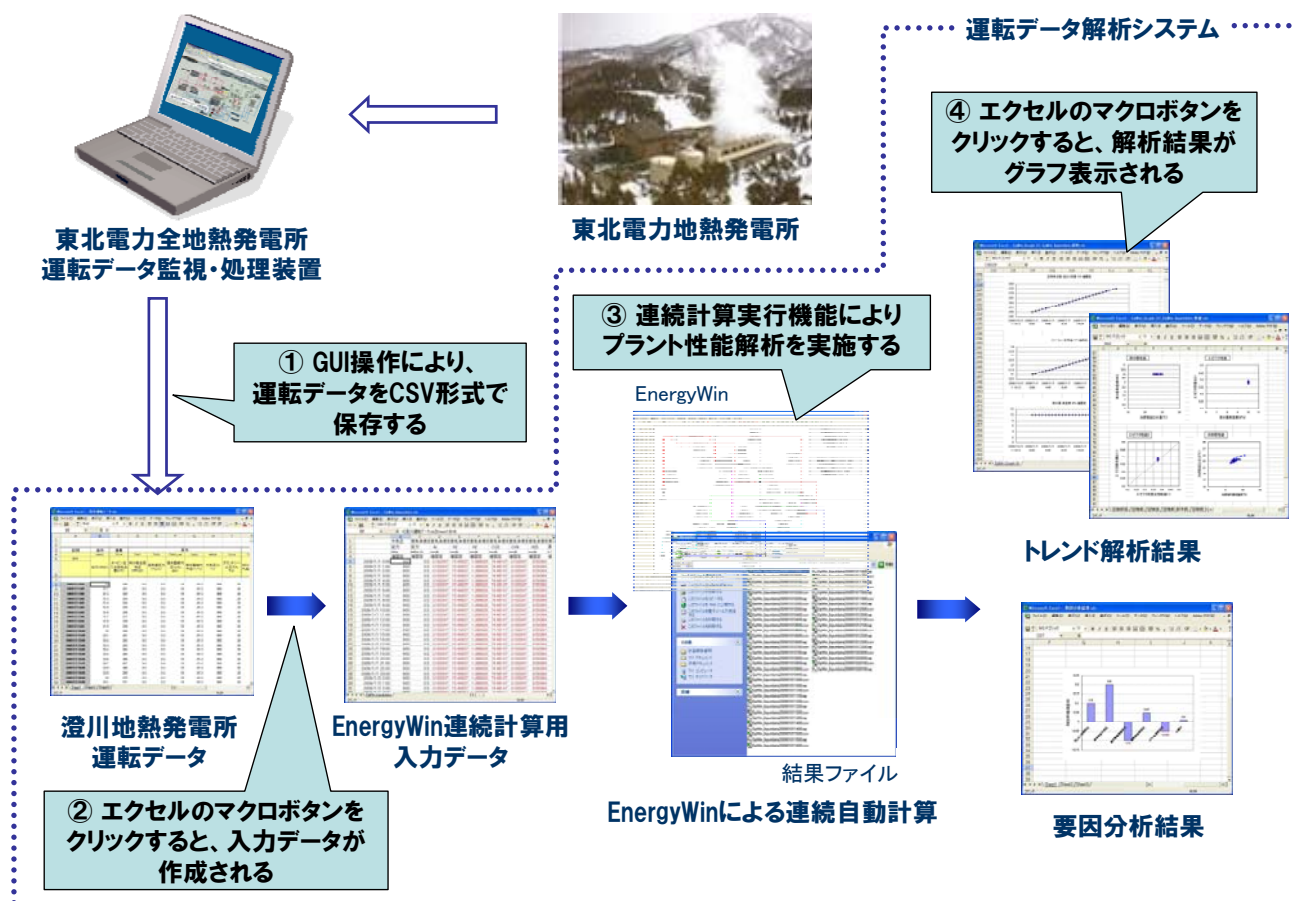


図1 澄川地熱発電所用運転データ解析システムの概要

れの期間においてプラント特性が異なることが明らかとなった。図2にMSV前蒸気圧力（≒蒸気井圧力）の経時変化を示す。図示するように、それぞれの運用形態で評価期間を区分し、トレンド解析結果を分析することとした。ここで、蒸気減圧運転を試行した11/7前後においては、MSV前蒸気圧力、及び、プラント特性に明確な違いは見られなかったことから、以降の考察に使用する評価期間は以下に示す通りとする。

【評価期間】

- 期間① ◆ : 2008/9/16 0:00 ～ 9/24 15:00
 期間② ▲ : 2008/9/24 16:00 ～ 9/29 10:00
 期間③ ■ : 2008/9/24 11:00 ～ 9/30 23:00
 期間④ ◇ : 2008/11/1 0:00 ～ 11/4 11:00
 期間⑤ ▲ : 2008/11/4 12:00 ～ 11/14 23:00

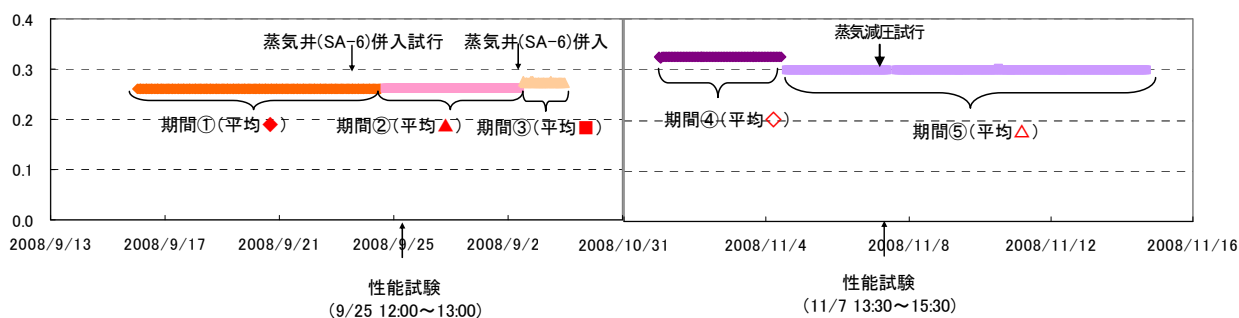


図 4.4.1-1 トrend解析結果の評価期間について
～ MSV 前主蒸気圧力 (MPaG) ～

図3にタービン流入蒸気圧力と蒸気井蒸気量との関係を示す。両者は線形比例の関係にあり、蒸気井の併入に関わらず、本解析期間ではいずれの期間においてもほぼ同様の蒸気生産特性を示すことが分かった。

(2) タービン

図4にタービン圧力比と断熱効率との関係を、図5に内部効率との関係を示す。

一般に火力発電設備では、タービンの効率は復水器真空度で整理される。しかしながら、地熱発電設備ではタービン流入蒸気圧力及び流量が変化するため、タービンの効率は圧力比との相関で整理しなければならない。図4より、期間①(◆)のみ異なる傾向を示しているが、その他の期間においては、圧力比が大きくなると断熱効率が比例して小さくなっていることが分かる。この関係は、タービン流入蒸気圧力及び流量と、季節変動に伴う真空度の変化に起因する排気損失の増減によるものであり、図5に示すようにタービン本体の性能(内部効率)は約95%でほとんど変化していない。

図4中の実線は、図3に点線で示す蒸気井特性でタービン内部効率95%とした場合における、圧力比と断熱効率との関係を表している。両者は線形に比例しており、蒸気井特性が変わらなければ同一の直線となる。期間①を除く全期間のプロットがこの関係式に近い値を示しており、このことから定検前後においてタービン性能は変わっていないと判断される。

(3) 復水器

図6に復水器冷却水温度と真空度との関係を示す。期間①～②(◆、▲)と期間③～⑤(■、◆、▲)とでは蒸気井蒸気量が大きく異なるため、復水器特性に違いがみられる。これは、蒸気井蒸気量が増加しても、同発電所においては復水器冷却水流量はほとんど変わらないため、タービン排気の復水が進まず、復水器々内圧力が上昇してしまうためである。

また、期間③(■)と期間⑤(▲)とではほぼ同じ特性を示しているが、期間④(◆)ではやや性能が悪化している。これは、運用変更や復水器の異常を示唆するものである。

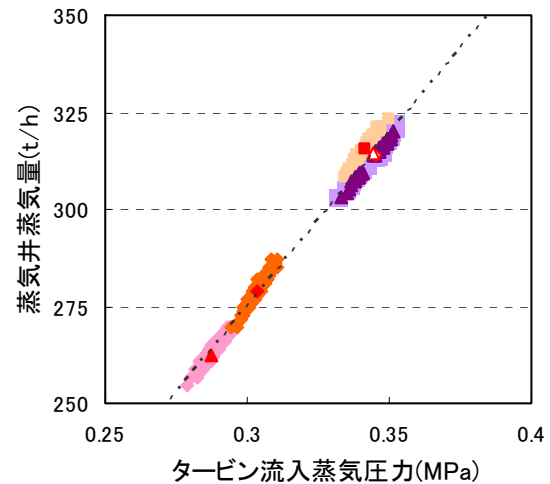


図3 タービン流入蒸気圧力と蒸気井蒸気量との関係

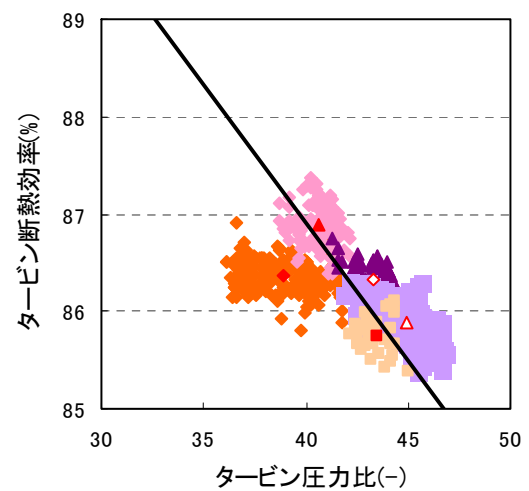


図4 タービン圧力比と断熱効率との関係

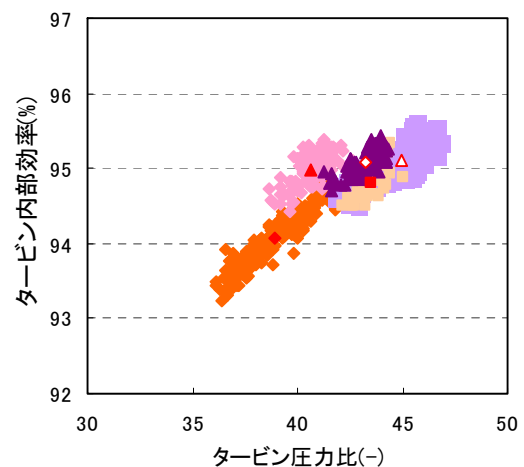


図5 タービン圧力比と内部効率との関係

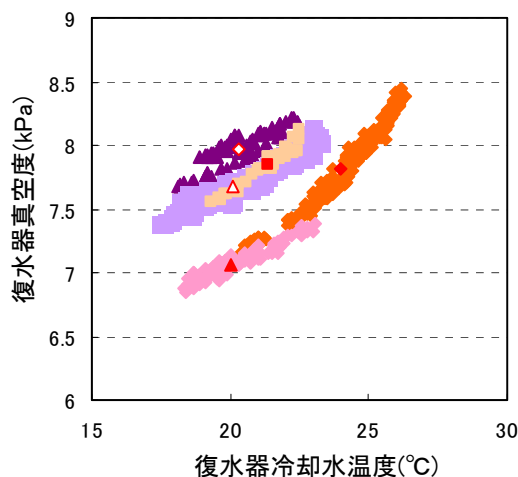


図6 復水器冷却水温度と真空度との関係

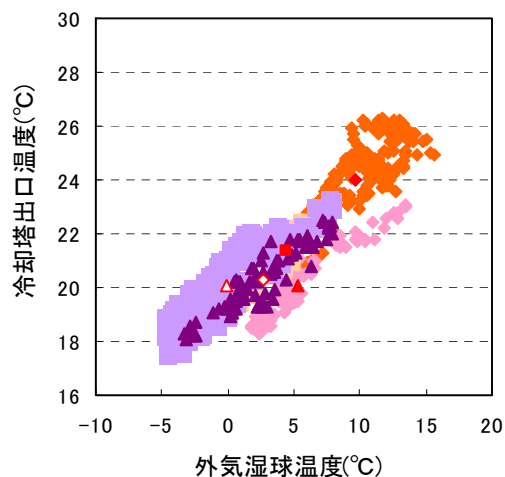


図7 外気湿球温度と冷却塔出口温度との関係

(4) 冷却塔

図7に外気湿球温度と冷却塔出口温度との関係を示す。いずれの期間においても、外気湿球温度が低くなると、冷却塔出口温度が低下する傾向にあるが、定検前後、各期間において有意な差は見られない。

図8に外気湿球温度と冷却塔能力との関係を示す。多少のばらつきはあるものの、いずれの期間においてもある程度一定の冷却塔能力を示している。また、定検前後を比較すると、定検後の冷却塔能力が定検前に比べて約10%高い傾向にあることが分かる。

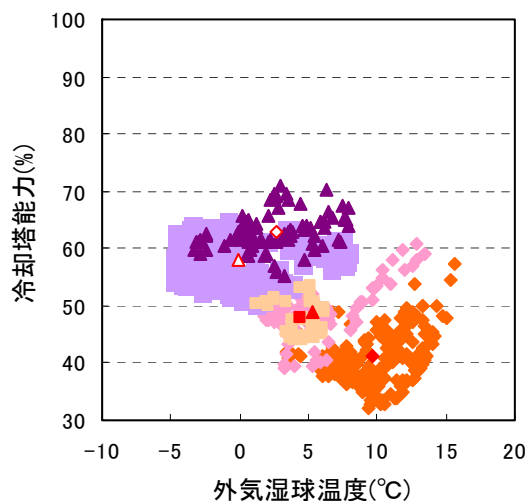


図8 外気湿球温度と冷却塔能力との関係

(5) 送電端効率

図9にタービン圧力比と送電端効率との関係を示す。両者は線形の関係にあり、圧力比が大きくなると送電端効率が向上する。定検前後を比較すると、冷却塔充填材取替が実施され、圧力損失は増大したが、冷却塔性能が向上したことによる効果の方が大きく、冷却塔送風機動力が低減したため、定検後の送電端効率がやや向上していると考えられる。

4. プラント性能劣化の要因分析事例

平成20年10月及び平成21年5月に実施されたプラント改修工事前後における各機器性能の変化がプラント性能に与える影響度を分析した事例について紹介する。

澄川地熱発電所のプラント性能に影響を与える主な要因として、以下の7つの要因が挙げられる。しかしながら、両期間では改修工事前が冬季であるのに対し、工事後は夏季であるため、外気湿球温度が工事後の方が6℃以上高い。

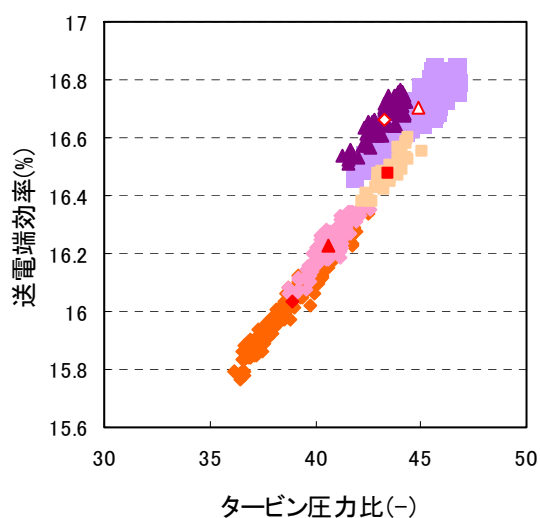


図9 タービン圧力比と送電端効率との関係

故に、両期間のプラント性能は季節変化の影響を強く受けており、トレンド解析結果より両性能値を同基準で評価することは困難である。

澄川地熱発電所では、外気湿球温度（2. 大気条件）、さらには 3.~7.のプラント性能変化要因の影響を受けて復水器真空度が変化するため、運転データより復水器流入蒸気流量及び冷却水温度との関係式（復水器特性曲線）を作成し、この関係式を用いてプラント全体が平衡状態となる復水器真空度を熱物質収支解析により算出することで、各要因に起因するプラント性能への影響度を定量的に評価した。

【プラント性能変化要因】

1. 復水器特性
2. 大気条件
3. 蒸気井特性
4. タービン性能
5. 冷却塔性能
6. 復水器冷却水量
7. 中間冷却器性能

平成 20 年定検前（2008/9/24～9/29）と平成 21 年工事後（2009/7/1～7/6）におけるトレンド解析結果平均値を用いて、各要因がプラントの熱効率及び送電端効率に与える影響度を解析した。図 10 に各要因が熱効率に与える影響度を示す。季節変動による影響、即ち、大気条件の変化による影響のため、プラント性能は約 0.12%低下している。従って、その効率低下分を除けば、工事後の熱効率は 17.09%となり、定検前の熱効率 16.95%と比較すると、熱効率は 0.14%、向上していると判断される。また、この効率向上に寄与した主要因としては、蒸気井特性の変化と考えられる。図 11 に送電端効率に与える影響度を示す。熱効率とほぼ同様の傾向を示しているが、改造工事によって冷却塔仕様が変更されたことで、プラント性能が 0.07%向上しており、定検前と比較すると、送電端効率は 0.24%向上していると判断される。

5. まとめ

地熱発電プラントの熱効率解析を実施するため、東北電力㈱保有の「全地熱発電所データ監視・処理装置」の発電所運転データを基に、当研究所開発の EnergyWin を利用してプラントトレンド解析を高速且つ簡便に実行可能な地熱発電所用の「運転データ解析システム」を構築した。

本システムを利用し、澄川地熱発電所の現時点における熱平衡線図を作成するとともに、平成 20 年定検前後及び平

成 21 年工事前後 1 ヶ月分 1 時間毎運転データを基に、本システムによるトレンド解析を実施し、要素機器（タービン、冷却塔、復水器、エゼクタ）特性を把握した。また、平成 20 年 12 月から平成 21 年 6 月までに実施されたプラント改修工事前後におけるプラント性能増減要因を分析し、要因項目及びそのプラント性能への影響度を定量的に示した。

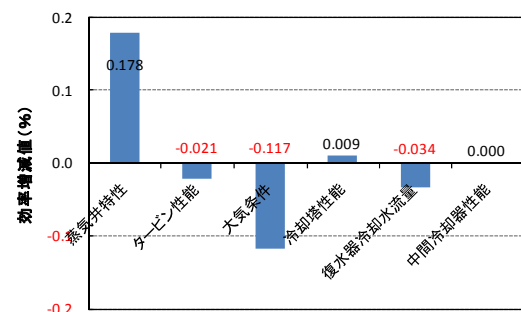


図 10 各要因が熱効率に与える影響度

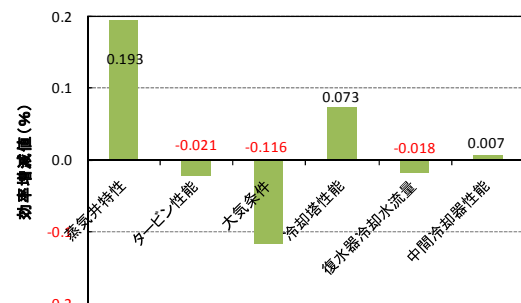


図 11 各要因が送電端効率に与える影響度

参考文献

- [1] 幸田、高橋(徹)、三巻「発電システム熱効率解析汎用プログラムの開発」電中研研究報告 W99034、2000.5
- [2] 野村、幸田、高橋(徹)「火力発電システム熱効率解析汎用プログラムの開発-発電システム熱効率解析プログラム既設実機火力発電所適合に向けた検討-」平成 15 年度火力原子力発電大会
- [3] 幸田、高橋(徹)、三巻「火力発電システム熱効率解析汎用プログラムの開発」火力原子力発電、Vol.54 No.1 pp.51-59、2003.1
- [4] 竹谷「発電システム熱効率解析汎用プログラムを用いたプラント運用改善について」火力原子力発電協会四国支部平成 17 年度調査研究発表会
- [5] 小野寺、佐々木「全地熱発電所データ監視・処理装置について」平成 18 年度火力原子力発電大会