

出國報告（出國類別：其他）

赴美國 GP、FirstEnergy、Intertek、以及
HFC 公司參訪出國報告

服務機關：核能研究所

姓名職稱：徐獻星 研究員

郭文煒 助理工程師

陳昌國 副工程師

派赴國家：美國

出國期間：104 年 5 月 30 日~104 年 6 月 17 日

報告日期：104 年 7 月 22 日

摘 要

此行核研所徐獻星研究員、郭文煒助理工程師、及陳昌國副工程師赴美國參訪 GP Strategies 公司、FirstEnergy 電力公司、Intertek 公司、以及 HFC 公司，與國外專家討論國外先進廠家於老化管理與安全評估之發展現況及實務應用，譬如：GP Strategies 公司以進階圖樣辨識(Advanced Pattern Recognition, APR)與機器診斷技術有效地偵測組件是否劣化與異常；FirstEnergy 電力公司利用該技術應用於旗下電廠，藉以改善運轉與維護模式，有效降低營運成本；Intertek 公司提供資產完整性管理服務，利用一套網路環境(Web-based)之檢視資料管理系統(Inspection Data Management System, IDMS)進行資產資訊管理，上述相關技術與實務經驗有助於國內電廠老化管理與安全評估工作之精進。

另外，HFC 公司之 HFC-6000 控制系統為第四家獲得美國核管會認可之核能級儀控平台，該系統同時也通過 IEC 61508 SIL-3 之功能安全(Functional Safety)國際認證，日前更以 FPGA 實現控制器與 I/O 模組之功能，相關開發儀控軟體之實務做法與經驗，有助於強化國內軟體驗證與確認之能力及發展。

目 錄

	<u>頁碼</u>
一、目的	1
二、過程	2
三、心得	9
四、建議事項	37
五、附錄	38

一、目的

此行核研所徐獻星研究員、郭文煒助理工程師、及陳昌國副工程師赴美國參訪 GP Strategies 能源公司、FirstEnergy 電力公司之資訊診斷評估與分析(Information Diagnostic Evaluation and Analysis, IDEA)中心、及 Intertek 公司，與國外專家研討國外先進廠家於電廠老化管理與安全評估之發展現況與實務應用。在此過程中深入瞭解國外電廠老化管理與安全評估之相關技術與經驗交流。

徐獻星後續參訪 HFC 公司，進行相關技術與經驗交流。有助於強化國內軟體驗證與確認之能力及發展，藉此擴展國際合作機會。

此出國報告分段敘述上述行程之討論過程，以及心得與建議。

二、過程

(一) 104/5/30

郭文煒、陳昌國由台北前往美國水牛城。

(二) 104/6/1~103/6/4

郭文煒、陳昌國參加電廠效率分析技術研討會。

徐獻星由台北前往美國水牛城。

(三) 104/6/5

徐獻星、郭文煒、陳昌國參訪 GP Strategies 公司。

(四) 104/6/8~104/6/9

徐獻星、郭文煒、陳昌國參訪 FirstEnergy IDEA 中心。

(五) 104/6/11~104/6/12

徐獻星、郭文煒、陳昌國參訪 Intertek 公司。

(六) 104/6/13

郭文煒、陳昌國回程，返回台北。

(七) 104/6/15

徐獻星參訪 HFC 公司，並於結束後返回台北。

核研所郭文煒、陳昌國於 104 年 5 月 30 日自桃園國際機場出發，經美國舊金山國際機場，抵水牛城國際機場，於 6 月 1 日至 6 月 4 日赴紐約州水牛城 GP Strategies 公司參加電廠效率分析技術研討會，與相關專家討論電廠效率分析技術及異常偵測技術，並了解儀控系統組件與人機界面之實務應用。徐獻星於 104 年 6 月 3 日自桃園國際機場出發，經美國舊金山國際機場，抵水牛城國際機場。6 月 5 日徐獻星、郭文煒、陳昌國參訪 GP Strategies 公司討論效能監測與改善技術，包括效能監測現況與趨勢、效能監測對電廠之效益、以及未來可合作之議題。6 月 8 日至 6 月 9 日徐獻星、郭文煒、陳昌國參訪 FirstEnergy IDEA 中心，討論與交流 FirstEnergy 公司之效能監測實務與成果。6 月 11 日至 6 月 12 日徐獻星、郭文煒、陳昌國參訪 Intertek 公司討論電廠老化管理與安全評估之技術，包括資產完整性管理(Asset Integrity Management, AIM)、循環成本(Cost of Cycling)等議題。郭文煒、陳昌國迄 6 月 4 日返國，共計 16 天。

6 月 15 日徐獻星參訪 HFC 公司討論 FPGA HFC-6000 平台發展、柴油發電機自動加載器(Diesel Generator Load Sequencer, DGLS)應用、以及未來可合作之議題。徐獻星迄 6 月 17 日返國，共計 15 天。

郭員與陳員此行赴 GP Strategies 公司電廠效率分析技術研討會，其中為期 4 天半的電廠效率分析技術研討會「進階電廠效率分析與異常偵測技術」會議議程如下：

1. 鍋爐與空氣加熱器損失與故障排除。
2. 冷凝器、飼水泵、以及飼水加熱器損失與故障排除。
3. 汽輪機(Gas Turbine)損失與故障排除。
4. 汽渦輪機(Steam Turbine)損失與故障排除。

與會人員包括：

- GP Strategies: Joe Nasal (主席), Dave McLaughlin (副主席), Jiten Deonarain, Paul Brown
- Operación y Mantenimiento La Caridad: Luis Madrid Hurtado
- Operadora De Generadoras de Energía: Isidro León Villarreal
- AID: Uk June Lee, Jeong Uk Park
- TransAlta Power Generation: Rich Casey
- Orion Energy Tech.: Frank Chen
- EcoElectrica: Juan Saavedra
- Seminole Electric Coop: Scott Whitlow
- Gas Natural Fenosa: Enrique Reyes Cotes
- Arizona Public Service: Margo Dufek
- Mitsubishi: Beatriz Blanco
- INER : Chang-Kuo Chen

另外，為期 4 天半的「基礎電廠效率分析技術研討會」會議議程如下：

1. 主辦單位 GP Strategies 公司之核心技術介紹、電廠效能實際工作內容與業界相關執行經驗。
2. 熱效率分析相關技術討論。
3. 燃料介紹與鍋爐效率討論。

4. 熱交換器與冷凝器效率分析討論。
5. 汽機結構與效率計算討論。
6. 泵浦測試討論。

與會人員包括：

- GP STRATEGIES: Jeffery Bitner(主席)、Hannah Folby
- TrabsAlta Power Generation: Ahmed Ali、Mohan Dudani
- Orion Energy Tech.: Chia-Chi Chiu
- TMPA: Jerel Stafinsky
- NBD Nanotechnologies Inc.: Andrew Whitehead
- INER: Wen-Wei Kuo

徐員、郭員與陳員此行赴 GP Strategies 公司參訪。由 Vice President, Richard R. DesJardins, PE、Vice President, Barton Hoffman、Business Development Director, Sid Sutherland、Director, Ron Griebenow, P.E.、M&D Center Manager, Jim Kuhn、Principal Engineer, Elmer Hansen, PhD., P.E.、Principal Engineer, Tedros Ghebretnsae、Senior Engineer, Tai Boon Tan, PhD.等接待。

討論以下議題：

1. 電廠效率分析技術。
2. 監測與診斷之經濟效益驗證。
3. 監測軟體 EtaPRO 介紹，包括 EtaPRO、虛擬電廠(VirtualPlant, VP)、以及進階圖樣辨識(Advanced Pattern Recognition, APR)、以及機器診斷(Predictor)。
4. 監測與診斷中心(Monitoring & Diagnostic Center)參觀，監測軟體展示，如圖 1 所示。
5. 電廠效能分析應用討論，如圖 2 所示。
6. 可合作議題討論。



圖 1. 監測軟體 EtaPRO Predictor 展示

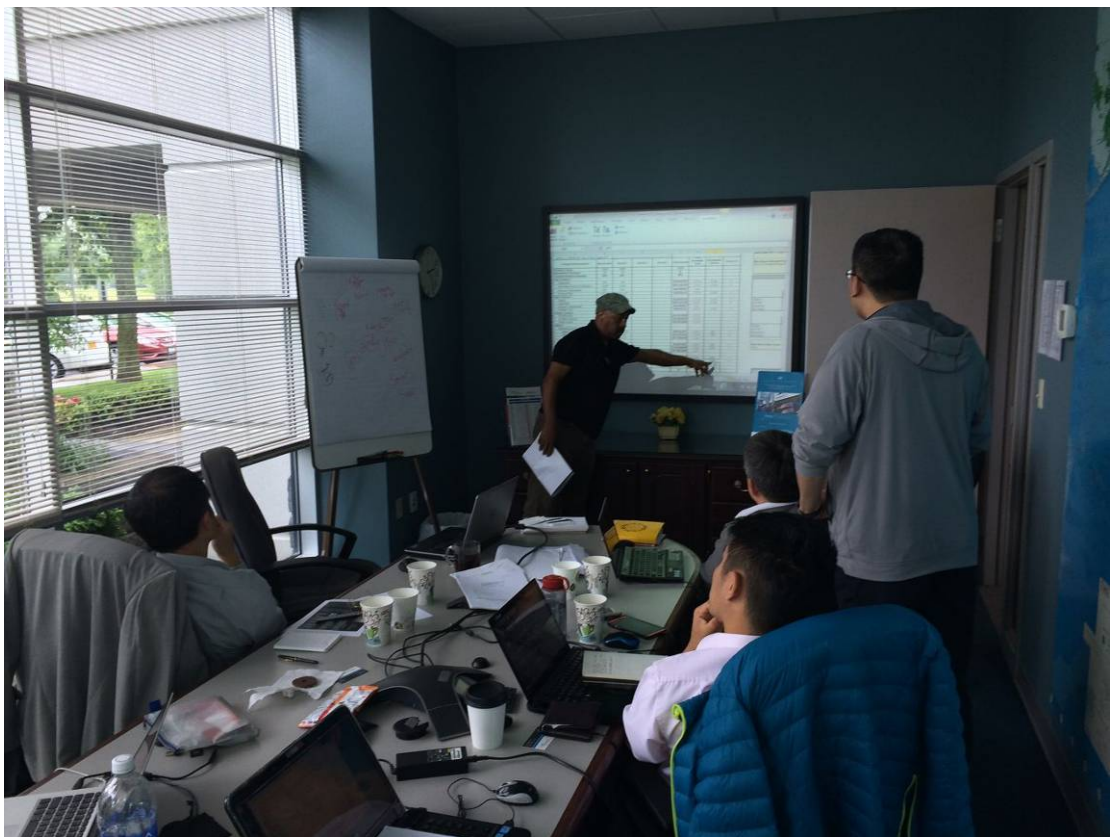


圖 2. 電廠效能分析應用討論

徐員、郭員與陳員此行赴 FirstEnergy IDEA 中心參訪。由 IEDA Center Manager, Michael J. Fox、Engineer, Michael T. Nemergut 以及 GP Strategies 公司 Business Development Director, Sid Sutherland、Director, Ron Griebenow, P.E.等接待。

討論以下議題：

1. IDEA 中心簡介。
2. 監測軟體 EtaPRO 實務應用及改善成效。
 - 避免 894,000 美元之設備維修成本(2014 年)
 - 以循環隔離(Cycle Isolation)節省 120,000 美元之營運成本(2014 年)
3. 核能電廠之監測與診斷應用討論，如圖 3 所示。
4. IDEA 中心參觀。
5. 可合作議題討論。



圖 3. 核能電廠之監測與診斷應用討論

徐員、郭員與陳員此行赴 Intertek 公司參訪。由 AIM Director, Gerhard Abel、Principle Engineer, Russell C. Cipolla, P.E.、AIM Director & General Manager, Nikhil Kumar、Senior Project Manager/Engineer, Michael Liu, P.E.、Software Group General Manager, Rana Ghosh、Product Management Director, Anup Aggarwal、Senior Technical Supervisor, Wei Li, Ph.D.、Failure Analysis Laboratories Director, Benjamin K. Jackson, Ph.D 等接待。

討論以下議題：

1. Intertek 資產完整性管理(Asset Integrity Management, AIM)團隊簡介，如圖 4 所示。
2. 循環成本(Cost of Cycling)簡介與應用案例(Oahu 島)
3. 3D 雷射掃描服務(石化廠組件更新應用)
4. 管路檢測與分析討論
5. 核電廠資產完整性管理簡介
6. 資產完整性管理軟體(AWARE)說明與展示
7. 故障分析實驗室(Failure Analysis Laboratories)參觀，如圖 5 所示
8. 循環成本軟體(COSTCOM)說明與展示
9. 可合作議題討論。



圖 4. Intertek 資產完整性管理團隊簡介



圖 5. 故障分析實驗室參觀

VirtualPlant 是 EtaPRO 技術的核心，以熱力學第一定律建立電力循環，供複循環機組之準確熱力學與水力性能預測，並可套用至火力與核能電廠。VirtualPlant 是以嚴謹熱力學第一定律之工程模型建立發電廠循環模型，如圖 7 所示，其中每個組件的能量與質量是保守的(Conserved)。

VirtualPlant 包括大量的電廠組件庫，如：蒸汽產生器(鍋爐、廢熱回收鍋爐、核能蒸汽供應器)，汽渦輪機(Steam Turbine)與汽輪機(Gas Turbine)、冷凝器、飼水加熱器、冷卻塔、空氣冷凝器與泵。另外，也有大量的組件，如：閥、混合器、分離器、槽、以及熱源，供控制循環的質量與能量流。VirtualPlant 模型可以在線上執行，計算期望值與確認儀器設備，或在離線執行“what-if”分析，譬如：移除飼水加熱器後，容量與熱耗率的影響。

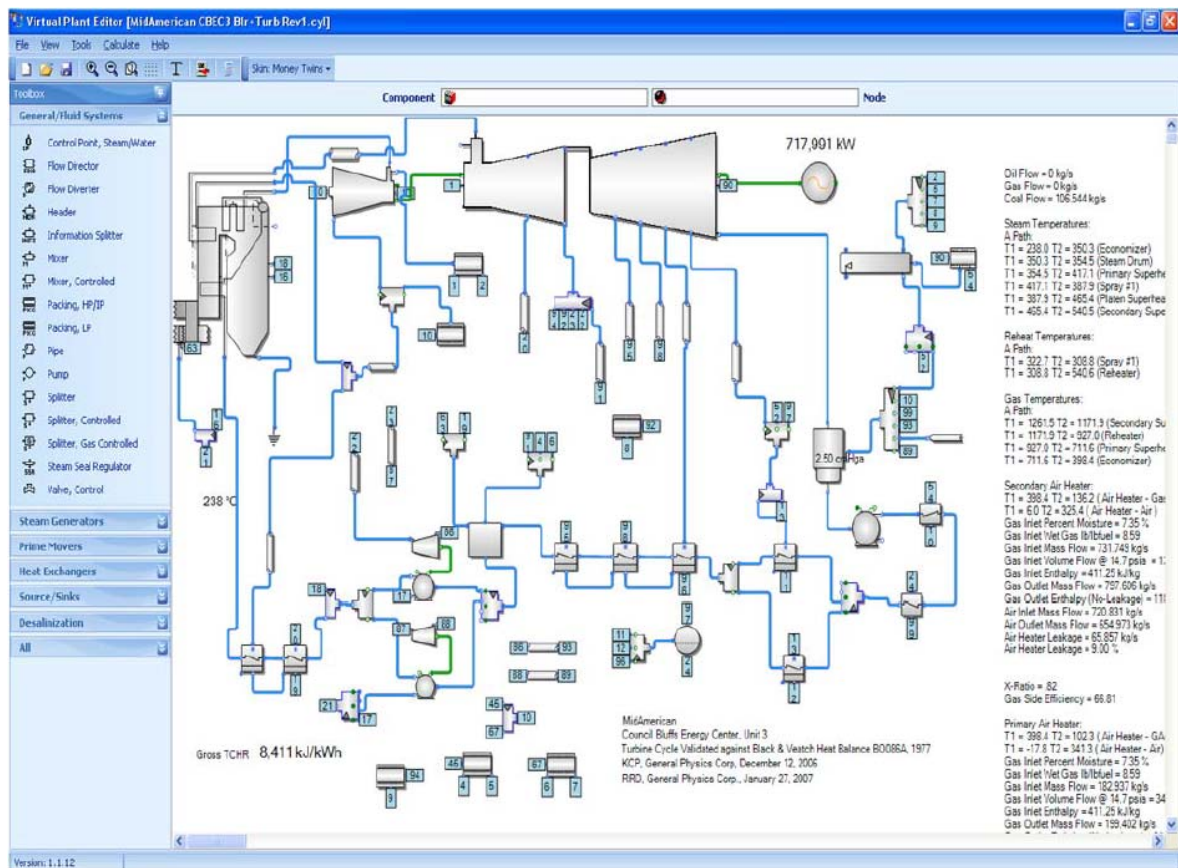


圖 7. VirtualPlant 之發電廠循環模型介面

EtaPRO APR 建立一基於歷史資料圖樣的數學模組，並產生所有與系統相關測量值之高品質估測。這些估測值以過去系統的行為預測基礎，並與實際系統相關測量值進行比較，若任何信號偏離其正常圖樣，超過使用者定義限值與週期(Amount and Duration)，該模組將發出警報給電廠人員告知異常，如圖 8 所示。

這些警報也會通知分析員，提醒該組件或信號應該被追蹤是否劣化與異常。適當的組合可以讓系統產生預期的健康狀態，分析員只要處理這些偏離正常行為並引起警報的組件與信號，大幅縮短維護與保養的時間。

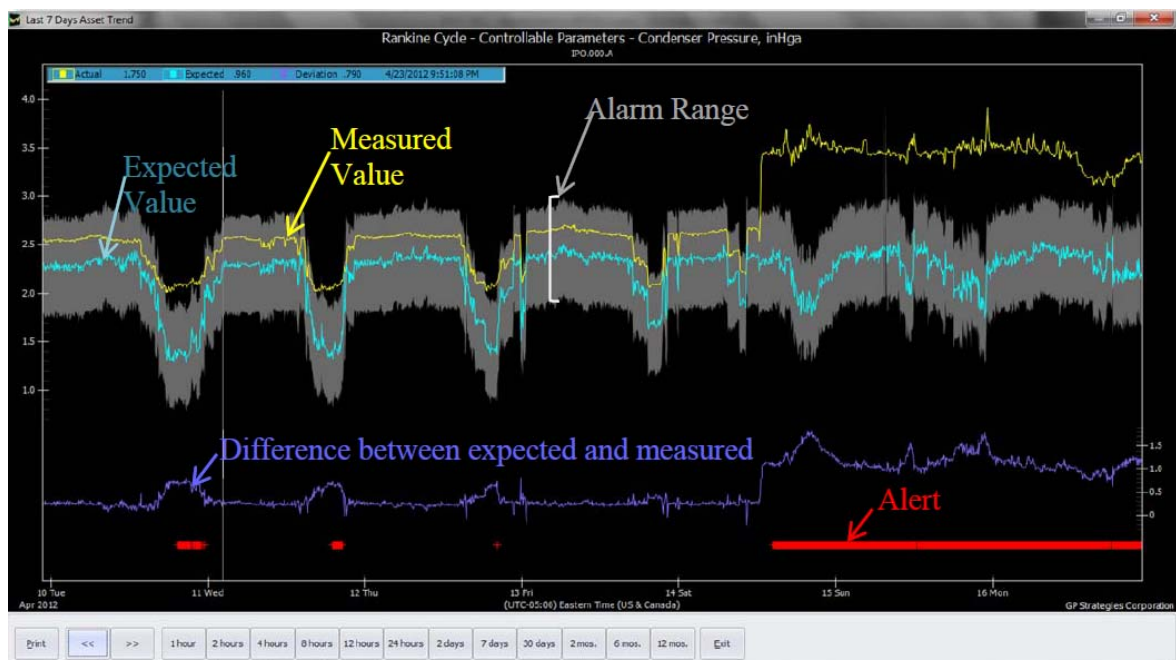


圖 8. EtaPRO APR 介面

EtaPRO Predictor 目前已整合至 EtaPRO 系統平台，是一自動化機器故障識別與診斷之軟硬體平台，如圖 9 所示。

EtaPRO Predictor 比較實際振動頻譜與機器特定參考特徵，來定義故障徵兆，並針對即將故障的機器提供進階警告，包括特定組件故障診斷與預期時間到需要採取行動之週期。

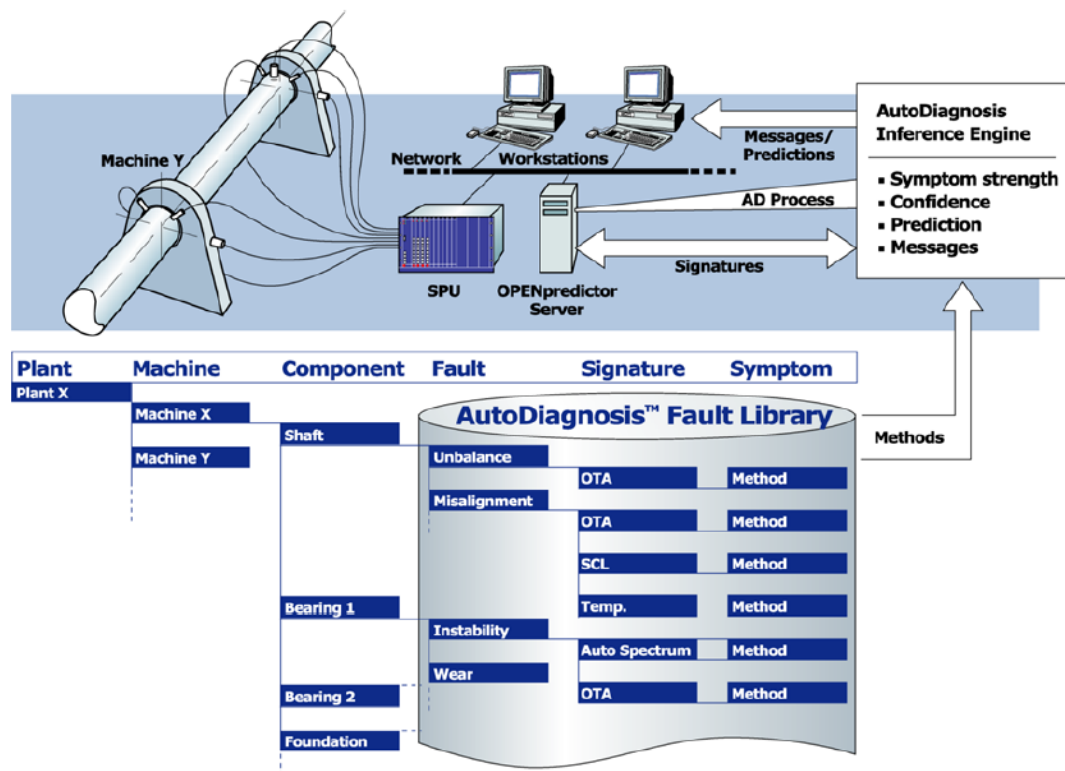


圖 9. EtaPRO Predictor 平台架構

EtaPRO 系統包括複合技術，每種技術都可以提供警報給不同的電廠人員，所有的警報可以透過關注檢視器(Concerns Viewer)來管理，如圖 10 所示。基於使用者定義偏離期望值的組件與訊號將被主動關注。這些期望值可以由 APR 模型、VirtualPlant 模型、EtaPRO Predictor 診斷、使用者定義之 EtaPRO 計算、一曲線擬合、或一固定值來定義。

所有這些可以提供在不同電廠領域或不同監測目標之主要優勢，例如：一飼水加熱器之排氣冷卻方式(Drain Cooler Approach, DCA)溫度，應該維持在超過一單元的操作負載範圍之相當常數。透過細部 APR 模型來監測該參數是否運作，而與電廠計算值到一固定值比較可以提供更多顯著可比較的結果，供模型發展與維護。

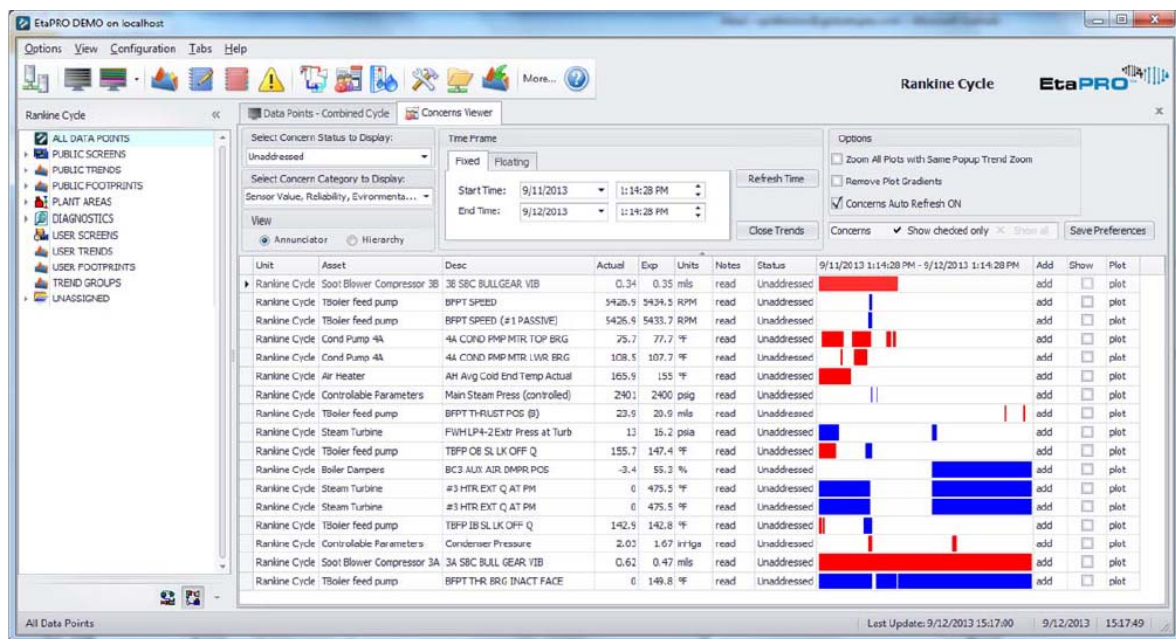


圖 10. EtaPRO 之關注檢視器(Concerns Viewer)介面

關注檢視器在用戶選擇的時間範圍之特定時間內，紅色部分表示測量值超過上限警報，藍色部分表示測量值超過下限警報。如前所述，用戶可以容易地改變顯示時間的範圍。

另外，使用者可以容易地變更他們想顯示的資訊，以及透過拖動其理想的位子改變顯示欄位的順序，註記可以被記錄作為已被審視的警報，以及警報狀態被改變，複合測量的趨勢圖可以顯示在一共同群組，供設備劣化分析，如圖 11 所示。

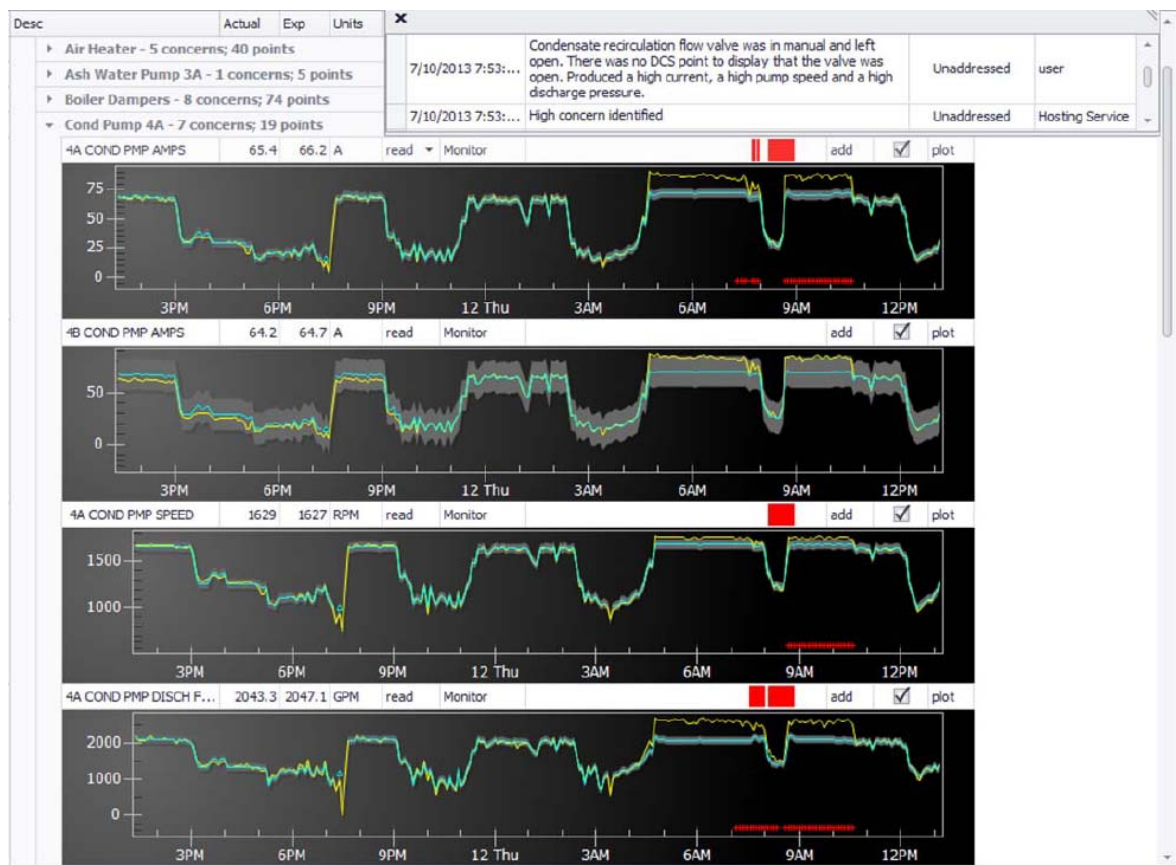


圖 11. EtaPRO 之關注檢視器(Concerns Viewer)之趨勢圖介面

「電廠效率分析技術及異常偵測技術研討會」是本次參訪的另一個重點，分析偏離期望值的組件與訊號之肇因以及採取必要的行動，以下以「大型汽渦輪機(Steam Turbine)效能之肇因分析」為例說明。

依據 ANSI/ASME PTC 6S, “Simplified Procedures for Routine Performance Tests of Steam Turbines”之汽渦輪機測試規範，指出在一系列穩態焓降測試範圍裡，從滿載閥門全開到至少一半負載，應該在所有飼水節流壓力與溫度、設計再熱調溫流量(通常為零)、以及設計蒸汽盤之空氣再加熱器流量(通常為零)等閥門點進行。

在閥門全開狀態，若實際蒸汽流量高於設計流量，透過測試說明所有層級壓力高於設計壓力，參考固體粒子沖蝕(Solid Particle Erosion, SPE)之徵兆與肇因說明；若實際蒸汽流量低於設計，參考與之更進一步診斷與蒸汽路徑結垢或機械損害之徵兆與肇因說明；若實際蒸汽流量在設計流量附近，且毛發電量低，參考洩漏相關徵兆與肇因說明；若測試結果顯示沒有符合任何上述分類，參考其他徵兆與肇因說明，如表 1 所示。

表 1. 大型汽渦輪機效能之徵兆與肇因說明

主要異常徵兆	相關異常徵兆	肇因判斷
在閥門全開 (Valve Wide Open, VWO) 狀態，實際蒸汽流量高於設計流量	● 在汽渦輪機高壓與中壓段之效率偏低 ● 在閥門全開狀態下，蒸汽(飼水)流量偏高 ● 在閥門全開狀態下，毛發電量偏高 ● 低載與高載之效率差異偏高 ● 曾經有大量汽機啟動的歷史記錄 ● 所有汽機層級壓力 (Stage Pressure) 偏高 ● 最終飼水溫度偏高 ● 低溫再熱 (Cold-Reheat, CR) 溫度偏高	固體粒子沖蝕 (Solid Particle Erosion, SPE)
在閥門全開狀態，若實際蒸汽流量低於設計流量	● 汽渦輪機高壓與中壓段效率偏低 ● 在閥門全開時，蒸汽流量(飼水流量)偏低 ● 在閥門全開時，毛發電量輸出偏低 ● 飼水加熱器之端點溫度差 (Terminal	蒸汽路徑結垢

	Temperature Difference, TTD)偏高 ● 曾經有飼水化學問題歷史紀錄(高度溶氧量或異常 pH 值) ● 曾經有冷凝器管路(非冷凝液純化槽)破裂歷史記錄 ● 沒有例行執行強制循環鍋爐(Controlled Circulation Boiler)之汽鼓(Drum)線性完整性測試 ● 第一級壓力與飼水流量比偏高 ● 效率逐漸隨時間變化 ● 低溫再熱溫度偏高	
	● 發生碰撞 (Peening) 之渦輪段效率偏低 ● 層級壓力前段發生碰撞區域之壓力偏高 ● 若碰撞發生在第一級 (First Stage)，在閥門全開狀態下，蒸汽(飼水)流量與所有層級壓力偏低，並導致發電量降低	蒸汽路徑之碰撞損害

	● 飼水加熱器之端點溫度差無異常	
在閥門全開狀態，實際蒸汽流量在設計流量附近，且毛發電量偏低	● 在閥門全開狀態下，蒸汽流量正常，但高壓段效率偏低 ● 在低載時，中壓段效率增加(沒有洩漏修正) ● 中壓段效率在負載範圍不為常數(低載效率高於高載) ● 第一級壓力與飼水流量比偏低 ● 曾經有異常啓動歷史記錄(有意或無意超過建議之啓動與負載參數) ● 再加熱器蒸汽流量減少與高壓效率下降	渦輪機高壓到中壓密封間隙增加(洩漏)
	● 高溫段效率曲線顛倒(高效率發生在低載而不是高載) ● 在較高載時，高壓段效率偏低；在低載時，顯示正常效率 ● 第一級壓力與飼水流量比偏低 ● 第一級壓力與渦輪	密封環洩漏

	機中低壓段壓力比偏低	
其他(沒有符合任何上述分類)	● 在閥門全開狀態下，蒸汽與發電量與少開啓一閥門相等 ● 蒸汽與負載容量減少 ● 當閥門被指示打開時，蒸汽彎頭(Bend)內的壓力接近第一級壓力 ● 改變控制閥位時，當負載無變化(Dead Spot)	控制閥轉盤(Disk)到棒分離
	● 在接口位置發生噪音 ● 油漆剝落在內部檢視接口區域(低壓渦輪機段) ● 在檢視接口附近發生飼水加熱器運轉/效能問題	內部檢視接口故障
	● 在檢視接口附近發生飼水加熱器操作/效能問題 ● 冷凝器之冷凝水過冷	低壓排氣/水管路伸縮接頭失效

「基礎電廠效率分析技術研討會」亦是本次參訪的另一個重點，GP Strategies 公司已為多家美國火力電廠執行過效率監控、效能分析以及改善建議工作，所以不論是對舊式單循環(Rankine Cycle)發電機組還是目前發電效率較佳之複循環(Combined Cycle)發電機組均有相當豐富的經驗。

因應台灣在福島事件後核能產業發展逐漸萎縮，除保持既有核能與再生能源等相關能源技術之外，可對於目前台灣本土能源產業較不重視的線上即時效能監測與效能改善技術開始進行發展與推廣，減少燃料消耗與廢氣排放，進而達到節能減碳的能源政策目標。

藉由本次「基礎電廠效率分析技術研討會」之機會，獲得相當多於不同於核能發電領域之火力發電廠的相關效能分析技術與經驗。除了基礎電廠效率分析技術討論外，各國專家也分享相關電廠效率經驗摘要重點如下：

1. 通常汽機循環之效率約為 40%。
2. 至電網能量效率(Energy to Grid)約為燃料能量之 35%。
3. 汽機循環中之能量損失約為 50%，其中包含至冷凝器冷凝損失與提供輔助設備之功率損失。
4. 鍋爐能量損失約為 15%，而其中煙囪排放損失(Stack Loss)就佔了 14%，其他燃燒不全(Combustion Loss)與輻射損失(Radiation Loss)約各占 0.5%。
5. 主要效率指標(Key Performance Indicators, KPI)包括各主要設備組件(鍋爐、熱交換器、飼水加熱器、汽機、泵浦與冷凝器)效率、汽機循環淨熱耗率(Turbine Cycle Net Heat Rate)與機組淨熱耗率(Unit Net Heat Rate)。
6. 排氣低溫限制(Low Escape Gas Temperature Limitation)，排氣溫度太低會導致空氣加熱器下游設備損壞。
7. 冷凝器低溫度/壓力限制(Low Condenser Temperature/Pressure Limitation)，不適當的溫度與壓力會導致低壓汽機葉片損壞，某些情況下甚至會導致發電量降低。

(二) FirstEnergy IDEA 中心參訪心得

FirstEnergy 公司是一家多元化的能源公司，致力於安全、可靠、以及卓越運營之目標。總部在俄亥俄州的阿克隆(Akron)，FirstEnergy 公司包括一國內大型的投資者電力系統，以及多元化的發電廠，總發電容量約 17 GW。本次參訪 2011 年新成立的資訊診斷評估與分析(Information Diagnostic Evaluation and Analysis, IDEA)中心，該中心主要服務的項目為改善 FirstEnergy 公司旗下電廠之可靠度、可用度、以及效率。

FirstEnergy 公司自 1980 年代已經開始投資在設備效能劣化之評估工作上，利用熱力學建模軟體與線上效能監測進行相關研究，藉以改善運轉與維護模式，有效降低營運成本。

在近期電力研究所(Electric Power Research Institute, EPRI)主辦的效能改善研討會中，指出目前大多線上系統皆高度依賴儀器設備，大多效能劣化造成的警報，通常是因儀器錯誤的讀值引起的誤判。因此，FirstEnergy 公司意識到改善線上監測系統資料品質的需求，於 1990 年代後期開始著手以進階圖樣辨識(APR)的進階資料確認方法，改善線上系統之資料品質，減少不必要的運轉與維護成本，主要優點如下：

1. 以進階資料確認預先處理使用在效能監測、燃燒優化、以及控制系統的電廠資料，以提供這些系統準確與可靠的資訊，增加計算結果與運轉建議的信心。
2. 進階資料確認可以準確地判斷需要校正的儀器。校正工作可以專注在這些異常的儀器上，減少儀器維護的總時數。
3. 進階資料確認可以區分設備效能劣化與儀器故障，減少失效警報(False Alarms)的維護。

過去，FirstEnergy 公司之效能與狀態監測發展，包括複合系統、獨立系統、需求維護、訓練與應用知識，但特定問題的診斷通常還是需要主題專家(Subject Matter Expert, SME)來反覆審視系統因果之間所需的資訊，往往耗時且效益不彰。近期，FirstEnergy 公司與 GP Strategies 公司合作，率先嘗試安裝 EtaPRO 系統到旗下的火力機組。同時，FirstEnergy 公司新建一中央監測與診斷(IDEA)中心，支援電廠人員在監測與診斷工作。以下為 FirstEnergy 公司旗下 Harrison 電廠安裝 EtaPRO 系統後的實

實際案例與效益說明：

1. 飼水加熱器隔離/旁通(Feedwater Heater Isolation/Bypass)案例

2013 年 5 月 23 日，EtaPRO 系統對電廠人員發出 Harrison 電廠 2 號機組，高壓飼水加熱器液位警報，顯示該加熱器液位超高 (Flooded)。電廠人員立即檢視，結果發現該加熱器液位罐的腳架在維護過程被撞擊，導致加熱器隔離並開啓飼水加熱器的旁通閥，旁通(Bypass)飼水加熱器將降低電廠效率與容量。

然而，在控制室並沒有收到任何有關飼水加熱器隔離的警報，EtaPRO 系統警報之關注(Concern)被確認為是設備問題，待加熱器重置後繼續運轉無任何異狀，如圖 12 所示。

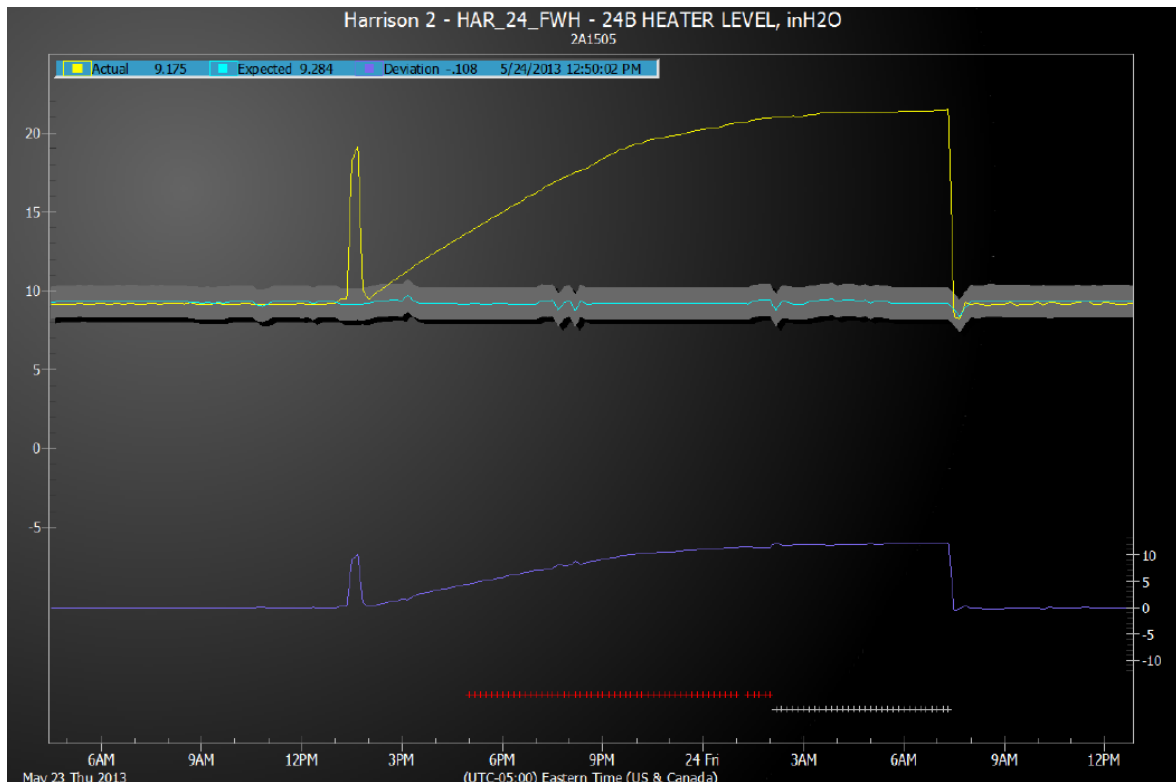


圖 12. Harrison 電廠 2 號機組之高壓飼水加熱器異常

隔離該加熱器將導致機組降載 5MW，評估該加熱器若在其他系統偵測或由操作員定期巡檢發現之前，持續保持隔離/旁通狀態一週，預估將損失 29,400 美元之發電成本。

2. 強制通風風扇內置軸承(Forced Draft Fan Inboard Bearing)案例

2013 年 4 月 11 日，3 號機組 B 側強制通風(Force Draft, FD)風扇內側軸承溫度升高，如圖 13 所示。注意該溫度在電廠停機前 EtaPRO 系統已經發生警報，但只有超過期望值 6 或 7 度 F。機組停車後再啟動，該溫度仍然不是異常的高，大約在 150 度 F 左右，比正常值高出 25 度 F，軸承溫度在分散式控制系統(Disturbed Control System, DCS)的警報點是 180 度 F，遠高於目前操作溫度。

而在這 FD 風扇室曾經有屋頂漏水的問題，研判該真空操作的軸承已經滲入了雨水，並降低油封的效果。該問題不會立即造成停止運轉及維修。因此，在保養需求單填入在下次可能維修的機會需更換油(包括油分析)以及軸承檢視。

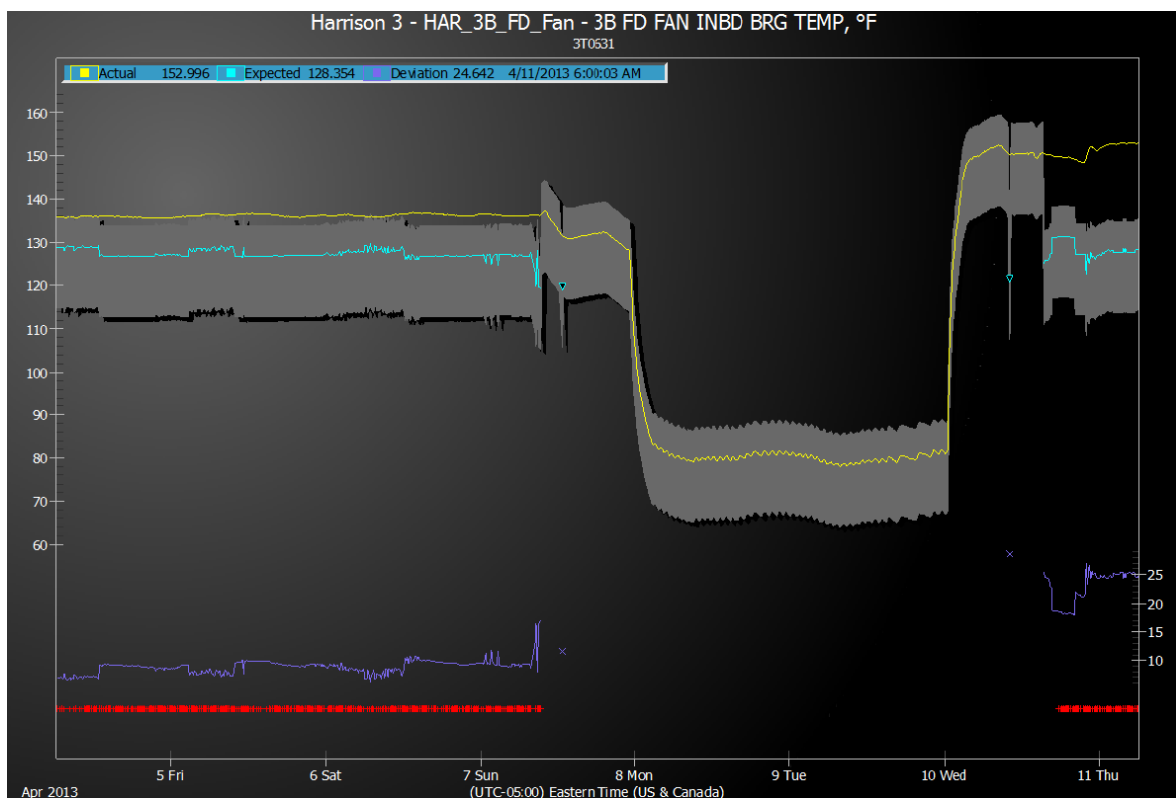


圖 13. Harrison 電廠 3 號機組之強制通風風扇內置軸承溫度異常

在 7 月 2 日由於機組管路洩漏必須停機一週，如圖 14 所示，軸承溫度在機組停機後，迅速地下降到環境溫度(約 80 度 F)，並在

機組開始運轉後上升。在這次停機期間，電廠人員執行該軸承的換油，並在油裡發現從軸承剝落巴氏合金材料碎片。軸承也被取出檢視，部分次要的損傷也被確認(低於預期)。

在檢視過程中，機械技術員注意到在軸承上的油視鏡(Oil Sight Glass)，即使軸承內的油已被抽乾，依然顯示軸承內有油。技術員並發現油視鏡連接到軸承座佈滿了灰塵與污垢，導致即使在軸承內沒有任何油，油視鏡液位仍顯示有油存在。當軸承不是在乾燥條件下運轉，毫無疑問油漬將造成軸承溫度略微升高。若沒有 EtaPRO 系統警告電廠人員軸承溫度略微升高，低油位是不會被注意直到溫度到達 DCS 警報線。屆時，損害將明顯地增加，且需要更多的維修時間與成本。

在維修後，實際軸承溫度下降約 15 度 F，但並非完全下降到先前正常的溫度(位置警報帶內)，如圖 14 所示。電廠人員已持續監測該軸承溫度並觀察操作溫度沒有更進一步的變化，並排定校驗該進階圖樣辨識模型，透過新增更新後之運轉溫度資料或新增微量的偏移來評估。

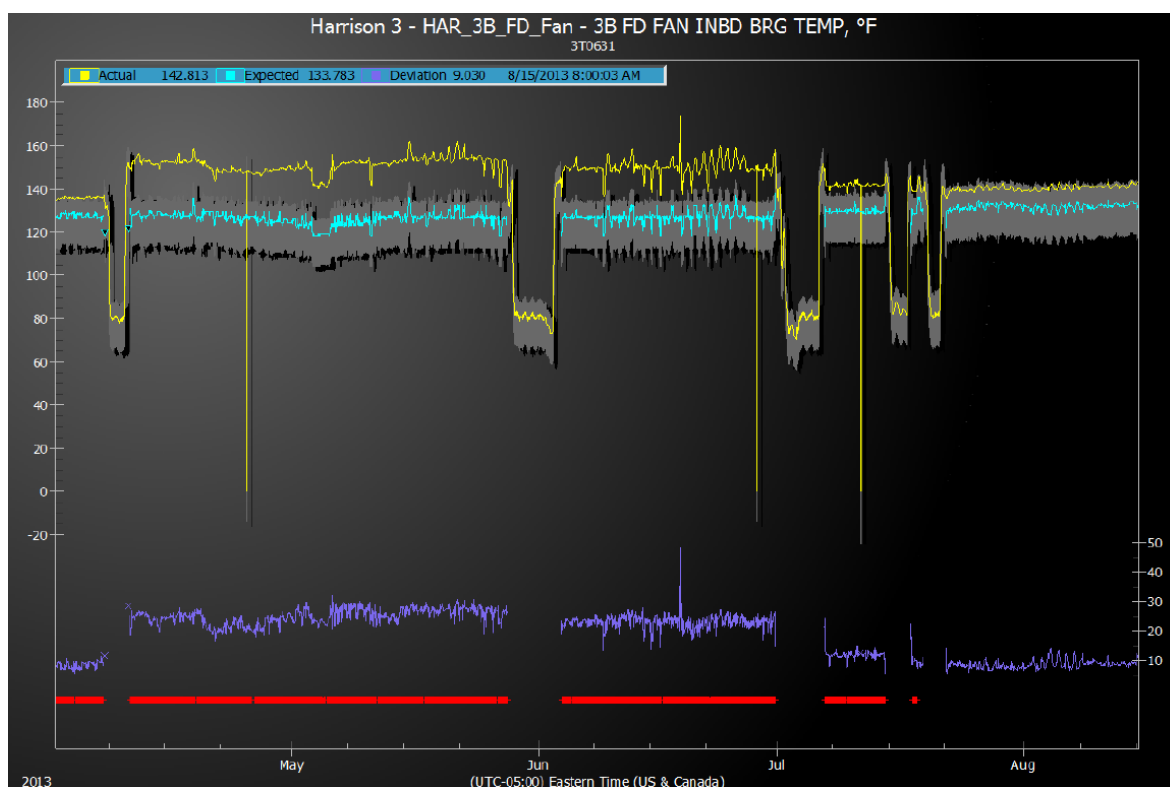


圖 14. Harrison 電廠 3 號機之強制通風風扇內置軸承溫度異常改善結果在正常運轉期間失去 FD 風扇，將造成機組降載 300MW 以及至少 48 小時的維修時間。這造成將近 504,000 美元的收入損失，以保守 10%的機率(FD 故障)估計，FirstEnergy 公司認為該案例可避免 50,400 美元損失，不包含實際維修可能增加的成本，以及軸承已經觸發 DCS 警報或其他可能失效原因。

3. 循環隔離(Cycle isolation)

2012 年 7 月 7 日，EtaPRO 系統警報電廠人員，在 3 號機組啟動後排氣管線溫度過高，如圖 15 所示。調派維護人員並發現排氣隔離閥故障，填寫工單在下次大修進行替換，在 7 月 13 日該機組短暫的停機，並替換該閥。

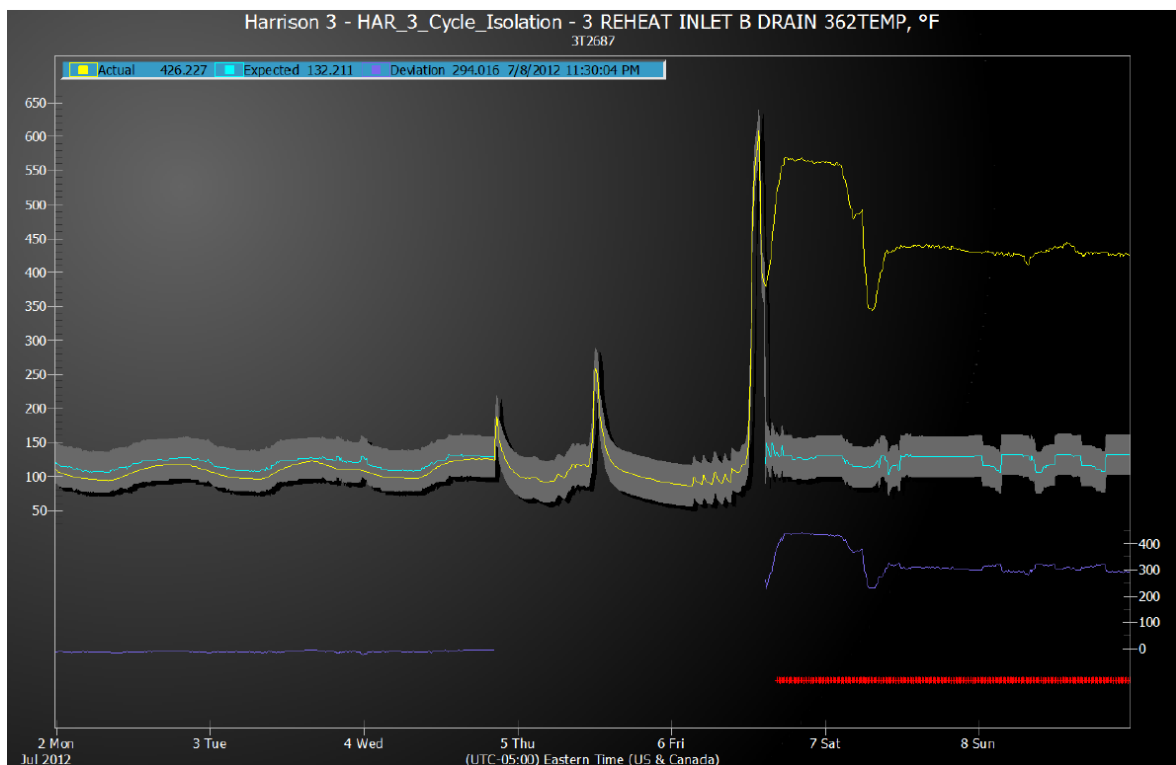


圖 15. Harrison 電廠 3 號機組之排氣管線溫度異常

隨即在 7 月 18 日重新啟動機組，排氣溫度迅速地再次出現警報，檢查發現，吹入通過螺線管的空氣，無法提供足夠的壓力來關斷閥門。因此，螺線管很快地被替換，閥門也可以正常關斷，如圖

16 所示。

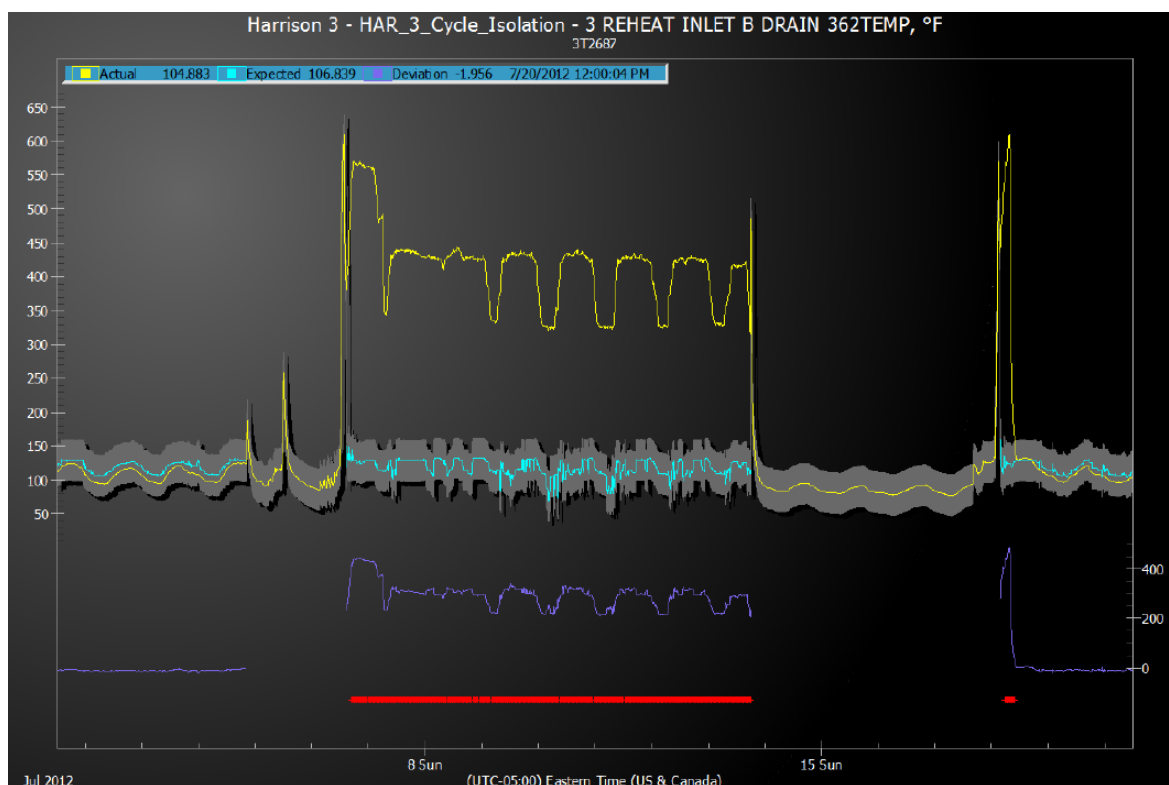


圖 16. Harrison 電廠 3 號機組之排氣管線溫度異常改善結果

蒸汽通過排氣閥，將降低蒸汽流通過汽輪機並增加冷凝器的熱負荷。可以利用 VirtualPlant 熱力學模型驗證該循環隔離損失的容量與熱耗率影響，假設允許電廠人員執行敏感性研究改變閥門洩漏流量，基於現場操作溫度、閥尺寸、排氣管大小與長度，FirstEnergy 評估 2%的再加熱蒸氣被排到冷凝器，結果將造成增加每週 38,985 美元的發電成本損失。

4. 空氣加熱器支撐軸承(Air Heater Support Bearing)

2012 年 7 月 7 日，EtaPRO 系統警報電廠人員，在 2 號機組空氣加熱器軸承溫度過高，但溫度只超過期望值約 12 度 F，檢查油位發現油視鏡顯示液位正常。因此，變更關注狀態為「持續監測」，效能與狀態工程師持續監測該溫度，在三天內軸承溫度保持微量的上升，甚至略微下降，如圖 17 所示。

在 7 月 10 日，軸承溫度非常快速地上升了 10 度 F，電廠人員檢查檢查油位，結果在油視鏡顯示正常液位，雖然軸承溫度仍然低於 DCS 警報限值，效能與狀態監測工程師要求維護人員加入些許的油到軸承儲存槽，軸承溫度幾乎瞬間下降。最後，加入兩加侖的油到儲存槽，軸承溫度下降到略低於期望值，整個過程如圖 22 所示。

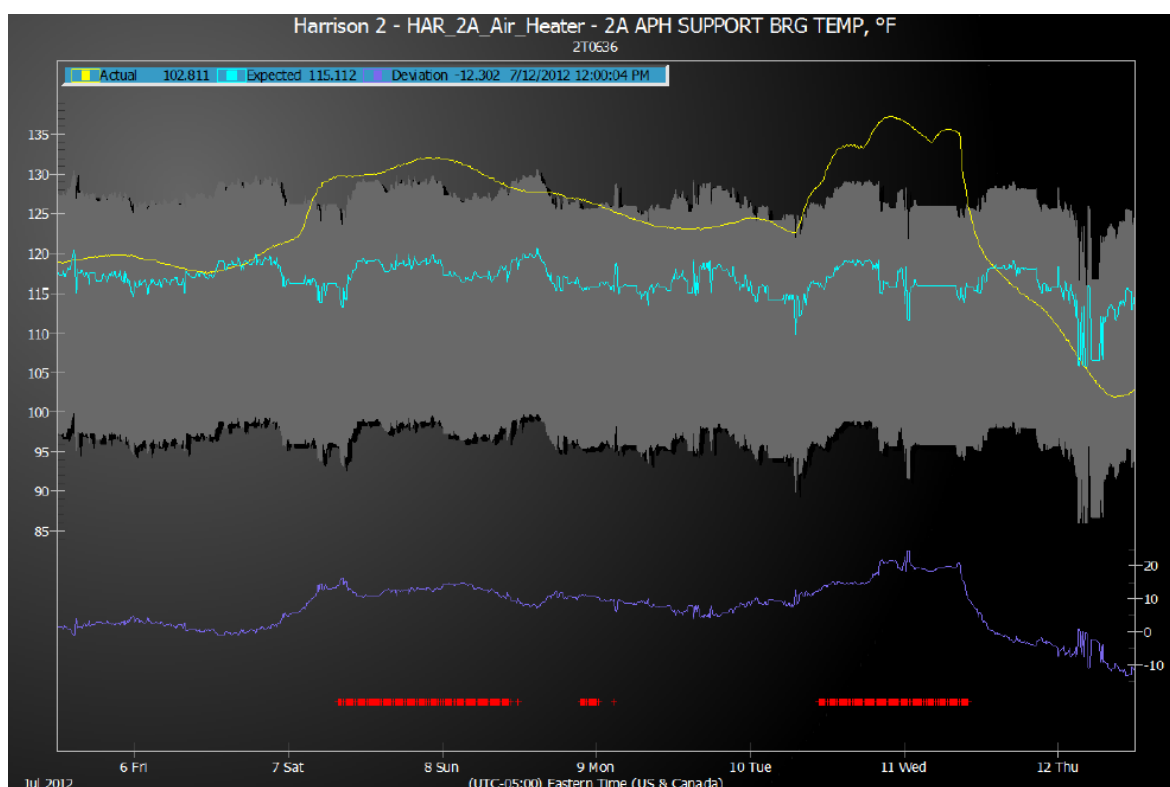


圖 17. Harrison 電廠 2 號機組之空氣加熱器支撐軸承溫度異常改善結果

空氣加熱器支撐軸承故障將造成機組跳車及失去所有發電，維修與替換需要至少 72 小時，結果將造成收入損失，以夏季電價計算超過 4 百萬美元，FirstEnergy 公司相信這個問題可以被其他系統偵測，在軸承完全失效之前甚至可能觸發控制室警報，然而，軸承實際損傷將有可能發生，特別是沒有油位指示反應，FirstEnergy 公司以 10%機率來評估軸承故障的成本影響，驗證該校正行動的利益為 436,440 美元。

(三) Intertek 公司參訪心得

Intertek 是全球知名的品質與安全服務機構，服務網絡遍及全球 100 個國家，擁有超過 1,000 個分支機構及 38,000 名員工。Intertek 取得眾多的國際認證和認可，對於克服法規與國際貿易障礙擁有豐富的專業經驗。

基於複雜設備與器具的擁有者與操作者需要工具來管理其資產的壽命，因此，Intertek 聯合設備製造商、服務提供商和設備業主共同開發了 AWARE 資產完整性管理軟體，如圖 18 所示，為用戶提供一種方便的工具增加設備設施的可靠性和安全性、文檔化及監測設備狀態、協助安排計畫、以及設備失效前識別問題。

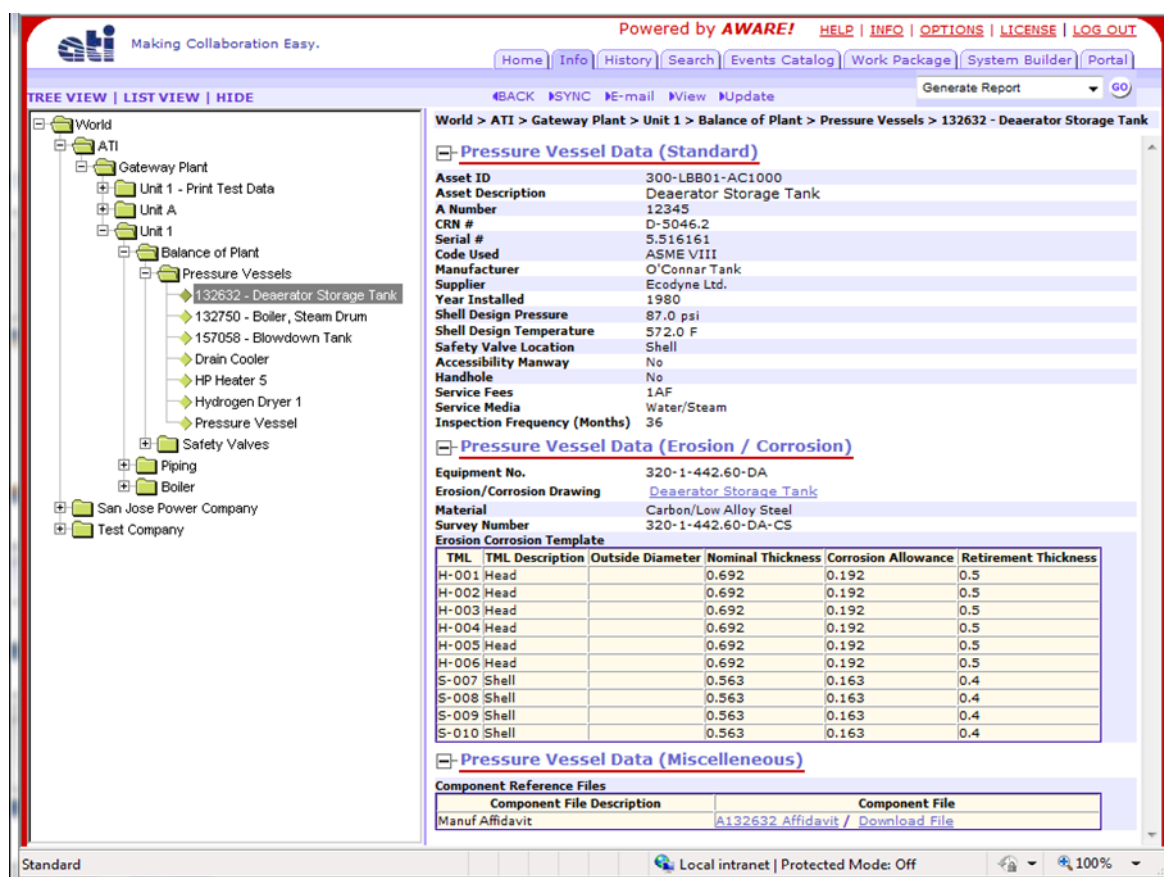


圖 18. AWARE 資產完整性管理軟體介面

AWARE 是一套檢視資料管理系統(Inspection Data Management System, IDMS)，用來組織檢視資產資訊，包括：管路、壓力容器、安全洩壓裝置、閥開關、儲存槽、以及其他程序設備。是目前唯一利用網路環

境(Web-based)的一套 IDMS 軟體，使用者可以快速地導引及檢視視覺化位置之資產資訊，該軟體主要特徵包括：

- 腐蝕監測(Corrosion Monitoring)
腐蝕監測位置(Corrosion Monitoring Location, CML)、檢視資料、任何型式設備或組件汰換日期之儲存與追蹤，並供自動計算最小容允壁厚與腐蝕率。
- 工程資料(Engineering Data)
儲存完整工程、程序、以及製造商資料，並易於存取。
- 行動排程(Activity Scheduling)
使用者可以規劃與監視任何型式的行動，例如：視覺化檢視、維修歷程、以及故障排除等。
- 資料轉換(Data Transfer)
資料可以透過 Excel、SAPR/ MAXIMOR、以及工業資料記錄器等匯入/匯出。
- 操作介面(Dashboards)
使用者可以建構客製化介面來檢視重要資料及關鍵性能指標(Key Performance Indicators, KPIs)。
- 工程圖介面(Drawing Interface)
AWARE 資料可以附加存在的 CAD 工程圖，並透過 AWARE Viewer 檢視。
- 文件管理(Document Management)
在程式內任何檔案可以附加在多重位置。

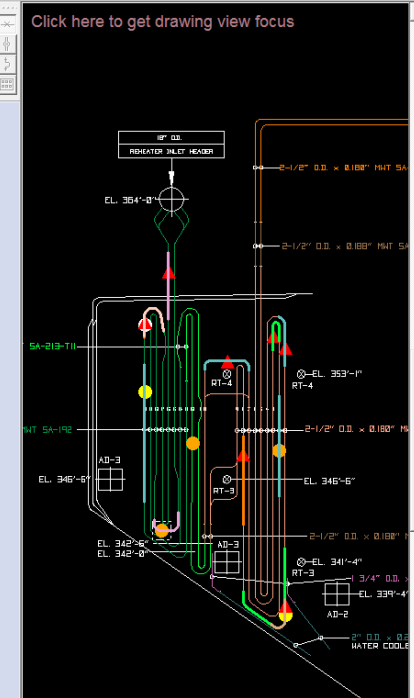
AWARE 採用樹狀架構來組織不同的管路系統，包括閥門(Valves)與肘部(Elbows)，利用視覺化功能，可以檢視管路系統之等距圖面，以及顯示已完成的測試，如圖 19 所示，測試資料可以被匯入到程序供任何報告使用，所有的管路資訊都是單一位置，因此易於存取與使，厚度資料可以透過壁厚的百分比進行色彩編碼，若量測到同一位置同一管路，這些資料可以比較，若該管壁正經歷薄化。相關資料也可以與現場圖片配對，如圖 20 所示。最後，AWARE 允許快速地產生報告來呈現需求資料與結

果。

Visual Aware - FRONT AND REAR REHEATER ASSEMBLY

File Edit View Mode Data Tools Help

Click here to get drawing view focus



Date: 12/12/2012
System: FRONT AND REAR REHEATER ASSEMBLY
Event: Sun 3 12-11 Forced Outage
Activity: Tube Failure (Assembly)

General Information

Entered By	Aware Administrator	Entered Date	12/12/2012
Last Updated By	Aware Administrator	Last Updated Date	8/5/2013
Tube Failure ID	1234		
Work Order #	5678		
Outage Type	Forced		
Primary Reason For Outage	Boiler Leak		
Problem Discovered	During Normal Operation		
Off-Line Date	12-Dec-12		
On-Line Date	12/15/2012 00:00:00		
Off-Line Hours	72.0		
Megawatt Hours Lost (MWHL)	1000.0		

Failure Information

Assembly Number	20
Row Number	18
Elev/Horiz. Dist. Value	343.304
Tube OD	2.5
Tube MWT	0.15
Material	SA-192
Failure Class	Primary
Failure Occurred At	Dissimilar Weld
External Tube Appearance	Alligator Hide Appearance Circumferential Cracking

Root Cause / Analysis / Future Recommendations

Primary Failure Mechanism: Dissimilar Metal Weld Failure

Action Plan

Recommendations	Assigned To	Priority	Required Action Date	Action Status	Status Details
Change this tube the next outage (Plant Maintenance 1)					

Repairs

Replacements

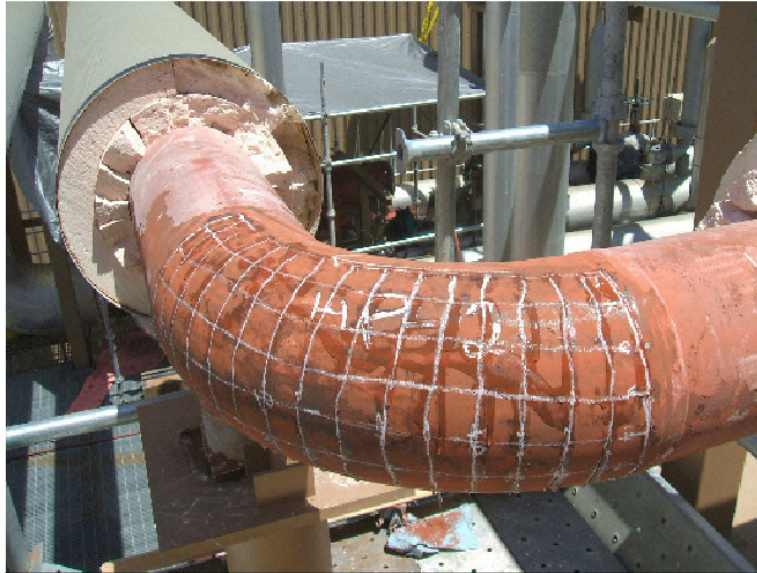
Label	Type	Assembly #	Start Row Number	Start Elev/Hori. Distance	End Row Number	End Elev/Hori. Distance	Length	Material Type, OD, MWT	Repair Type	Repair Status	Replacement Material - MWT
Tube	20	18	343.964	15	344.472	2.974	SA-192, OD: 2.5, MWT: 0.15	Install Dutchman	Repaired Permanently	0.200	

Tube Sample Information

圖 19. AWARE 資產完整性管理軟體之視覺化介面

Value of 'Evaluation Results' - Windows Internet Explorer

24	1.428	1.357	1.326	1.313	1.314	1.349	1.3	1.338	1.411
26	1.429	1.333	1.329	1.332	1.346	1.321	1.294	1.321	1.381
28	1.388	1.345	1.342	1.353	1.356	1.352	1.336	1.331	1.378
30	1.404	1.372	1.36	1.387	1.344	1.346	1.316	1.336	1.33



Status	Future Action (Yellow)	Results	No FAC Patterns Identified
Required Actions	Re-Inspect	Required Action Date	4/20/2010
Action Status			
Details			
Remove the insulation and Re-inspect in 2010			

圖 20. AWARE 資產完整性管理軟體介面之現場圖片配對

另外，針對電廠營運成本評估與分析，Intertek 結合過去累積之電廠運轉與維護經驗發展開發了 COSTCOM 電廠營運成本分析軟體。COSTCOM 是一套即時電廠成本分析軟體，最早在 1989 年火力電廠發展，基於電廠過去運轉發生的損害，以及針對這些損害之組件修維與維護成本，Intertek 以成本模型來精確地預測過去的成本，以致於過去的成本可以被量化並更精確地預測未來的成本。Intertek 使用至少兩種不同的獨立研究方法來評估循環成本(Cost of Cycling)，不同損害模型可從分析電廠資料截取系統收集之數據來發展，調整在這些主要元件與成本區域

COSTCOM 及複循環成本分析技術在 2012 年發展，允許電廠操作員與管理者每分鐘監測目前運轉的循環操作的綜合成本，如圖 21 與 22 所示，它是一套 PC-based 的程式，透過電廠網路連線到電廠資訊系統收集資料。該系統包括三個模組。

- 計算引擎 – 提供電廠即時 15-20 個輸入變數的計算結果
- 檢視器 – 顯示即時與歷史結果
- 管理器 – 用來變更顯示設定，例如：警報層等或語言設定、當地幣值、量測單位、溫度/斜度變化率限制(綠色/正常、黃色/警告、紅色/限值)

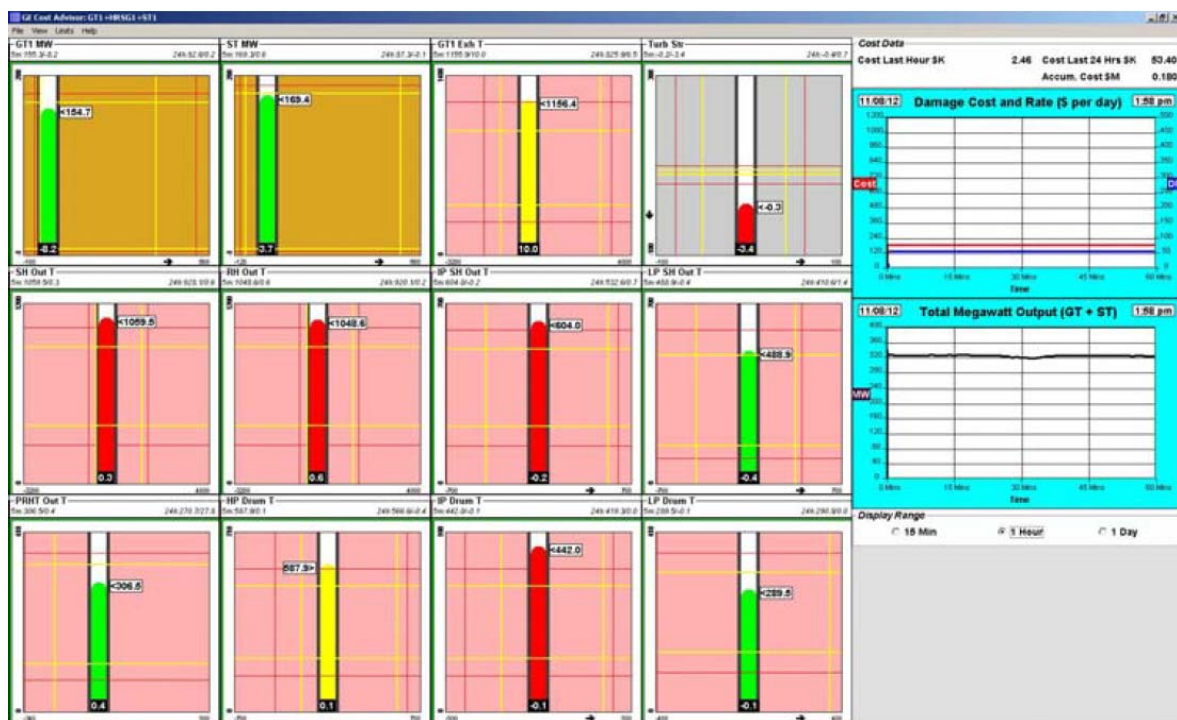


圖 21. COSTCOM 及複循環成本分析之組件損害介面

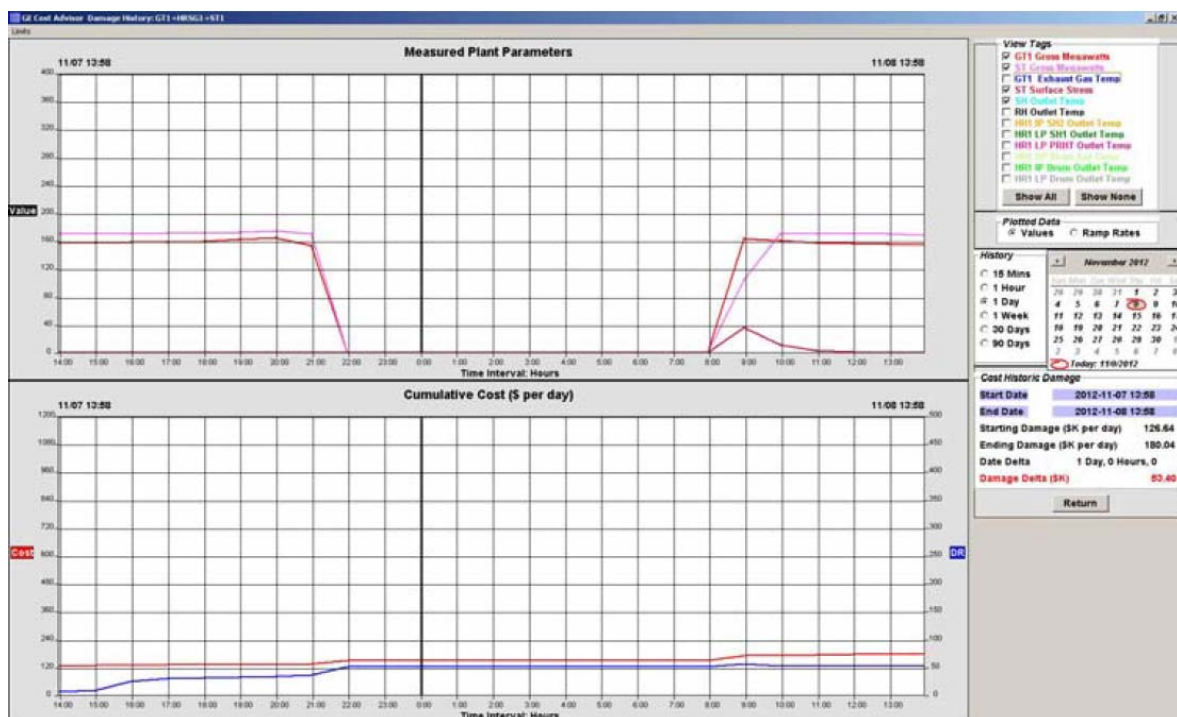


圖 22. COSTCOM 及複循環成本分析之啟動成本介面

基於關鍵損害程序指標(Damage Process Indicators, DPI)，從電廠關鍵設備，如：汽輪機、廢熱回收鍋爐、汽鍋輪發電機等，顯示其設備健

康狀態，包括：溫度、壓力、流率、應力、以及電力輸出，其中又分爲正在發生當中之目前循環暫態型式(Current Cycling Transient Type)，以及已經發生之暫態期間損害與其他成本。

該軟體之基本原理是量測主要變數以及損害與成本之間的關係，並利用上述方法論建立電廠循環研究之成本模型。以目前電廠設計以及在過去循環變化率之過去循環損害爲基礎，透過多變數迴歸分析(Multivariable Regression Analyses)調整過去歷史成本與損害模型，以預測未來的損害與成本。

COSTCOM 也可以顯示每天在循環(或任意其他)操作已經發生之整體電廠損害成本，主畫面以顏色棒(綠色/正常、黃色/警告、紅色/限值)顯示所有已發生的機組損害之高溫與高 DPI 變化率，以及高損害與即時成本之反應主要量測變數(溫度、爬升變化率、流量、以及應力層級)，供操作員參考。操作員可以據此判斷是否強制機組上線快速地產生百萬瓦電力供電力市場使用，或當機組因相對於市場上的獎勵及組件損害層級太高時降低升載速率。

同時，COSTCOM 也可以提供損害警示的建議，支援操作員讓機組保持在正常溫度與爬升變化率之綠色框內，避免暫態損害。依據 Intertek 的統計數據，COSTCOM 可以讓操作員在開車與停車期間透過量測資料修正程序及電廠硬體微量變更，減少循環損害至少 30-50%。

(四) HFC 公司參訪心得

HF Controls (HFC)公司之 HFC-6000 控制系統爲第四家獲得美國核管會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)認可之核能級儀控平台，該系統同時也通過 IEC 61508 SIL-3 之功能安全(Functional Safety)國際認證。HFC 在 HFC-6000 安全控制系統之發展，陸續以 FPGA 實現控制器與 I/O 模組之功能。由於 FPGA 控制器設計必須涵蓋應用程式(Application Program)，因此，HFC 以柴油發電機自動加載器(Diesel Generator Load Sequencer, DGLS)作爲實現展示 FPGA 控制器的應用程式。

在過去 20 年，HFC 提供 8 套電廠控制系統到韓國標準 1000MW 核能電廠。該系統包括核能 Class 1E 控制與 Non-Class 1E 控制等共 100 多

項子系統。DGLS 是核能 Class 1E 控制系統的一項，該系統控制柴油發電機的加載順序。DGLS 展示系統使用 HFC 的 FPGA HFC-6000 平台以及採用單一迴路控制架構，如圖 23 所示。



圖 23. FPGA HFC-6000 平台

DGLS 根據 RG 1.9 與 IEEE 387 標準設計，用來控制緊急柴油發電機 (Emergency Diesel Generator, EDG) 之加載順序。DGLS 觸發 EDG 啟動信

號，接著觸發特殊安全設施致動信號(Engineered Safety Features Actuation Signal, ESFAS)，如安全注水致動信號(Safety Injection Actuation Signal, SIAS)、圍阻體噴灑致動信號(Containment Spray Actuation Signal, CSAS)、輔助飼水致動信號(Auxiliary Feedwater Actuation Signal, AFAS)、或重新啟動喪失外電(Loss-Of-Offsite Power, LOOP)到各自 Class 1E 匯流排。

加載器從電廠保護系統(Plant Protection System)上監測匯流排電壓與 SIAS。若需要，加載器將自動地卸載匯流排上的負載，啟動另一台柴油發電機，順序地重新連接可用的負載到電壓匯流排上。

爲了符合 RG 1.9 之要求「一旦適當大小之柴油發電機組在 1 秒內恢復 90%供電後，大型感應馬達可以在 5 秒內到達額定轉速」，假設供應所有的核能蒸汽供應系統(Nuclear Steam Supply System, NSSS)的特殊安全設施(Engineered Safety Features, ESF)馬達將在 3 秒內到達額定轉速。

FPGA HFC-6000 平台之 DGLS 加載器採用啓動順序，控制如下壓水式反應器核電廠之安全設備

- 高壓安全注水(High Pressure Safety Injection, HPSI)泵
- 輔助飼水泵
- 圍阻體噴灑泵
- 低壓安全注水(Low Pressure Safety Injection, LPSI)泵
- 反應器圍阻體風扇冷卻器(Reactor Containment Fan Coolers, RCFC)
- 組件冷卻水(Component Cooling Water, CCW)泵
- 緊要廠用水(Essential Service Water, ESW)泵
- 基本水冷設備

加載器模組安裝在 DGLS 機櫃，透過在前面板的指示燈與計數器可顯示加載器的狀態。前面板也包括實驗用閥(Lab-On-Valve, LOV)測試開關或 SIAS 狀態來測試加載器之功能。DGLS 展示平台具備兩組硬體，一組是 DGLS 展示之數位 FPGA 處理單元模組(FPGA version Processing Unit, FPU)含數位輸出入模組(FPUD01)以及數位輸入模組(FPUD02)；另一組是類比 FPU 包括兩組類比輸入模組(HFC-FPUA)、類比輸出模組

(HFC-FPUAO)、高速介面模組(High Speed Interface Module, HSIM)、以及 HFC-FPC08 閘道控制器。

本次參訪 HFC 展示 FPGA HFC-6000 平台功能，如圖 24 所示，包括：

- 以 FPGA 為基礎的 DGLS 硬體展示
- 透過 DGLS 面板執行 DGLS 功能
- DGLS 面板的開關與指示燈將透過外接板連接到 FPUD02 卡片
- FPU 與類比 I/O 卡片及 HSIM 連接
- 透過 FPUA 接收輸入信號，從類比輸入到類比輸出之一完整迴路展示
- 在 FPUA 執行類比轉數位演算，讓 FPUA 可以轉換接收到的 AI 原始計數到浮點工程單位。
- 接著轉換工程單位值到 ANO 區塊(數位轉類比)轉換輸出到原始計數值
- 透過 F-Link 傳送這些原始計數到 HSIM#1
- 透過 HSIM Link 傳送原始計數到 HSIM #2
- 透過 F-Link 傳送原始計數到對應之 HFC-FPUAO 卡片輸出

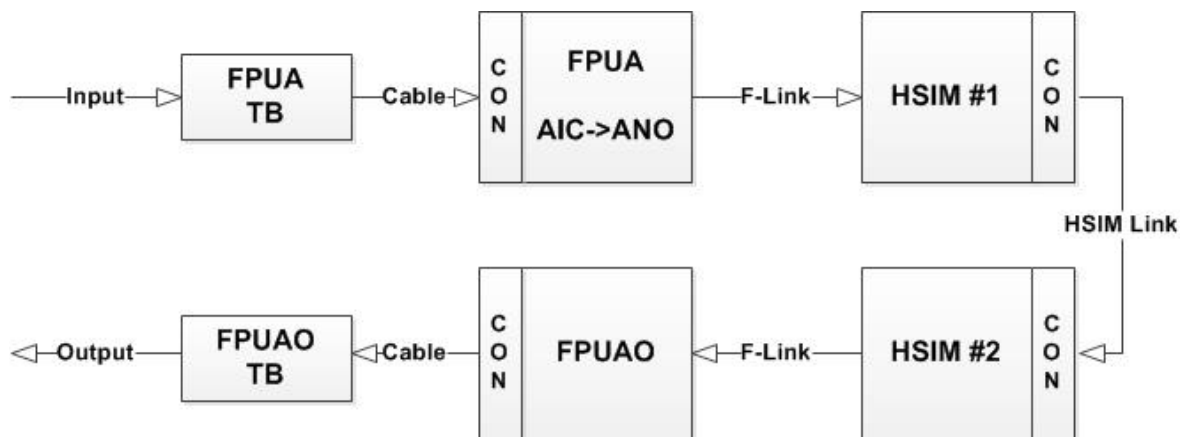


圖 24. FPGA HFC-6000 平台展示功能組態

另外，HFC 也展示 DGLS 低電壓(Under-Voltage)警報功能，如圖 25 所示，包括：

- 針對 DGLS，具備兩組匯流排各 4 個通道第偵測低電壓
- 以 FPUA#1 來顯示 1st BUS 的低電壓狀態；FPUA#2 來顯示 2nd

BUS 的低電壓狀態。每個 FPUA 負責 4 個 AIC 與 4 個具預先設定點之 BISTBL，BISTBL 跳脫旗標傳送到 FPUD02 (loop 1002)

- 針對 FPUD02 Loop1002，HFC 以 2004 邏輯實現低電壓警報。
- FPUAO 負責顯示來自 FPUA 的計數值。
- 低電壓警報的所有資訊，透過 HFC-FPC08 閘道控制器可連接到客製化之人機介面顯示。

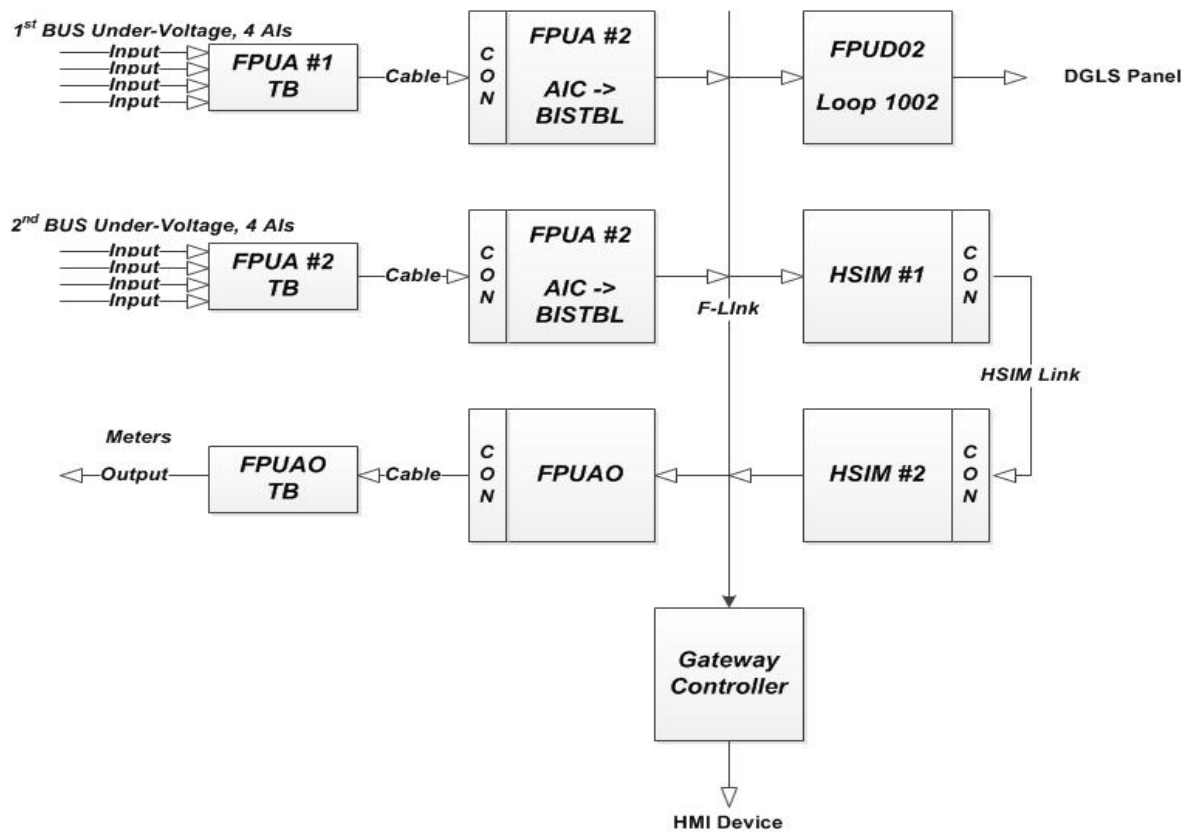


圖 25. DGLS 低電壓(Under-Voltage)警報展示組態

四、建議事項

- (一) 本次行程參加電廠效率分析技術研討會「進階電廠效率分析與異常偵測技術」與「基礎電廠效率分析技術」場次收穫良多，建議未來若有類似相關電廠效率分析之研討會時，可繼續規劃派員參與，與各國專家與現場人員討論實務技術，以利對電廠效率分析技術之提升，進而將此技術推廣至台灣各電廠。
- (二) 本次行程參訪 FirstEnergy IDEA 中心，學習 FirstEnergy 公司效能監測與診斷實務應用及相關因應措施，以及參訪 Intertek 公司，了解電廠營運成本分析軟體 COSTCOM 即時評估電廠營運之損害與成本，建議可借鏡國外領先技術與實務應用，做為未來台灣電業自由化之開放代輸及廠網分離等各種可能發展情境之重要參考。
- (三) 本次行程參訪 Intertek，Intertek 之資產完整性管理軟體 AWARE，目前唯一利用網路環境(Web-based)的一套檢視資料管理系統(Inspection Data Management System, IDMS)軟體，可記錄相關維修保養紀錄並將資訊分享給電廠人員、管理者等相關單位。可建議電廠引進相同或類似之資訊管理系統，對於電廠平時所需進行的設備維護與設備發生問題後之後續追蹤處理有相當大的幫助。
- (四) 從 FPGA HFC-6000 安全控制系統發展過程中，瞭解以 FPGA 實現柴油發電機自動加載器(Diesel Generator Load Sequencer, DGLS)之細部設計，目前國內尚未建立以 FPGA 設備進行數位化系統更新之經驗，建議現階段應蒐集相關資料並累積經驗，有助於未來 FPGA 設備在國內核電廠進行數位化系統更新與發展。

五、附錄

附錄一、**Power Plant Cycling – Impacts and Cost**

Power Plant Cycling – Impacts and Costs

EPRI Australian Generation Workshop

Nikhil Kumar

Director – Intertek AIM



Status Quo?



Valued Quality. Delivered.



Gas Price

Aging Fleet

Renewable

Deregulation

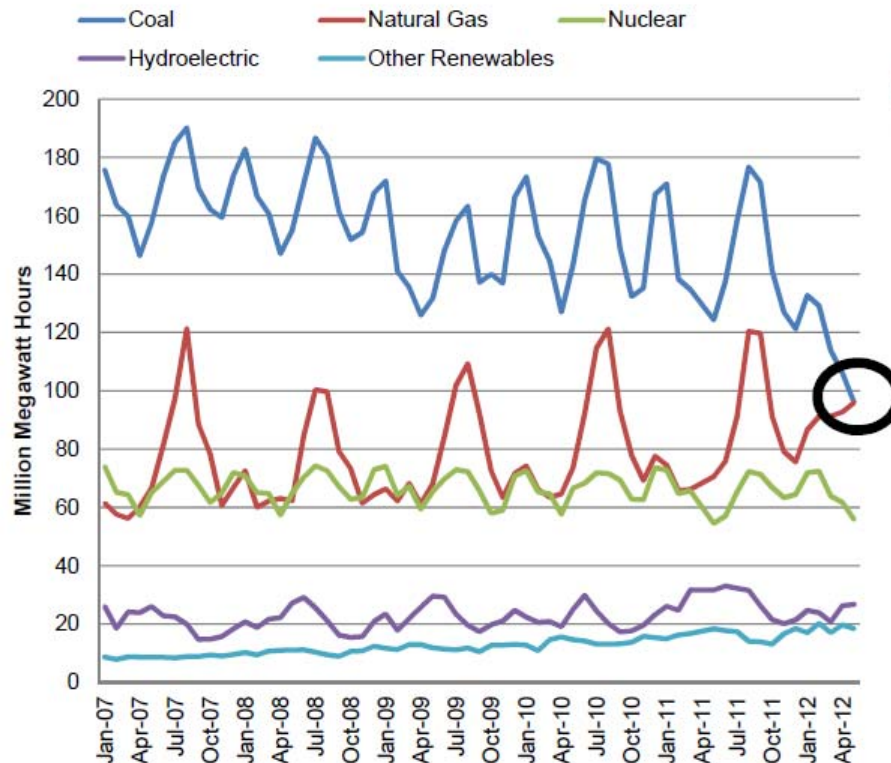
Increased Plant Cycling → Asset Integrity Risk

Natural Gas Price Impacts

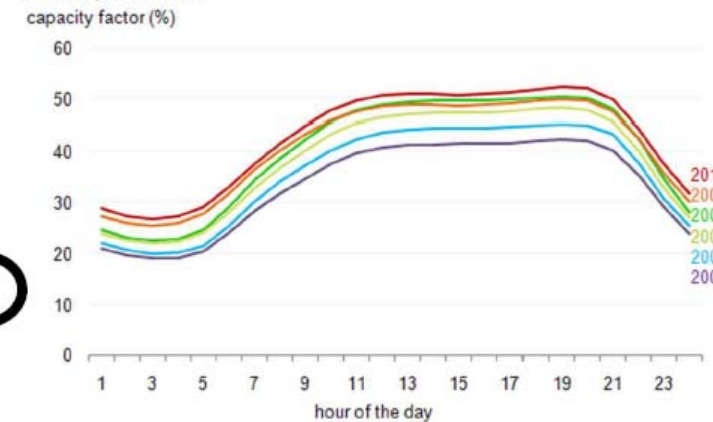


Valued Quality. Delivered.

Net Generation for United States



Average capacity factor for operating natural gas combined cycle plants by hour of the day, 2005-2010

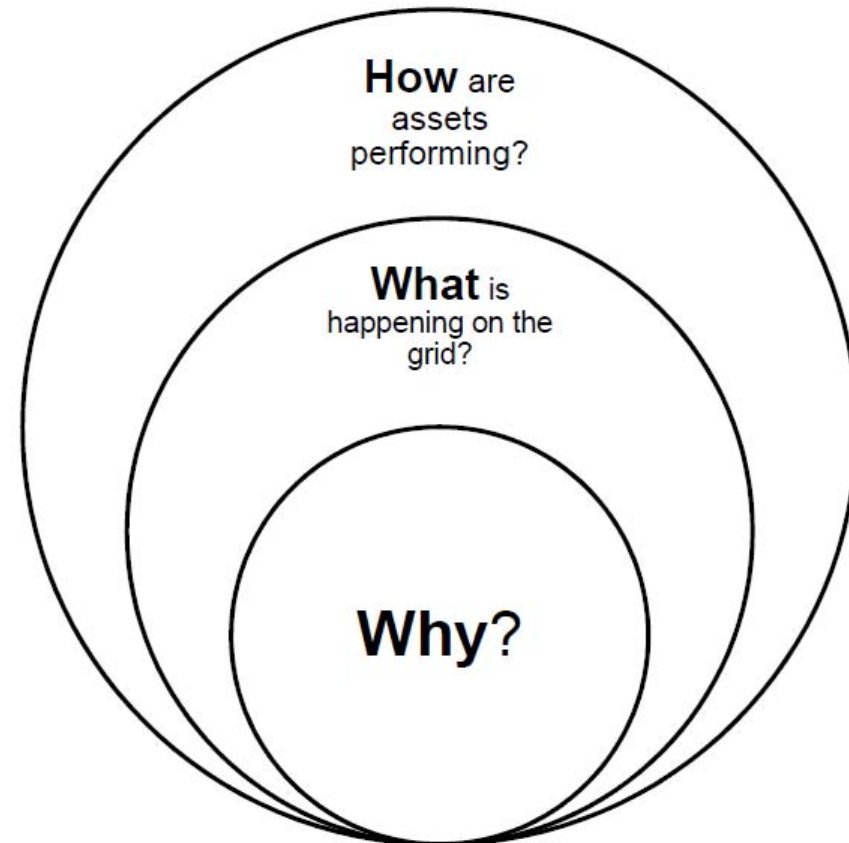


Source: U.S. Energy Information Administration, based on the Ventyx Energy Velocity Suite.

Note: The chart is derived from Continuous Monitoring Emissions System data required by the U.S. Environmental Protection Agency. The data contain numerous hourly unit-level attributes at fossil-fired (coal, gas, and oil) plants greater than 25 megawatts including net generation by hour and measures of capacity, which in turn can be used to compute average capacity factors by fuel type and prime mover.

Source Data: U.S. Energy Information Administration (EIA)

- Effect of Flexible Operation on Boiler Components
 - Fossil Steam Units
- Characterizing Flexible Operation of Combined Cycle Generation in United States
 - Large CT and CCGT



Benchmarking Analysis



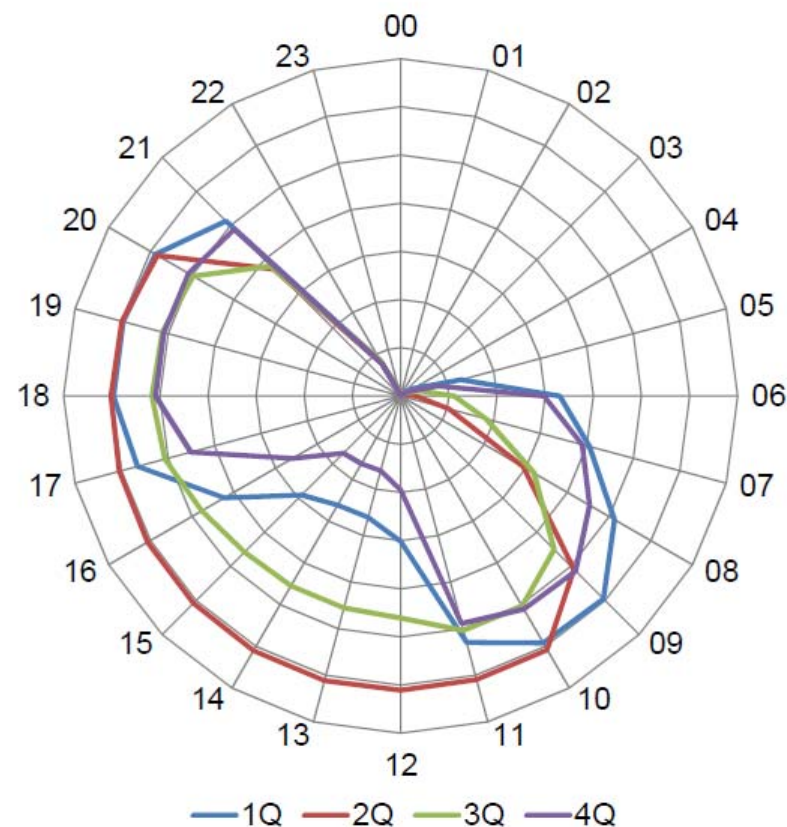
Valued Quality. Delivered.

High Level - Providing a benchmarking tool

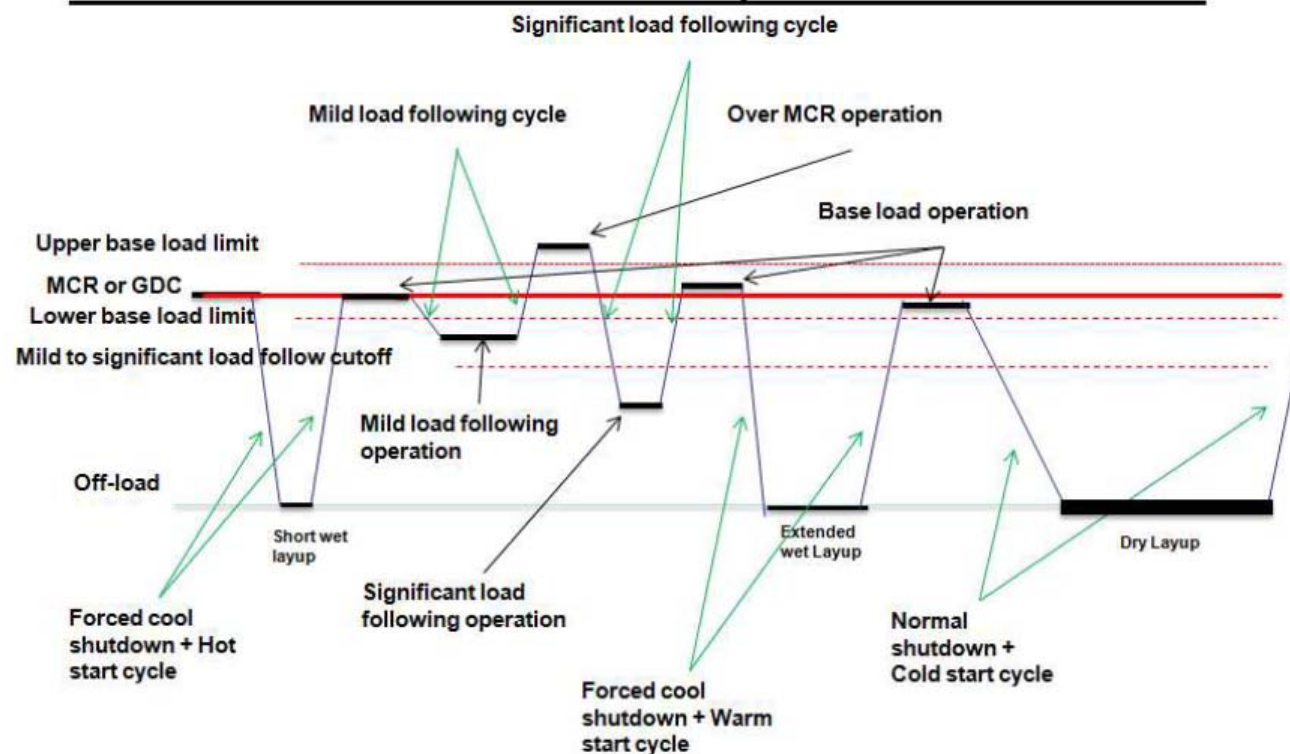
- Cycles per year
 - Characteristics of the cycles
- Ramp Rate on Start/Shutdown
- Low Load Operation
 - How deep is the load cycle?
 - How many hours do the units operate in the range.

Deep Dive – Impact of Cycling

- Damage Mechanisms
- Reliability and Risk
- Cycling Costs



Power Plant Flexible Operation Modes



Equivalent Hot Start (EHS)

EHS is a unit of cycling intensity. One normal hot start and shutdown cycle would produce about one EHS.

$$\text{EPRI-EHS} = (c1 \times \text{MLL}) + (c2 \times \text{SLL}) + (c3 \times \text{HS}) + (c4 \times \text{WS}) + (c5 \times \text{CS})$$

MLL = Count of Mild Load Follows

SLL = Count of Significant Load Follows

HS, WS, CS = Count of Hot, Warm and Cold Starts

Equivalent Operating Hours (EOH)

$$\text{EOH} = \text{D1 (Near GDC hrs)} + \text{D2 (>105\% GDC hrs)} + \text{D3 (MLL hrs)} + \text{D4 (SLL hrs)} + \text{D5 (Poor Layup hrs)} + \text{D6 (Normal Layup hrs)} + \text{D7 (Exceptional Layup hrs)}$$

>105% MCR hrs = hours per year above 105% GDC

Near GDC hrs = hours per year between 95% to 105% GDC

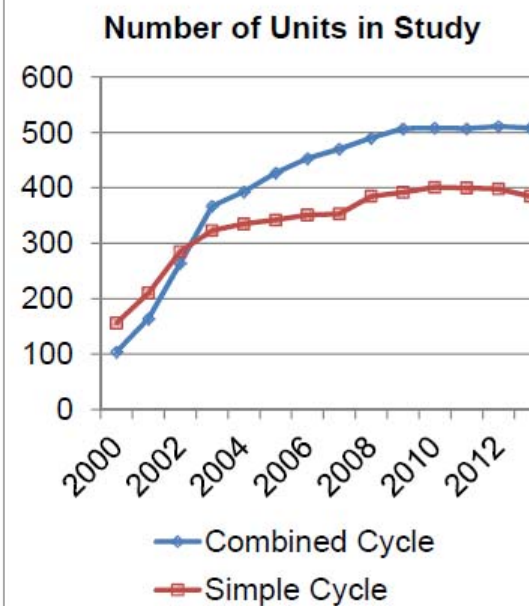
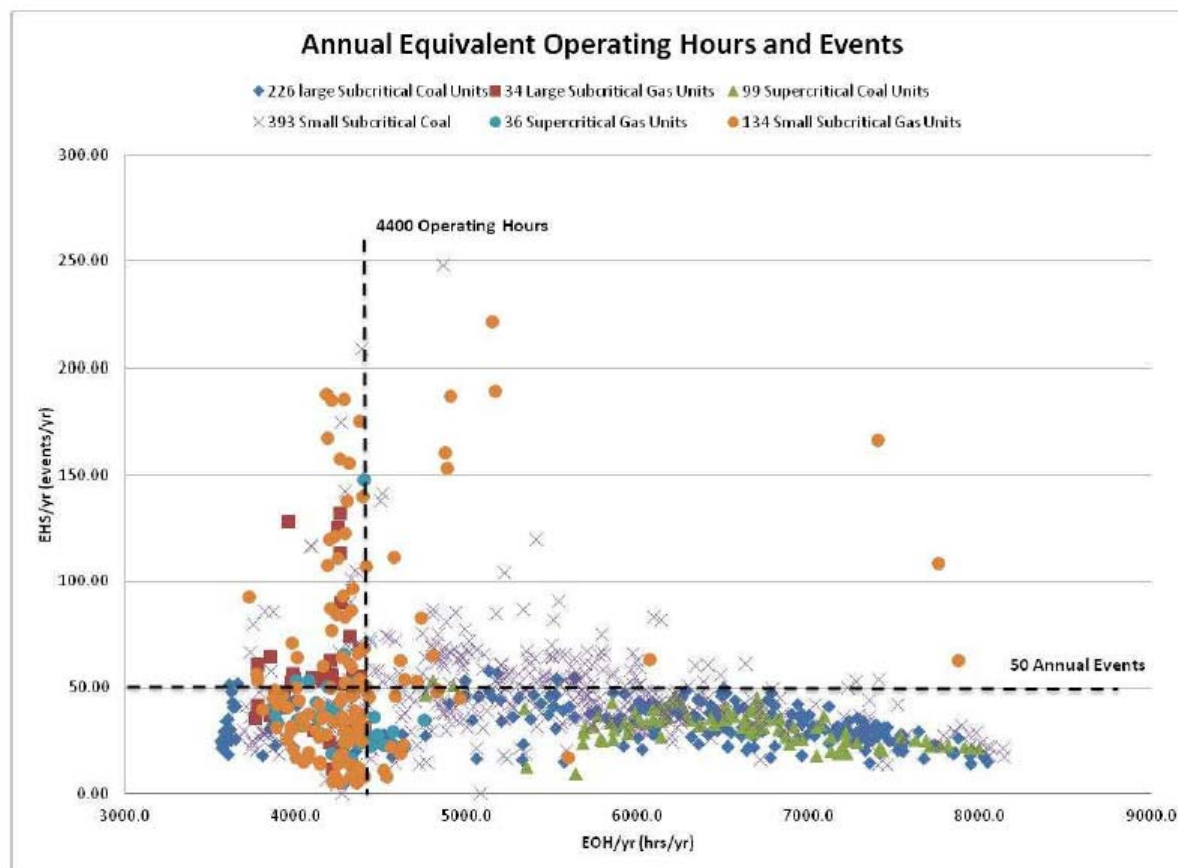
MLL hrs = hours per year between 80% to 95% GDC

SLL hrs = hours per year between 5% to 80% GDC

Study Sample



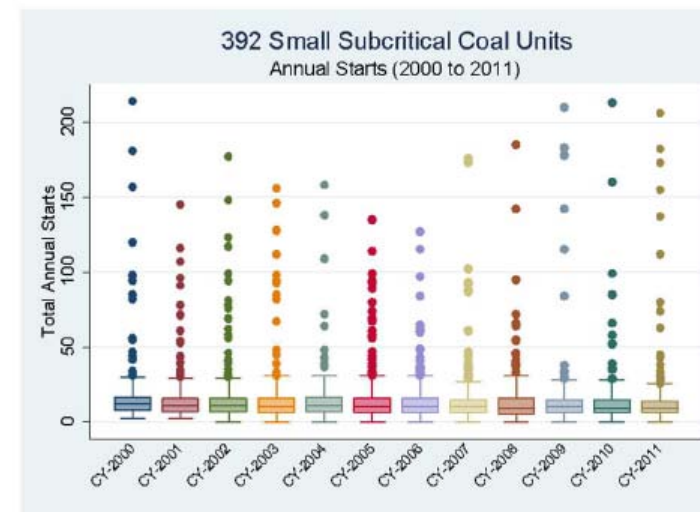
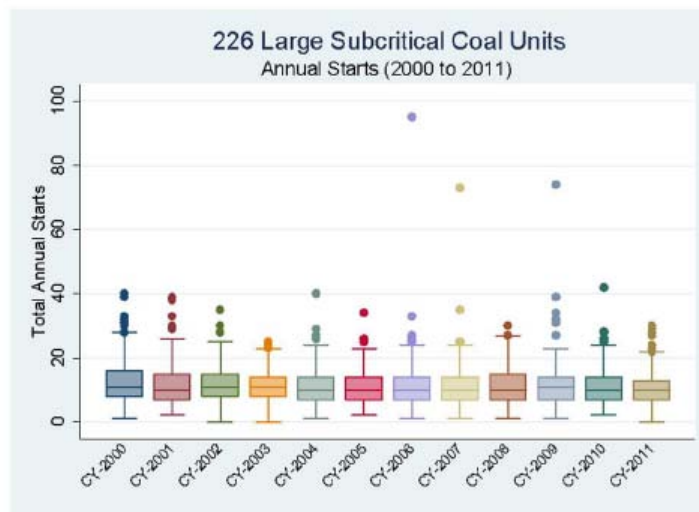
Valued Quality. Delivered.



Large and Small Coal Unit Cycling



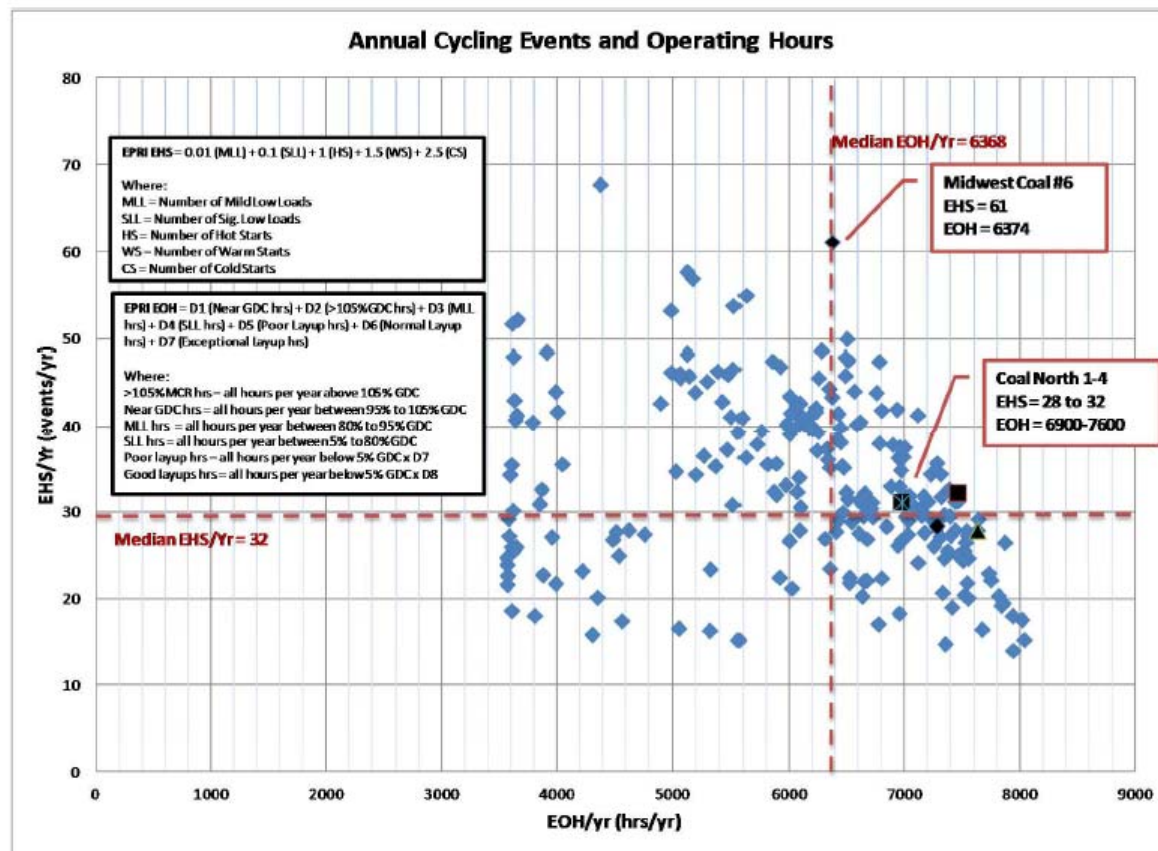
Valued Quality. Delivered.



Designed for Cycling Unit Benchmark

Intertek

Valued Quality. Delivered.



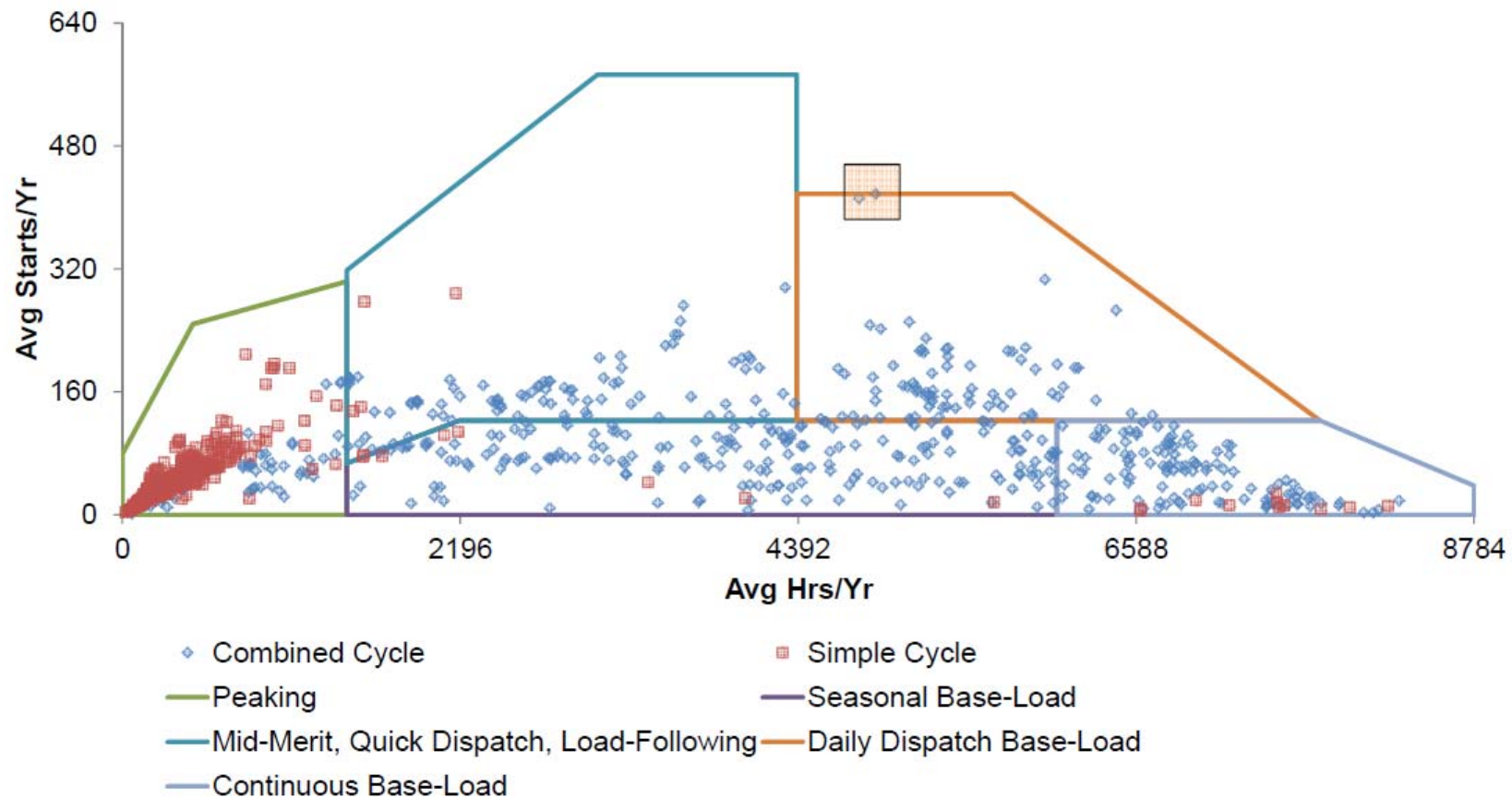
Midwest Coal #6

- B&W, natural circulation boiler
- 500 MW Capacity
- Low Load of 80 MW with igniters in service
- Steam turbine bypass system
 - valves and large drain lines are located between the primary and secondary SH to control boiler pressure
- A blowdown line also provides startup drum pressure control

Operating Domains – CCGT and CT (2000-2013)



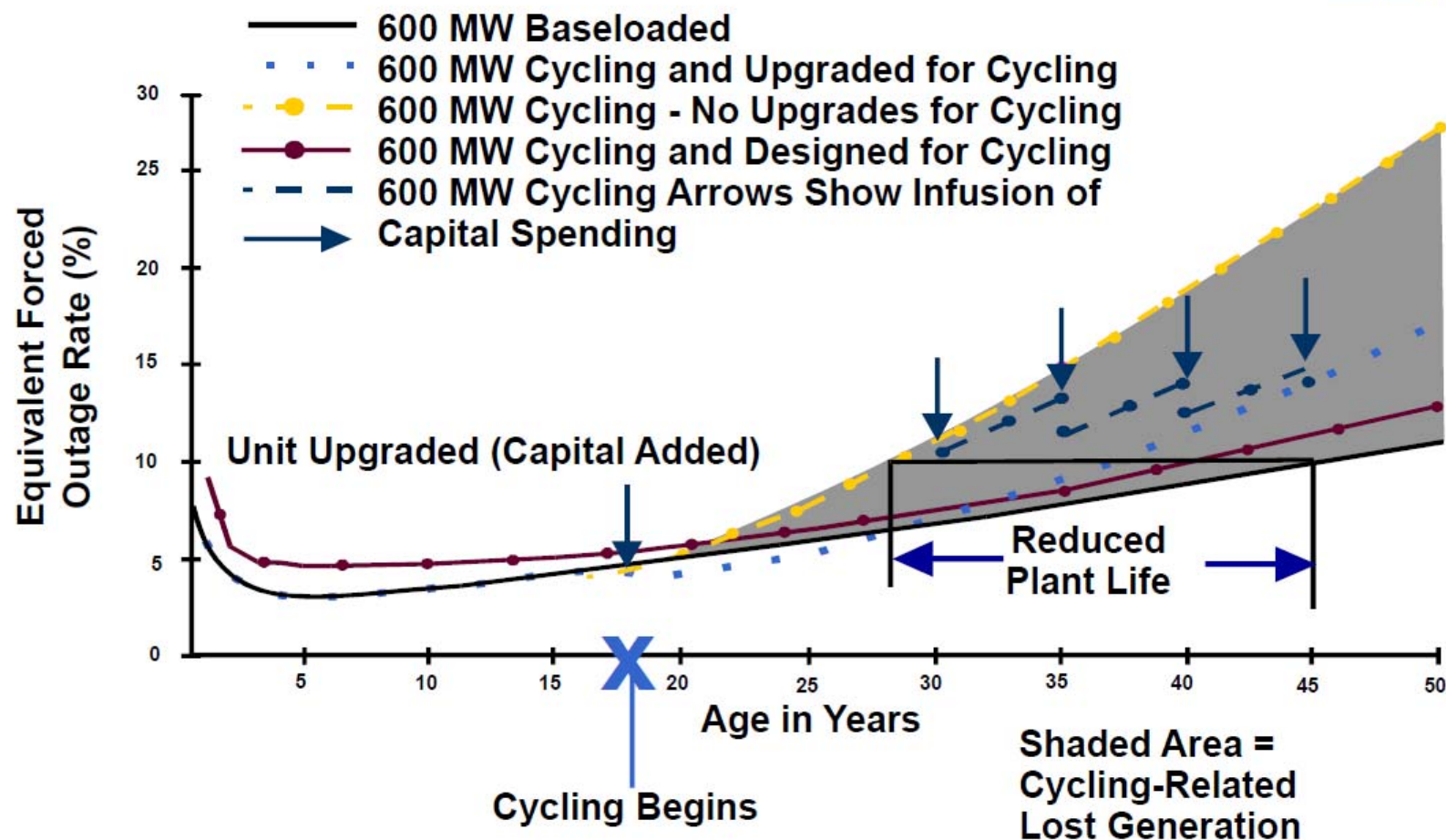
Valued Quality. Delivered.



Cycling Effects

Intertek

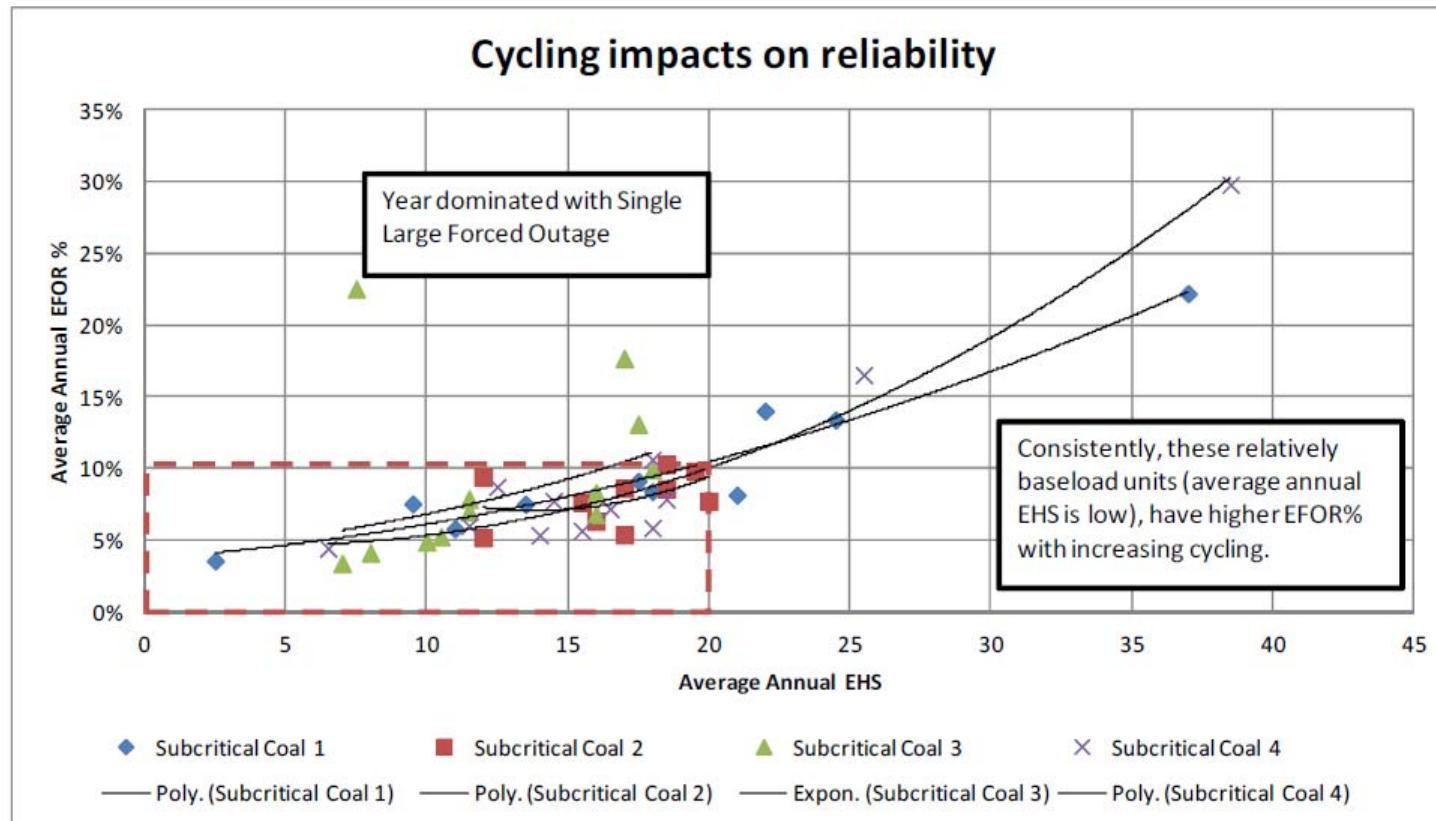
Valued Quality. Delivered.



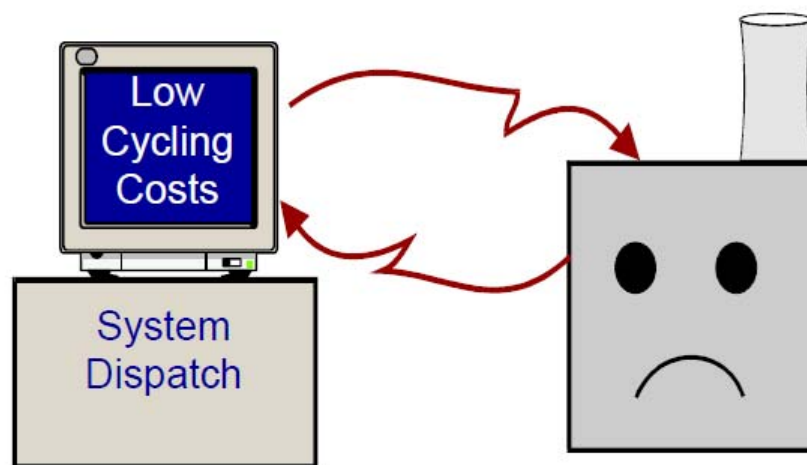
Cycling Impacts on Reliability – Empirical Evidence



Valued Quality. Delivered.



Problem Definition



Generation Units Originally Designed for Baseload Operations Running in Cycling Modes

Current System Operations are Likely to be Very NON-Optimal in Terms of Minimizing Long-Term Revenue Requirements

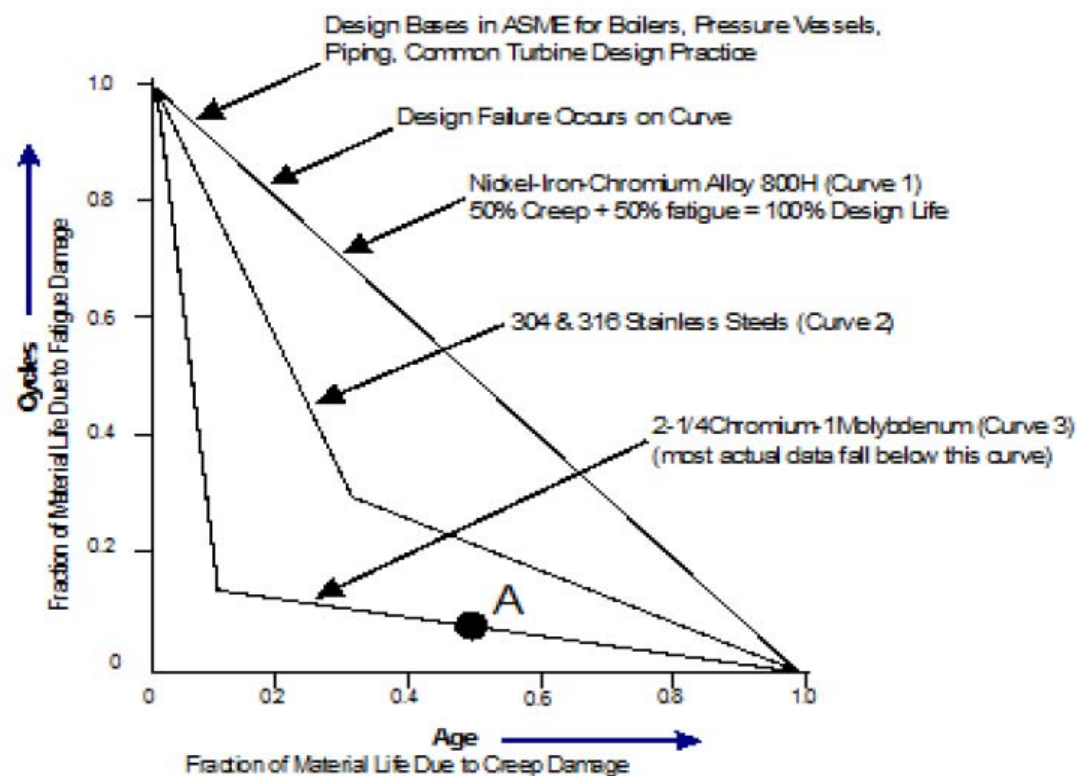
- **Increased Maintenance costs**
- **Higher EFOR and Higher Probability plant will not return to service as scheduled.**

Creep Fatigue Interaction (CFI) Design



Valued Quality. Delivered.

Curves for Several Materials

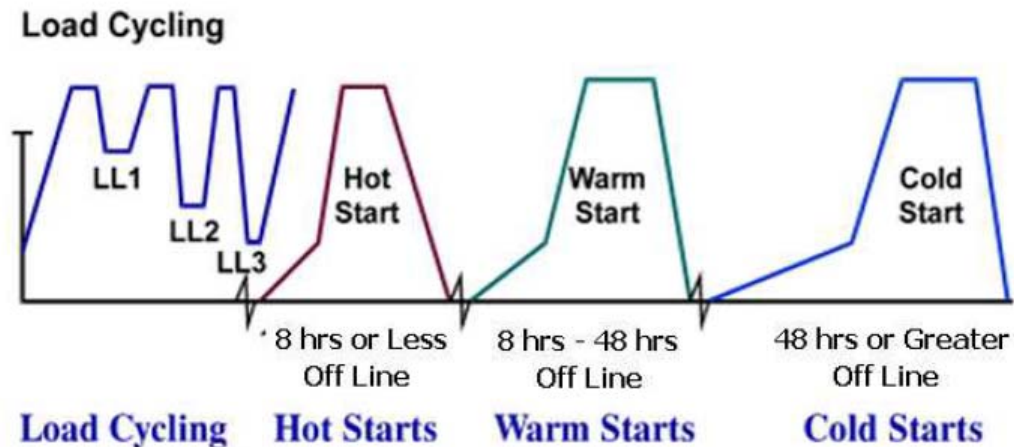


CFI adds significant damage! And shortens life!

Generation Unit Cycling Definitions



Valued Quality. Delivered.



Load Cycling

- LL1: Lowest Load at which design SH/RH temperatures can be maintained
- LL2: Current “Advertised” Low Load
- LL3: Lowest Load at which the unit can remain On-Line

