

出國報告（出國類別：實習）

# 更新超臨界鍋爐及附屬設備之設計、 製造及維修研習

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：邱進福 / 機械工程師

派赴國家：日本

出國期間：100 年 09 月 25 日~100 年 10 月 08 日

報告日期：100 年 11 月 18 日

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：更新超臨界鍋爐及附屬設備之設計、製造及維修研習

頁數 23 含附件：☐是 ☒否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：

台灣電力股份有限公司/陳德隆/(02)23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

邱進福/台灣電力公司/大林發電廠/機械工程師/(07)8711151~352

出國類別：☐1 考察☐2 進修☐3 研究 ☒4 實習☐5 其他

出國期間：100/09/25~100/10/08 出國地區：日本

報告日期：100/11/18

分類號/目

關鍵詞：

內容摘要：(二百至三百字)

超臨界貫流式火力發電機組將是本公司未來發電及世界潮流，超臨界鍋爐因材料科學的日新月異而使設計溫度及壓力條件不斷向上提昇，進而機組效率也不斷隨之提高。超臨界鍋爐異於亞臨界鍋爐之設計，其鍋爐熱循環已提升至單相循環，並無汽水鼓之設計，鍋爐蒸汽循環流程、蒸汽旁通系統及汽水分離器之設置，對機組起停及整體運轉操作、異常處理技術之實務經驗皆有必要更深入了解並汲取經驗，以作為鍋爐本體及相關輔機維護的策略制定參考，而使新建之超臨界機組整體故障率減低，運轉可靠度提升，以降低公司整體營運成本及提供電力系統的穩定度。鍋爐組為本公司之鍋爐維護單位，宜先行瞭解超臨界機組鍋爐設計概念及相關維護方法以作為日後新建超臨界機組設計及施工時能夠更有效參與，而使新電廠營運更順利。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://report.gsn.gov.tw>)

## 目 錄

|                   |         |
|-------------------|---------|
| 壹、研習目的            | ----- 1 |
| 貳、研習過程            | ----- 1 |
| 參、研習心得            |         |
| 一、三菱重工簡介          | -----2  |
| 二、三菱重工超臨界燃煤機組設計特色 | -----5  |
| 三、三、三菱重工新磨輪簡介     | -----21 |
| 肆、結語及建議           | -----23 |

## 壹、 研習目的

超臨界貫流式火力發電機組將是本公司未來發電及世界潮流，超臨界鍋爐因材料科學的日新月異而使設計溫度及壓力條件不斷向上提昇，進而機組效率也不斷隨之提高。超臨界鍋爐異於亞臨界鍋爐之設計，其鍋爐熱循環已提升至單相循環，並無汽水鼓之設計，鍋爐蒸汽循環流程、蒸汽旁通系統及汽水分離器之設置，對機組起停及整體運轉操作、異常處理技術之實務經驗皆有必要更深入了解並汲取經驗，以作為鍋爐本體及相關輔機維護的策略制定參考，而使新建之超臨界機組整體故障率減低，運轉可靠度提升，以降低公司整體營運成本及提供電力系統的穩定度。鍋爐組為本公司之鍋爐維護單位，宜先行瞭解超臨界機組鍋爐設計概念及相關維護方法以作為日後新建超臨界機組設計及施工時能夠更有效參與，而使新電廠營運更順利。

此次奉派前往日本 三菱公司實習更新超臨界鍋爐及附屬設備之設計、製造及維修相關技術，從 100.09/25 ~ 100.10/08 全部共十四天。本廠大一~大六機皆為亞臨界機組。未來公司新建汽力燃煤機組皆以超超臨界機組為規範，我輩有幸即將參與建廠，甚感與有榮焉。行前經理的指導得以收集相關資料並交付赴日本三菱的問題及任務，雖樂於面對如此挑戰，囫圇吞棗之後消化不良恐在所難免，惟希望不辜負公司的栽培，及長官們之愛護推薦，仍不揣淺陋，勉力完成本報告，期能有益於本報告之讀者，並祈先進同仁不棄，多多垂教。

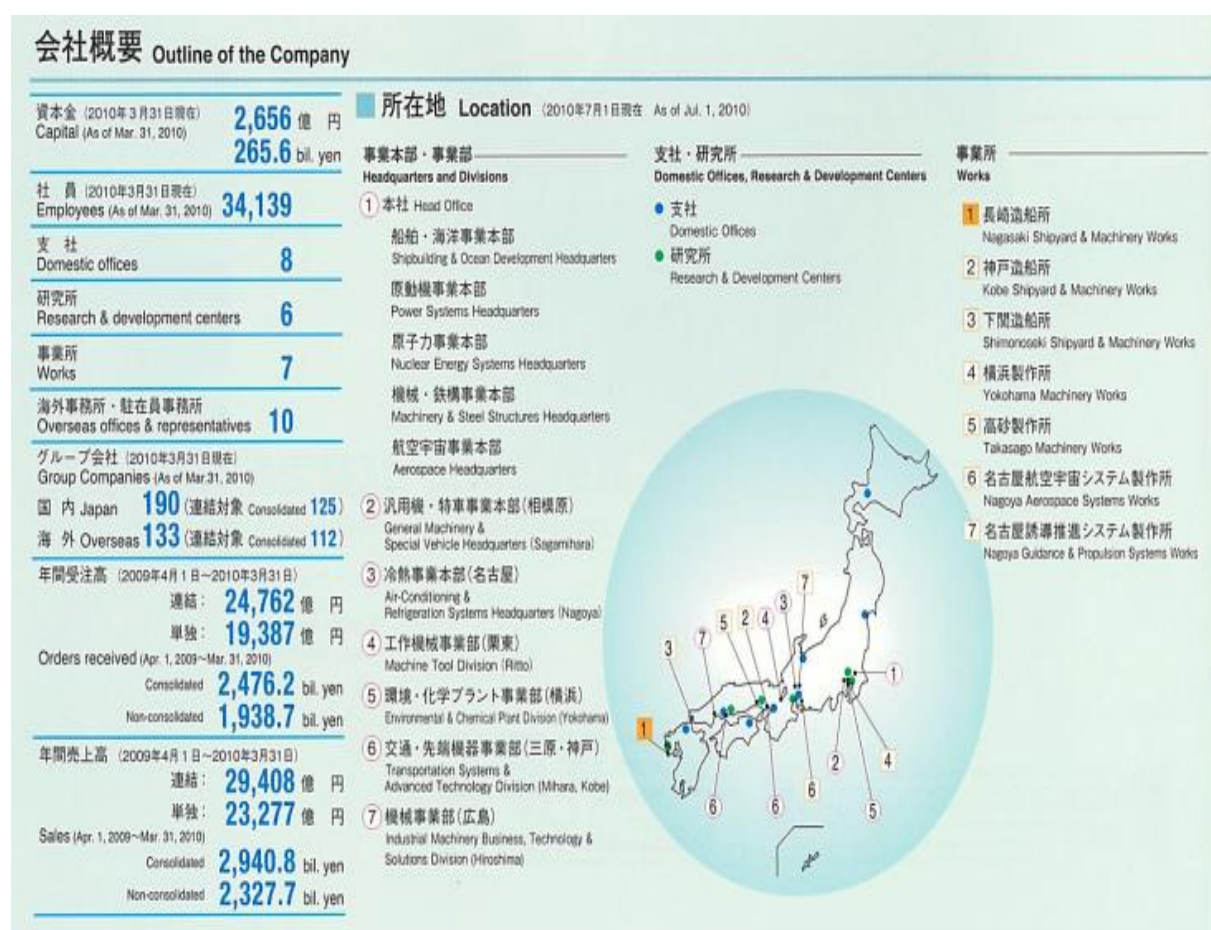
## 貳、 研習過程

| 日期                  | 城市及機構           | 工作內容                      |
|---------------------|-----------------|---------------------------|
| 100/9/25            | 高雄 → 福岡 → 長崎    | 去程                        |
| 100/09/26~100/10/01 | 長崎<br>三菱重工長崎造船所 | 更新超臨界鍋爐及附屬設備之設計、製造及維修維修研習 |
| 100/10/02~100/10/07 | 神戶<br>三菱重工神戶造船所 | 更新超臨界鍋爐及附屬設備之設計、製造及維修維修研習 |
| 100/10/08           | 日本關西 → 高雄       | 回程                        |

## 參、研習心得

### 一、三菱重工簡介

三菱重工是全球著名的發電設備和重型機械製造公司之一，在開發超臨界和超超臨界技術方面走在世界的前列，採用內螺紋管垂直管圈、變壓運行的超超臨界鍋爐在技術上代表了當前高效超臨界鍋爐的最新水準。三菱重工是目前世界上生產超臨界和超超臨界鍋爐最多和最大的火力發電設備製造商。下圖（1）為三菱重工事業分支圖，產品種類眾多。圖（2）為長崎造船所本工場簡介，主要生產產品為汽輪機及相關配件。圖（3）為長崎造船所香燒工場簡介，主要生產產品為鍋爐爐管及相關配件如過熱器、再熱器、水冷壁及省煤器等產品。圖（4）為三菱重工電力事業建廠實績。



圖（1）

## 本工場 Main Plant

安政4年(1857年)徳川幕府の長崎鋳鉄所設立に始まる。かつては戦艦「武蔵」を建造した船台と30万トンドックがあり、自動車運搬船、コンテナ船、護衛艦など多種多様な船の建造・修理改造を行っています。タービン工場は年間生産能力400万kWで、100万kWの大型事業用、地熱発電用、船用から各種産業用までの高性能蒸気タービンを高度に自動化された設備で製作しています。また、最先端技術製品を手掛けるエレクトロニクス工場や燃料電池工場、リチウム二次電池工場を有しています。

| 造船設備       |       |      |       |              |
|------------|-------|------|-------|--------------|
|            | 長さ(m) | 幅(m) | 深さ(m) | 能力(DWT)      |
| 第1ドック      | 375.0 | 56.0 | 14.0  | abt. 225,000 |
| 第2ドック(修繕用) | 350.0 | 56.0 | 14.0  | ≒ 300,000    |
| 第3ドック(修繕用) | 276.6 | 38.8 | 12.3  | ≒ 95,000     |
| 第1・2船台     | 324.0 | 56.0 | —     | ≒ 80,000     |
| 立神岸壁       | 226.0 | —    | 10.0  | ≒ 70,000     |
| 八軒家岸壁      | 155.0 | —    | 8.5   | ≒ 4,700*     |
| 向島岸壁       | 328.0 | —    | 9.5   | ≒ 300,000    |
| 鯉の浦岸壁      | 167.0 | —    | 7.5   | ≒ 260,000    |
| 水の浦岸壁      | 244.0 | —    | 6.0   | ≒ 90,000     |

\*排水トン

| 機械設備    |                                                                                                                                                                   |
|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 工 作 機 械 | 大型NC複合工作機械(2ガントリーブライマチック)<br>: (W)8,200×(H)4,200×(L)45,000 mm<br>大型NC旋盤 : (D)3,500×(L)12,000 mm<br>大型NC立旋盤 : (D)8,500×(H)5,000 mm<br>大型歯切盤 : (D)7,500×(W)2,300 mm |
| 組 立 設 備 | タービンロータ大型高速回転試験装置<br>タービンガバナテスト装置                                                                                                                                 |
| 製 缶 設 備 | 油圧プレス 8,000トン、6Mevライナック装置<br>焼鈍炉(B) 4,000×(H)3,200×(L)26,000 mm<br>クレーン能力 350トン(オーバーハング)                                                                          |
| ハイテク設備  | コンピュータ制御システム製作試験、環境試験設備、<br>シミュレータ訓練センター、遠隔支援センター<br>燃料電池製造設備                                                                                                     |

The history of the main plant began with the establishment of Nagasaki Yotetsusho Foundry by the Tokugawa Shogunate back in 1857. The plant features the building berth, on which the "Musashi" was built, and 300,000-ton dry docks. These shipbuilding facilities have been used for the construction, repair, and conversion of a variety of ships, such as car carriers, container carriers, escort ships. The turbine shops own the manufacturing capacity of 4,000 MW annually, in which high-performance steam turbines such as for large-sized utility power stations up to 1,000 MW, geothermal power plants, marine-use and various industrial power stations are manufactured by highly automated facility. And also there exist electronics shop, fuel cell shop and lithium-ion battery shop for advanced technology products.

| Dry Docks, Building Berths, and Outfitting Quays |            |             |           |                                  |
|--------------------------------------------------|------------|-------------|-----------|----------------------------------|
|                                                  | Length (m) | Breadth (m) | Depth (m) | Max. shipbuilding capacity (DWT) |
| No.1 Dry Dock                                    | 375.0      | 56.0        | 14.0      | abt. 225,000                     |
| No.2 Dry Dock (Repair)                           | 350.0      | 56.0        | 14.0      | ≒ 300,000                        |
| No.3 Dry Dock (Repair)                           | 276.6      | 38.8        | 12.3      | ≒ 95,000                         |
| No.1 & No.2 Building Berths                      | 324.0      | 56.0        | —         | ≒ 80,000                         |
| Tategami Quay                                    | 226.0      | —           | 10.0      | ≒ 70,000                         |
| Hachikenya Quay                                  | 155.0      | —           | 8.5       | ≒ 4,700*                         |
| Mukojima Quay                                    | 328.0      | —           | 9.5       | ≒ 300,000                        |
| Akunoura Quay                                    | 167.0      | —           | 7.5       | ≒ 260,000                        |
| Mizunoura Quay                                   | 244.0      | —           | 6.0       | ≒ 90,000                         |

\*Displacement tons

| Turbine and Boiler Manufacturing Facilities |                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Machining Facilities                        | Large NC combined production milling machine "GAUNTRY PLANOMATIC":<br>8,200 (W) × 4,200 (H) × 45,000 (travel) mm<br>Large NC lathe: φ 3,500 × 12,000 (L) mm<br>Large NC vertical lathe: φ 8,500 × 5,000 (H) mm<br>Large gear cutting machine: φ 7,500 × 2,300 (W) mm |
| Assembly Facilities                         | Turbine-rotor large high-speed rotation testing machine<br>Turbine governor test facilities                                                                                                                                                                          |
| Boiler Production Facilities                | 8,000-ton hydraulic press<br>Annealing furnace 4,000 (B) × 3,200 (H) × 26,000 (L) mm<br>6 Mev "LINAC" Non-Destructive Tester<br>350-ton overhead travelling crane (overhang)                                                                                         |
| High-tech Facilities                        | Computer control systems assembling tester<br>Environmental testing facilities, Simulator training center, Global net diagnostic center,<br>Fuel cell manufacturing facilities                                                                                       |

図(2)

## 香焼工場 Koyagi Plant

昭和47年(1972年)に完成した当社最大規模の工場。造船工場は長さ1,000メートルのドックをフルに生かした建造法でLNG船、LPG船、大型タンカーなどを効率よく建造しています。ボイラ工場は年間生産能力612万kWのわが国最大の規模で、最新鋭の自動化ラインと3,800トンの大型モジュールを製作可能な設備を有し、高性能・高品質の大型ボイラを製作しています。

| 造船設備    |       |       |           |                |
|---------|-------|-------|-----------|----------------|
|         | 長さ(m) | 幅(m)  | 深さ(m)     | 能力(DWT)        |
| 建造ドック   | 990.0 | 100.0 | 14.0~9.55 | abt. 1,000,000 |
| 修繕ドック   | 400.0 | 100.0 | 14.5      | ≒ 500,000      |
| 東1・2号岸壁 | 683.0 | —     | 9.5       | ≒ 500,000×2    |
| 東3号岸壁   | 370.0 | —     | 9.5       | ≒ 500,000      |

| 機械設備                                  |                                                                            |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 過 熱 器<br>チューブ工場<br>(ボイラ工作一課)          | TIG自動溶接装置、組立溶接ロボット<br>全自動連続曲げ装置<br>連続露溶体化熱処理装置                             |
| 火 炉 壁<br>節 炭 壁<br>チューブ工場<br>(ボイラ工作三課) | パネル自動溶接装置(44電極同時溶接)<br>全自動チューブ長尺化装置<br>スパイラルフィン溶接装置<br>組立溶接ロボット            |
| バ イ ブ<br>ヘ ッ ダ 工 場<br>(ボイラ工作一課)       | 高周波パイプベンダ<br>NCヘッダ穴明機、全自動円筒溶接装置<br>ヘッダ管台口溶接装置、電子ビーム溶接装置                    |
| ブ ロ ッ ク 化 工 場                         | 大型焼鈍炉(W)7,500×(H)7,500×(L)13,000 mm<br>クレーン能力 200トン(オーバーハング)<br>大型圧力容器溶接装置 |
| 組 立 設 備                               | 大型送風機試験装置、風車組立ライン                                                          |

Koyagi Plant is our largest, completed in 1972. The production facilities and methods employed there represent the concentration of corporate wisdom the company mobilized, that fully takes advantage of the 1,000 m long building dock. Here, LNG carriers, LPG carriers and large tankers are built. Specialized boiler shops, the largest in the country, have an annual manufacturing capacity of 6,120 MW. These state-of-the-art facilities produce top quality, top performance boilers in large-size modules of up to 3,800 tons on highly automated production lines.

| Dry Docks and Outfitting Quays |            |             |           |                                  |
|--------------------------------|------------|-------------|-----------|----------------------------------|
|                                | Length (m) | Breadth (m) | Depth (m) | Max. shipbuilding capacity (DWT) |
| Building Dry Dock              | 990.0      | 100.0       | 14.0~9.55 | abt. 1,000,000                   |
| Repair Dry Dock                | 400.0      | 100.0       | 14.5      | ≒ 500,000                        |
| No.1 & No.2 East Quays         | 683.0      | —           | 9.5       | ≒ 500,000×2                      |
| No.3 East Quay                 | 370.0      | —           | 9.5       | ≒ 500,000                        |

| Boiler and Wind Turbine Manufacturing Facilities       |                                                                                                                                                                                          |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Superheater & Reheater Tube Shop (No.1 Boiler Shop)    | TIG automatic welder, Assembling and welding robot<br>Continuous bender<br>Continuous heat-treatment facilities                                                                          |
| Furnace Wall & Economizer Tube Shop (No.3 Boiler Shop) | Multiple head panel processing machine-capable of 44 welding head simultaneous welding<br>Automatic tube elongation facilities<br>Spiral fin-tube welder<br>Assembling and welding robot |
| Pipe-Header Shop (No.1 Boiler Shop)                    | High-frequency pipe bender<br>NC header boring machine<br>MIG automatic welder<br>Header nozzle welding robot<br>Electron beam welding machine                                           |
| Module Shop (No.3 Boiler Shop)                         | Large sized annealing furnace<br>7,500 (W) × 7,500 (H) × 13,000 (L) mm<br>200-ton overhead travelling crane (overhang)<br>Welding machine for large sized pressure vessel                |
| Assembly Facilities                                    | Large Fan test facilities, Wind turbine-generator assembly line                                                                                                                          |

図(3)

| Customer Station              | MW    | Turbine Inlet<br>Steam Condition |               | Fuel | Commercial Operation |
|-------------------------------|-------|----------------------------------|---------------|------|----------------------|
|                               |       | Press. (MPa)                     | Temp.<br>(°C) |      |                      |
| Kyushu EPCO Matsuura #1       | 700   | 25.0                             | 538/566       | Coal | 1989                 |
| Chubu EPCO Kawagoe<br>#1/#2   | 700   | 31.0                             | 566/566/566   | LNG  | 1989/1990            |
| Chubu EPCO Hekinan #1         | 700   | 24.1                             | 538/566       | Coal | 1991                 |
| Soma Joint EPCO Shinchi<br>#2 | 1,000 | 24.1                             | 538/566       | Coal | 1995                 |
| Tohoku EPCO Haramachi<br>#1   | 1,000 | 24.5                             | 566/593       | Coal | 1997                 |
| Chugoku EPCO Misumi #1        | 1,000 | 24.5                             | 600/600       | Coal | 1998                 |
| Kobe Steel IPP Kobe #1        | 700   | 24.1                             | 538/566       | Coal | 2002                 |
| Kansai EPCO Maizuru #1        | 900   | 24.5                             | 595/595       | Coal | 2004                 |
| Tokyo EPCO Hirono #5/#6       | 600   | 24.5                             | 600/600       | Coal | 2004/2013            |
| Mexico CFE Pacifico           | 678   | 24.2                             | 538/566       | Coal | 2010                 |
| Indonesia Paiton III          | 856   | 24.1                             | 538/566       | Coal | 2012                 |

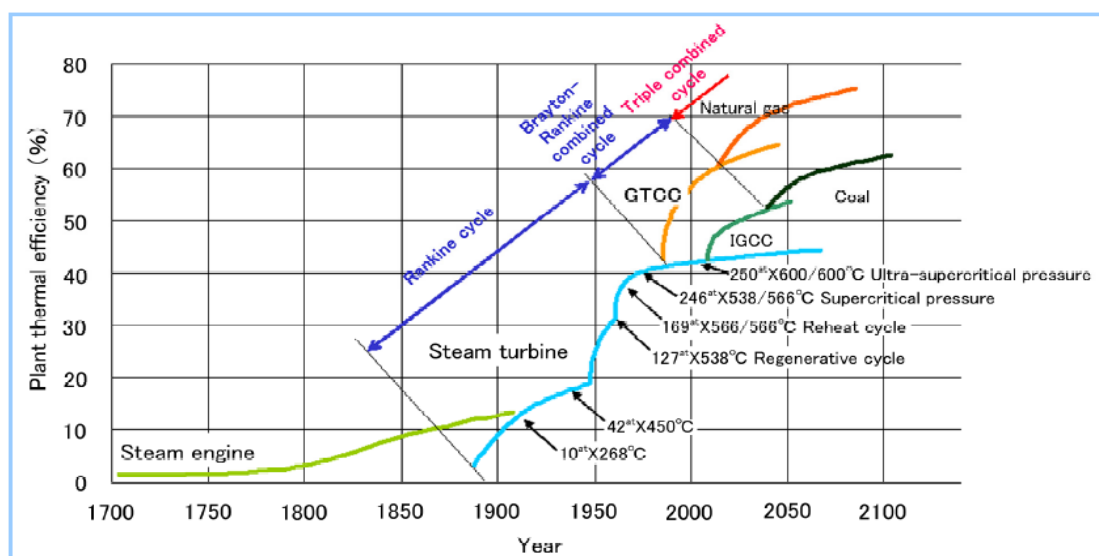
圖（4）三菱重工電力事業實績



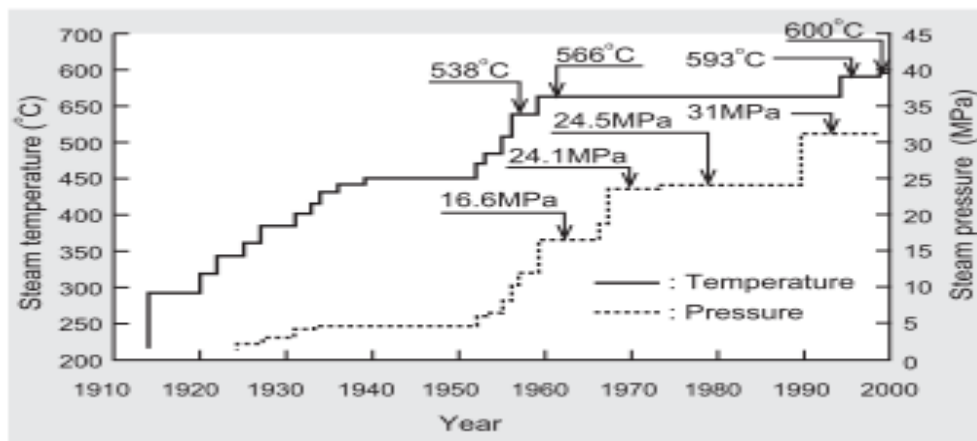
誠摯感謝甲斐德親先生、難波圭小姐、磯崎順一先生、山口雅義先生及市之宮聰士先生的接待與指導。

## 二、 三菱重工超臨界燃煤機組設計特色

發電機組汽力循環的工作介質為水。超臨界是熱力學的一個概念。水及水蒸汽在臨界壓力  $22.129\text{MPa}$  對應的飽和溫度為  $374.15^{\circ}\text{C}$ 。超臨界機組即指蒸汽壓力達到超臨界狀態的發電機組。下圖（5）為發電機組效率及蒸汽條件演進圖，可以清楚了解到隨著材料的進步，機組效率不斷提昇。圖（6）為蒸汽條件與機組效率關係圖。



圖（5）



圖（6）

## 1、貫流式鍋爐水牆佈置的類型

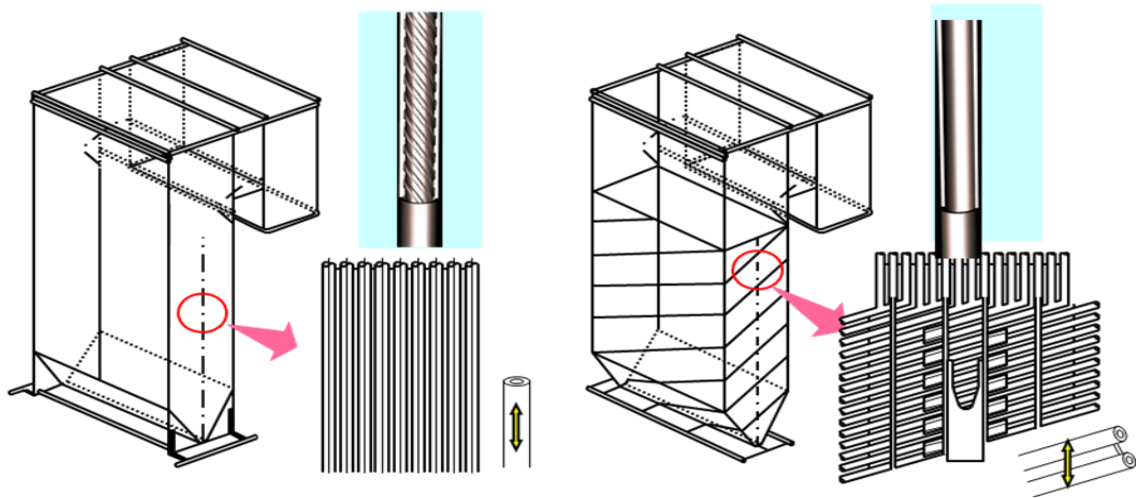
貫流式鍋爐的特點和類型主要體現在蒸發受熱面的結構方式和汽水系統兩個方面。貫流式鍋爐與汽水鼓鍋爐在結構上的差異，除了無汽水鼓之外，主要在於爐膛水牆管的佈置型式。在貫流式鍋爐中，飼水在飼水泵壓頭的作用下依次通過省煤器、蒸發受熱面和過熱器。由於介質在蒸發受熱面中為強制流動，因此貫流式鍋爐蒸發受熱面佈置較自由，水牆管的佈置型式很多。

貫流式鍋爐三種傳統的水牆管基本型式，它們是水平圍繞管圈型（拉姆辛型）、多次上升型垂直管壁（本生型，Benson）、彎曲管圈型（蘇爾壽型，Sulzer）。三菱重工超臨界燃煤機組水牆佈置為垂直式內螺紋管可變壓調整的水牆設計。爐膛下輻射區一次上升內螺紋管垂直水牆，上輻射區為光管垂直水牆。在一次上升內螺紋管垂直水牆的基礎上加裝有混合器及分配器的水牆中間聯箱，以降低水牆出口的溫度偏差，且水牆管內裝設可調式節流圈，以便調節流量。且水牆管屏具有（a）結構簡單，製造容易，安裝方便，便於吊掛。（b）水牆管屏分段較長，工地焊接工作量小，如圖（7）。（c）相較於螺旋管圈水牆鍋爐其底灰斗與水牆管屏連接角落處，易產生積灰情況下，有不易積灰之優點，如圖（8a），（8b）。

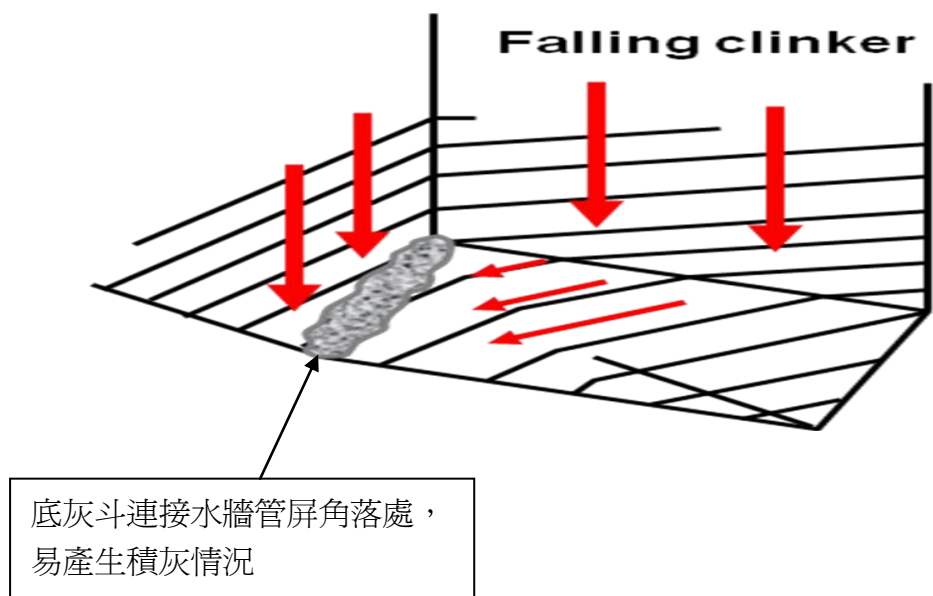
## 2、貫流式鍋爐的工作特點

在貫流式鍋爐中，由於取消了汽水鼓且介質一次性通過各受熱面，因此其工作過程具有如下特點：

(1) 由於沒有汽水鼓，也就是蒸發受熱面和過熱受熱面之間沒有中間分離容器隔斷，因此貫流式鍋爐水的加熱、蒸發和蒸汽過熱的受熱面並沒有固定的界限。如鍋爐吸熱和其他條件都不變時，若減小飼水流量，則只需吸收較少熱量就可使水達到沸點，故開始沸騰點前移，即加熱水段（省煤器）的長度縮小，蒸發段



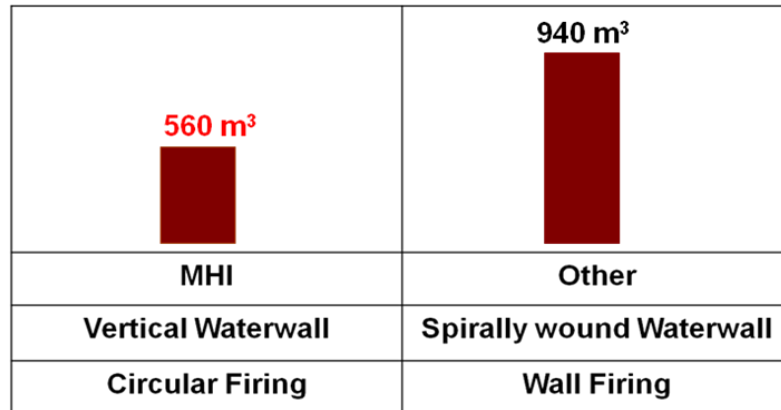
圖（7）水冷壁結構示意圖



圖（8a）螺旋管圈水牆與底灰斗連接結構示意圖

## **Comparison of Slag Accumulation**

**Slag accumulation on the water wall of 700MW coal fired boilers after 1 year operation.**



34

圖（8b）水牆積灰比較圖

長度也會縮小。但鍋爐受熱管的總長度是不變的，所以過熱段的長度勢必增長，也就是增大了作為過熱器的受熱面，因而過熱蒸汽溫度上升。反之，飼水量增大時，過熱蒸汽溫度將下降。

- (2)由於沒有汽水鼓，貫流式鍋爐的水容量及相應的蓄熱能力大為降低，一般約為同參數汽水鼓鍋爐的 1/2~1/4。因此，當負載發生變化時，貫流式鍋爐壓力變化速度也比較快，這就要求貫流式鍋爐具有更靈敏的調節控制技術。
- (3)乾態時，由於沒有汽水鼓和汽水分離裝置，貫流式鍋爐不能連續沖放，飼水帶入鹽類除了蒸汽帶走一部分外，其餘的部分將沉積在鍋爐的受熱面中。因此，貫流式鍋爐對飼水品質的要求很高。
- (4)貫流式鍋爐的蒸發受熱面中，介質的流動有時會出現一些流動不穩定、脈動等問題。這些貫流式鍋爐所特有的流動現象直接影響到鍋爐的安全運轉。
- (5)汽水鼓鍋爐中由於循環倍率高，蒸發受熱面出口的蒸汽含量是很低的，蒸發受熱面管內的換熱大多屬於泡狀沸騰（或稱核態沸騰），出現膜態沸騰傳熱惡化的可能性較小，因而受熱面的管壁溫度略高於介質溫度。在貫流式鍋爐的蒸發受熱面中，飼水從開始沸騰一直到完全蒸發，在高熱負荷、高含汽率條件下，就

很容易出現傳熱惡化而處於膜態沸騰狀態，這時受熱面的壁溫會急劇升高，甚至超溫燒壞，工作不安全。因此，防止傳熱惡化是貫流式鍋爐設計和運轉中必須注意的問題。

(6)在貫流式鍋爐中，蒸發受熱面的進口和出口並不像汽水鼓鍋爐那樣是匯合在一個壓力下，而是存在著壓差，其數值為蒸發受熱面中介質的流動壓降，因此貫流式鍋爐要有較高的飼水泵壓頭。在一般電廠汽水鼓鍋爐中汽水側阻力約為 1~2MPa，貫流式鍋爐中則約為 3~5MPa。

(7)啓動時自然循環鍋爐的蒸發受熱面是靠鍋爐水的自然循環而得到冷卻保護的。在貫流式鍋爐中則應有專門的系統，以便在啓動時有足夠的水量通過蒸發受熱面，保護受熱面管壁不致被燒壞。

(8)在貫流式鍋爐中蒸發受熱面不構成循環，無汽水分離問題。因此，當壓力增高，汽水密度差減小，以致於超臨界壓力時，貫流式鍋爐仍能可靠地工作。對汽水鼓鍋爐來說，自然循環鍋爐和控制循環汽水鼓鍋爐的壓力不應超過 19MPa。

### 3、沸騰傳熱惡化的推遲與防止措施

貫流式鍋爐蒸發受熱面的沸騰傳熱惡化現象主要與介質的質量流速、工作壓力、含汽率和管外熱負荷等因素有關，並常以臨界含汽率作為判斷沸騰傳熱惡化出現的界限。

只要管內介質流動正常，管壁溫度仍遠低於鋼材的極限允許溫度。近幾十年來，鍋爐設計工作壓力已提高到亞臨界及超臨界壓力，鍋爐爐膛受熱面熱負荷也增大很多。實際證明，即使在未發生水動力多值性、汽水流量脈動以及過大的熱偏差等情況下，也會發生沸騰管壁超溫燒損的問題。究其原因，是沸騰管內側的放熱過程在一定條件下發生了沸騰傳熱惡化現象。此時，介質對管子的冷卻能力急劇減弱，致使管壁溫度升高到不能允許的數值。這個問題無論在汽水鼓鍋爐還是在貫流式鍋爐中都可能發生。但是，由於貫流式鍋爐的工作壓力高、循環倍率低 ( $K=1.0$ )，這個問題就更為突出。在貫流式鍋爐蒸發受熱面中，介質狀態經過泡狀、環狀和霧狀流動而到單相蒸汽，而介質含汽率 $x$ 由 0 到 1.0 逐漸上升。因此，可以說貫流式鍋爐蒸發受熱面的沸騰傳熱惡化，特別是第二類沸騰傳熱惡化是不可避免的。對沸騰傳熱惡化問題有兩種預防方法；一是徹底防止沸騰傳熱惡化發生；二是允許它發生，但把沸騰傳熱惡化發生的位置推移至熱負荷較低處，使管壁溫度不致超過允許值。在貫流式鍋爐中，蒸發管內必然會出現蒸乾

現象。因此，問題的關鍵是降低沸騰傳熱惡化時管壁溫度，而不是防止它的產生。目前採取的措施有：

### (1)、保證一定的質量流速

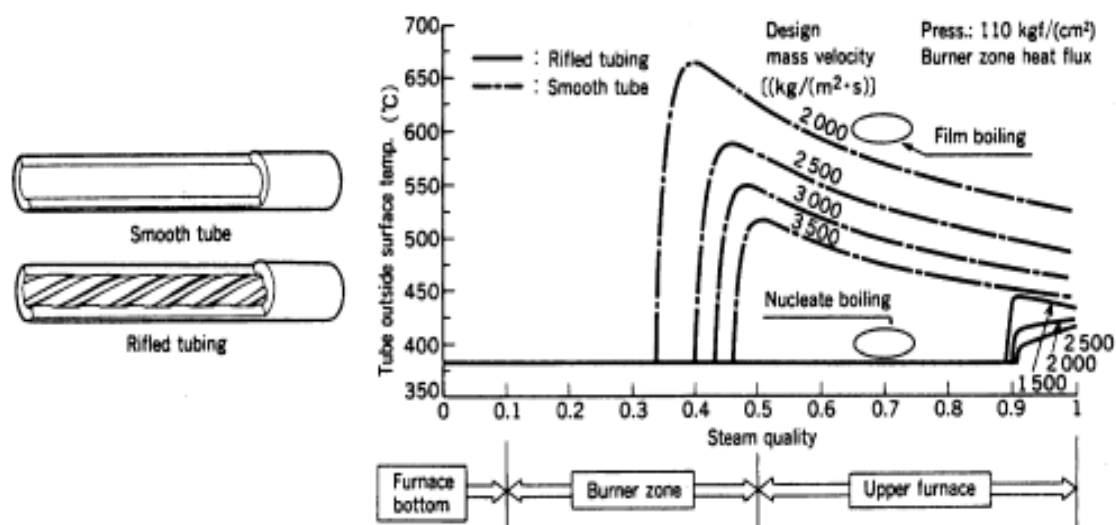
提高沸騰管中介質的質量流速是改善傳熱情況，降低沸騰傳熱惡化時出現壁溫峰值的有效措施，還可提高臨界含汽率。使傳熱惡化的位置向低熱負荷區移動或移出水牆管工作範圍而不發生傳熱惡化。不論是亞臨界壓力還是超臨界壓力貫流式鍋爐，提高介質的質量流速都可使管壁溫度情況得到改善。但是，過高的質量流速勢必增加鍋爐中介質的流動阻力和水泵功率消耗，因此質量流速也不能過高。

### (2)、採用內螺紋管或加裝擾流子

目前水牆管的型式主要有 3 種：(a) 光管；(b) 內螺紋管；(c) 交叉來福擾流子。國外對不同水牆管，在亞臨界和超臨界壓力下，對它們的傳熱方式做了大量試驗。圖(9)是在亞臨界壓力下做的試驗，圖示表明由光管改為螺紋管對推遲傳熱惡化都是有效的。因為內螺紋和來福線都增加了管內介質的擾動強度，所以可以明顯降低管壁溫度。

### (3)、降低受熱面的熱負荷

傳熱惡化區管壁溫度的峰值同該處受熱面的熱負荷有直接關係，熱負荷越高則壁溫峰值越大。為了降低傳熱惡化時的壁溫峰值，可將爐膛燃燒器沿高度方向拉開，採用多個功率較小的燃燒器，設法減小爐內的熱偏差方式，以減小爐內局部熱負荷。在燃油及燃氣鍋爐上採用煙氣再循環，對降低傳熱惡化時的壁溫也是有效的。



圖(9) 來福管與光管溫度效應比較

## 4、超臨界貫流式鍋爐啓動特點及啓動系統

### (1)、貫流式鍋爐與汽水鼓鍋爐的啓動區別

爲汽水固定的分界點，水在鍋爐管中加熱、蒸發和過熱後直接向汽輪機供汽，而在啓停或低負載運轉過程中有可能提供的不是合格蒸汽，可能是汽水混合物，甚至是水。因此，貫流式鍋爐必須配套一個特有的啓動系統，以保證鍋爐啓停和低負載運轉期間水牆管的安全和正常供汽。汽水鼓鍋爐有自然循環鍋爐和強制循環鍋爐。自然循環鍋爐蒸發受熱面內的介質流動依靠下降管中的水和上升管（水牆管）中的汽水混合物之間的密度差產生的壓力差進行循環流動。強制循環鍋爐蒸發受熱面內的介質除了依靠水和汽水混合物的密度差以外，主要依靠爐水循環泵的壓頭進行汽水循環流動。自然循環鍋爐和強制循環鍋爐均帶有一個很大的汽水鼓對汽水進行分離，汽水鼓作爲分界點將鍋爐受熱面分爲加熱蒸發受熱面和過熱受熱面兩部分。貫流式鍋爐是靠飼水泵的壓力，使鍋爐中的介質，水、汽水混合物和蒸汽一次通過全部受熱面。它只有互相連接的受熱面，而沒有汽水鼓。

自然循環鍋爐在點火前鍋爐補水至汽水鼓低水位，此時水牆管中的水處於靜止狀態，鍋爐點火後，水牆管吸收爐膛輻射熱，水溫升高，水循環開始建立。隨著燃料量的增加，蒸發量增大，水循環加快，受熱強的水牆管管內介質流速增加。因此，啓動過程水牆管冷卻充分，運轉安全。強制循環鍋爐在鍋爐上水後點火前，循環泵就開始工作，水牆管系統建立了循環流動，從而保證了水牆管在啓動過程中的安全。

貫流式鍋爐在啓動前必須由鍋爐飼水泵建立一定的啓動流量和啓動壓力，強迫介質流經受熱面。只有這樣才能在啓動過程中使受熱面得到冷卻。

### (2)、配置汽水分離器和洩水回收系統

超臨界鍋爐運轉在正常範圍時，鍋爐飼水靠飼水泵壓頭直接流過省煤器、水牆管和過熱器。貫流式運轉狀態的負載從鍋爐滿負載到貫流式最小負載，貫流式最小負載一般爲 25%~35%。

低於該貫流式最小負載，飼水流量要保持恒定。例如在 20%負載時，最小流量爲 35%意味著在水牆管出口有 20%的飽和蒸汽和 15%的飽和水，這種汽水混合物必須在水牆管出口處分離，乾飽和蒸汽被送入過熱器，因而，在低負載時超臨界鍋爐需要汽水

分離器和洩水回收系統。洩水回收系統是超臨界鍋爐在低負載工作時必需的另一個系統，它的作用是使鍋爐安全可靠地啟動及其熱損失最小，並可顯著地延長分離器洩水閥的壽命。一般有帶低負載循環泵和帶熱交換器 2 類洩水回收系統，其洩水合格時送入除氧器，回收介質和熱量。

### (3)、需有專門的啟動旁路系統

貫流式鍋爐的啟動特點是在鍋爐點火前就必須不間斷地向鍋爐進水，建立起足夠的啟動流量，以保證飼水連續不斷地強制流經受熱面，使其得到冷卻。

一般高參數大容量的貫流式鍋爐都採用機爐聯合啟動的單元制系統。在單元制系統啟動中，汽輪機要求暖機、沖轉的蒸汽在相應的進汽壓力下具有 50℃ 以上的過熱度，其目的是防止低溫蒸汽送入汽輪機後凝結，造成汽輪機的水擊，因此貫流式鍋爐需要設置專門的啟動旁路系統來排除這些不合格的介質。另外，啟動時的熱量損失和凝結水耗量很大，設置啟動旁路系統也是為了回收這部分熱量和介質，同時，在啟動初期還可以通汽冷卻再熱器，使再熱器得到保護。

### (4)、啟動期間需維持足夠的啟動流量和啟動壓力

貫流式鍋爐啟動時，由於不存在自然循環，所以貫流式鍋爐受熱面唯一的冷卻方式是，從鍋爐開始點火就必須不間斷地向鍋爐進水，並保持一定的流量和工作壓力，以保證受熱面得到正常的冷卻。有些貫流式鍋爐甚至採用全壓啟動。可見，貫流式鍋爐的啟動過程主要是介質的升溫過程。

啟動過程中的介質流量和壓力的選擇，直接關係到啟動過程的安全性和經濟性。

啟動壓力一般指啟動前在鍋爐水牆管系統中建立的初始壓力。它的選擇除與鍋爐型式有關，還與下列因素有關：

a. 受熱面內的水動力特性：貫流式爐蒸發受熱面內的水動力特性與其工作壓力有關，隨著壓力的提高，能改善或避免水動力不穩定性，減輕或消除管間脈動。

b. 介質膨脹現象：啟動壓力越高，汽水比容差越小，介質膨脹量越小，這樣啟動分離器的容量可以相對選擇的小一些。

c. 節流閥的磨蝕：對於外置式分離器和全壓啟動內置式分離器來說，在鍋爐啟動時，本體壓力高於分離器壓力，用閥門進行節流。顯然壓力越高，閥門的節流越大，對閥門的磨蝕也越大。

d. 飼水泵的耗電：啟動壓力越高，啟動過程中飼水泵的耗電越大。

綜上所述，在一定的啓動流量下，啓動壓力高，則汽水密度差小，對改善水動力特性，防止脈動、停滯和減少啓動時的膨脹量等都有利。但啓動壓力高，會導致飼水泵的耗電增加，加速飼水閥的磨損，並引起振動和雜訊。因此，在閥門品質允許的條件下，啓動壓力可儘量選高一些，超高壓和亞臨界壓力貫流式鍋爐的啓動壓力一般爲 7~8Mpa。而目前超臨界和超超臨界鍋爐水牆管普遍採用了螺旋管圈或垂直內螺紋管，啓動壓力對水動力的穩定性影響不大，鍋爐基本都選用了零壓力啓動。啓動分離器採用了足夠容量的排放閥，可滿足汽水膨脹時水的排量。由於採用內置式分離器和變壓啓動，對排放閥門的腐蝕甚微。

鍋爐啓動流量的大小直接影響啓動的安全性和經濟性。在一定的啓動壓力下，啓動流量越大，則介質流過受熱面的流速越大，這對受熱面的冷卻、水動力的穩定性和防止汽水分層等都有利。但啓動流量過大，則啓動時間延長，啓動中介質和熱量的損失增大，同時啓動旁路系統設計容量也要增大。反之，啓動流量過小，受熱面冷卻和水動力穩定就得不到保證，因此，選擇啓動流量的原則是在保證受熱面得到可靠冷卻和介質流動穩定的條件下，啓動流量盡可能選擇得小一些。超臨界貫流式爐的啓動流量一般選取爲額定流量的 25%~35%，中國大陸引進前蘇聯超臨界鍋爐啓動流量均爲 30%MCR，中國大陸石洞口二廠 ABB 超臨界鍋爐的啓動流量爲 35%MCR。丹麥超超臨界鍋爐的啓動流量爲 30%MCR，而日本超臨界鍋爐啓動流量選取的較小，一般爲 25%~30% MCR。

純貫流式鍋爐啓動流量由飼水泵提供，帶啓動循環泵和複合循環超臨界鍋爐的啓動流量由循環泵提供 20%~25%MCR 流量，飼水泵提供 5%~10% 的流量。帶循環泵的鍋爐在啓停或低負載運轉過程中，介質、熱量損失較小，具有突出的優點。

三菱重工超臨界鍋爐的最低直流負荷爲 25%MCR 流量，再循環泵的設計流量爲 25%。在鍋爐啓動過程中，飼水泵始終保持 5% 最小給水量，再循環泵的最大實際流量爲 20% 即水冷壁在啓動過程中始終保持 25% 流量。

#### (5)、啓動時間短、速度快

自然循環和強制循環鍋爐有一只容積很大的汽水鼓，它的直徑、長度和厚度都較大。在啓動升溫、停爐降溫過程中都要保證汽水鼓各部分加熱、冷卻均勻，這必然限制了升溫和降溫速度。貫流式鍋爐沒有汽水鼓，受熱部件中厚壁部件較少，承壓部件大部份是由小直徑薄壁管組成，既是內置式啓動分離器，其直徑、壁厚比汽水鼓小得多，如

600W 級超臨界鍋爐內置式啓動分離器壁厚比亞臨界鍋爐汽水鼓壁厚小一半多。因此，在啓、停過程中介質元件受熱、冷卻容易達到均勻，升溫、冷卻速度可加快，與汽水鼓爐相比將大大縮短啓、停時間。內置式分離器工作原理是：鍋爐在起停蒸發受熱面的汽水混合物切向進入分離器，經離心分離後，蒸汽由分離器上部引出進入過熱器系統，水從下部排出入儲水罐或排至擴容器。

#### (6)、啓動過程中進行汽、水受熱面冷、熱態清洗

貫流式鍋爐在運轉中是不能排污的，進入貫流式鍋爐的飼水一次被蒸發成蒸汽，飼水中的雜質一部分直接溶解於過熱蒸汽中帶往汽輪機，其餘部分都沉積在鍋爐受熱面內壁，這對鍋爐和汽輪機的安全和經濟運轉是很不利的；因此，在鍋爐點火前和啓動過程中，貫流式鍋爐的汽水受熱面都必須在一定流量下進行清洗，以保證合格的汽水品質。清洗包括啓動點火前的冷態清洗和啓動過程中的熱態清洗。清洗的污垢主要由兩部分組成，一部分是鍋爐本身和循環系統在停運期間生成的腐蝕產物；另一部分是運轉中受熱面上的鹽垢。在機組起動水質不合格時，將水排放至廢水槽再處理，水質合格則冷凝器循環使用。分離器疏水也可隨著機組負荷提高通入除氧器循環使用以達到加熱除氧器的熱回收功能。

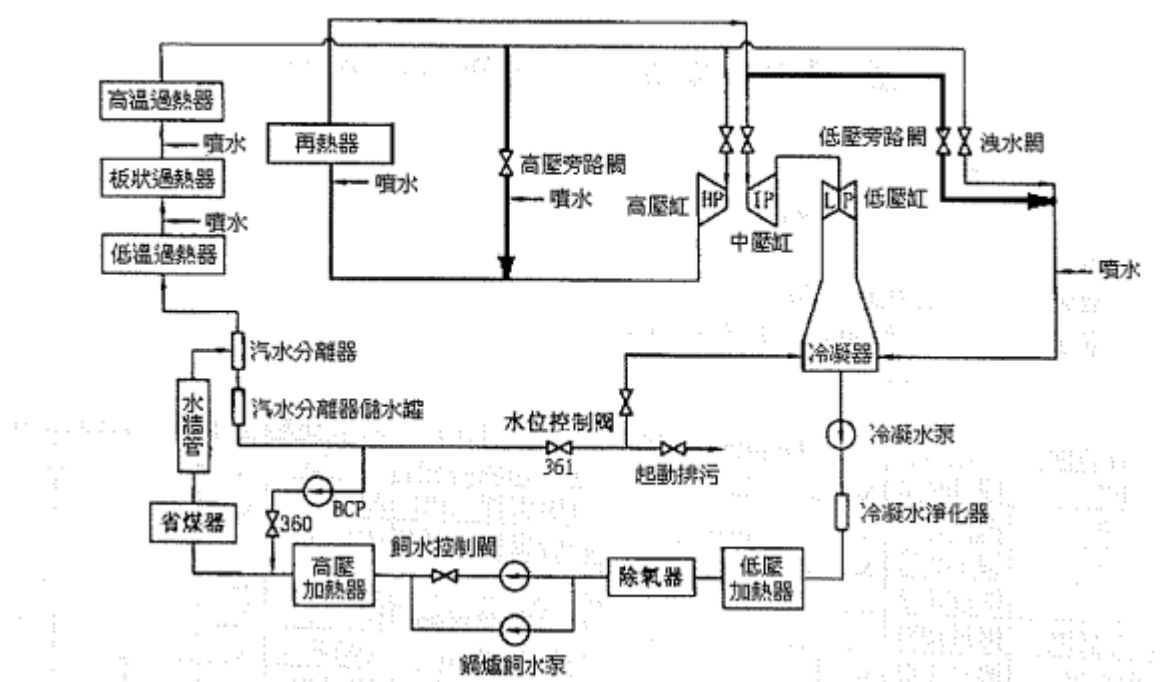
#### (7)、帶鍋爐循環泵的啓動系統

一般使用再循環泵與鍋爐飼水泵並聯的方式。這樣可以不必使用特殊的混合器，當循環泵故障時無需首先採用隔絕水泵，也不致對飼水系統造成危害。再循環泵充滿飽和水，一旦壓力降低有汽化的危險。

再循環泵與鍋爐飼水泵的並聯佈置方式可用於變壓運轉的超臨界機組啓動系統，也可應用於亞臨界壓力機組部分負載或全負載複合循環(又稱低倍率直流鍋爐)的啓動系統中。採用帶再循環泵的啓動系統，可減少啓動介質及熱量的損失。

圖(10)為帶鍋爐循環泵的啓動系統簡圖。在鍋爐啓動情況下，由分離器經 361 閥到冷凝器的管路是在冷啓動時供水再循環和啓動過渡階段控制分離器儲水罐水位用的。在冷爐啓動時，鍋爐先要進行冷態清洗，清洗後的爐水通過 361 閥後的排污管排出系統外，水質達到一定要求後，關閉 361 出口排污閥，爐水通過 361 閥到冷凝器，到鍋

爐供水再循環；此時啟動循環泵，鍋爐點火，進行熱態清洗，通過爐水品質來確定是否升溫升壓。在達到要求後，升溫升壓時的鍋爐水循環要求的最低流量主要通過 BCP 循環泵和鍋爐飼水泵相互協調配合來滿足鍋爐最低流量 25% 的要求。此時 361 旁路主要用作分離器儲水罐水位控制用。在汽水分離器進口的水全部變為蒸汽時，汽水分離器為乾態運轉，此時鍋爐進入貫流式運轉狀態，BCP 停運，360 閥、361 閥關閉，鍋爐進入變壓運轉狀態。該系統在鍋爐啟動階段不損失介質和熱量。



圖（10）帶鍋爐循環泵的啟動系統簡圖

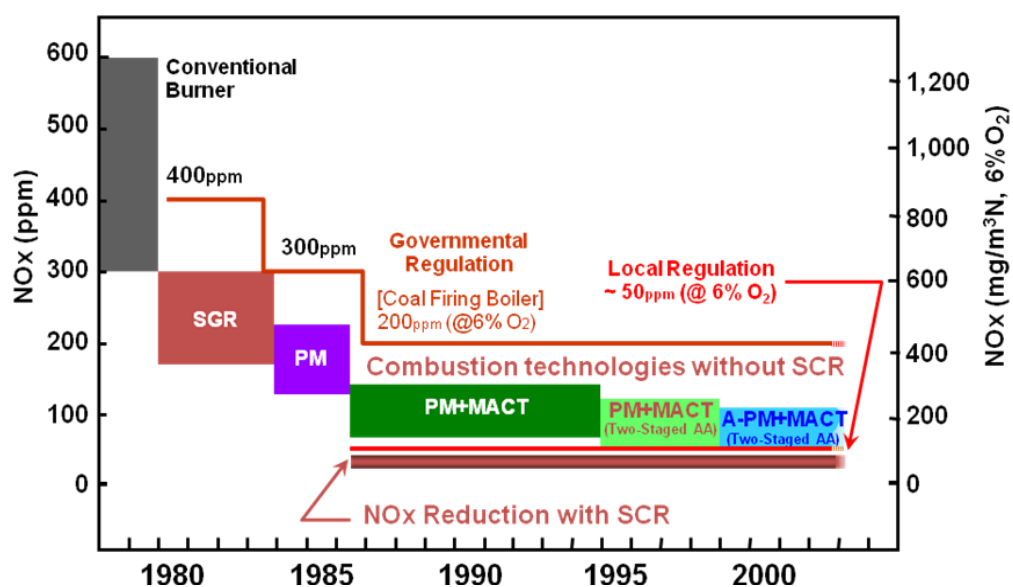
## 5、三菱重工低 NO<sub>x</sub> 燃燒系統

三菱重工低 NO<sub>x</sub> 技術演進過程如圖（11），及燃燒配置圖，爐膛燃燒器如圖（12）、（13）、（14）所示。

直流燃料器一般採取四角佈置，四個角上的燃燒器的幾何軸線與爐膛中央的一個假想圓相切，形成切圓燃燒方式。所謂切圓燃燒是指燃燒器中燃料與空氣按假想切圓的切線方向噴入爐膛後，產生旋轉上升氣流，進行燃燒的方式。如圖（15）。並利用濃、淡火燄的控制及火上風門及輔助風門的調配使 NO<sub>x</sub> 產生量為最小。

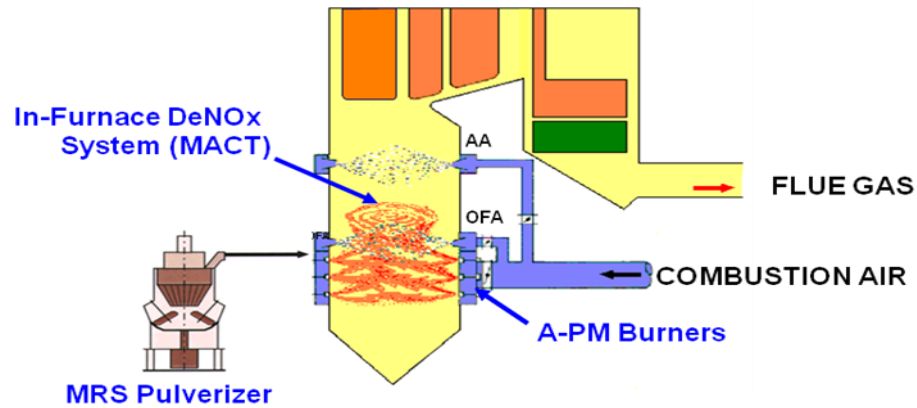
粉煤機磨輪由液壓油泵輸出動力，經由控制連桿施力於磨輪上，隨著飼煤量的變化而增減磨輪上的壓力，保持粉煤機的最佳的磨煤效率以產生最小的排渣量及最佳的燃燒效率。

藉由在磨煤室粉煤管出口加裝旋轉分離器（MRS）如圖（16），進一步篩選粉煤細度，讓粗顆粒粉煤再一次落下研磨，細粉煤經由一次風的吹送進入爐膛。經由控制 MRS 的轉速可以適度的使粉煤細度，如圖（17），，達成燃燒要求以增進機組效率及減少未燃碳及 NO<sub>x</sub> 的生成。但是 MRS 轉速太低會造成出口粉煤顆粒太大而不易燃燒造成鍋爐熱分佈不平均而損害鍋爐及污染排放量增加。MRS 轉速太高，會增加粉煤機磨煤效率降低與排渣量增加。



圖（11）三菱重工低 NO<sub>x</sub> 技術演進過程

## Low NOx Combustion Technologies



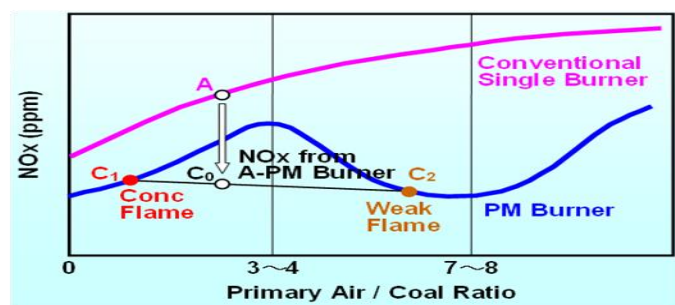
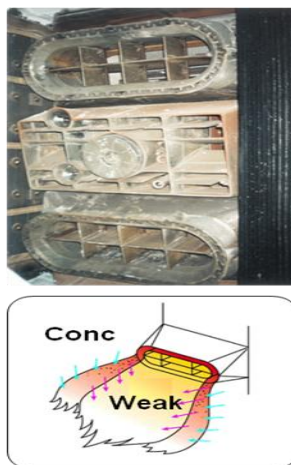
### A-PM Burner + In-Furnace DeNOx System (MACT) + MRS Pulverizer

AA : Additional Air                      A-PM : Advanced Pollution Minimum  
 OFA : Over Fire Air                      MRS : Mitsubishi Rotary Separator  
 MACT : Mitsubishi Advanced Combustion Technology

圖（12）三菱重工燃燒配置圖

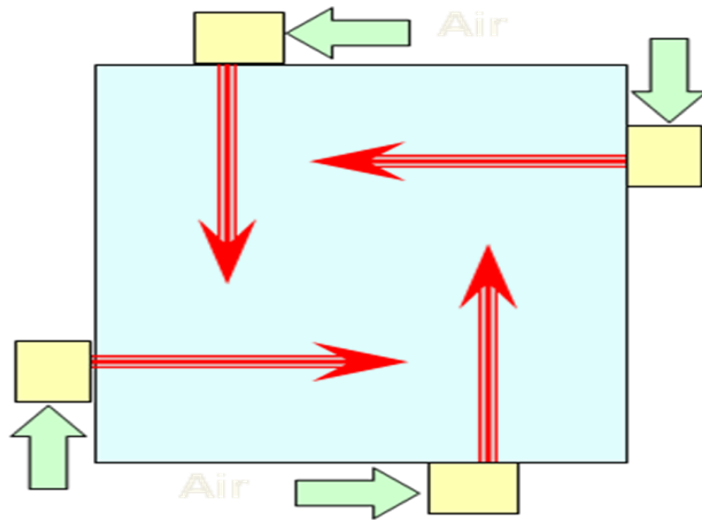
### A-PM Burner

- Divide Combustion Flame into Conc. and Weak Flames
- Conc. and Weak Flames make NOx Emission Lower

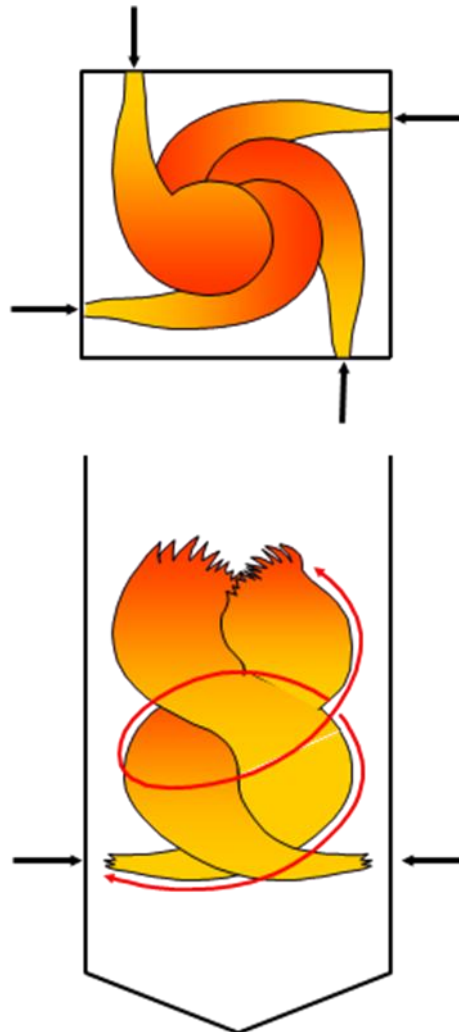


A-PM : Advanced Pollution Minimum

圖（13）爐膛燃燒器 DENOX 效果比較



圖（14）直流煤粉燃料器佈置方式之一：四角切圓佈置



圖（15）直流煤粉燃料器佈置方式之一：四角切圓佈置燃氣流向示意圖

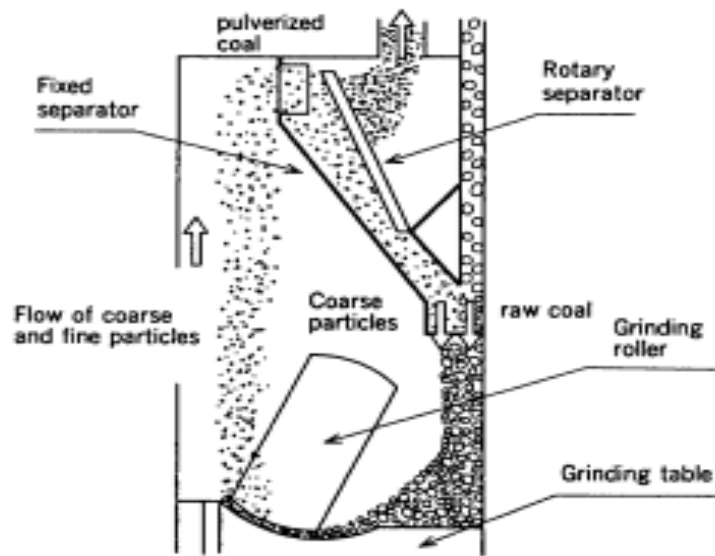


圖 (16) *MRSII PULVERIZER*(結合固定及轉動兩段式篩煤器)

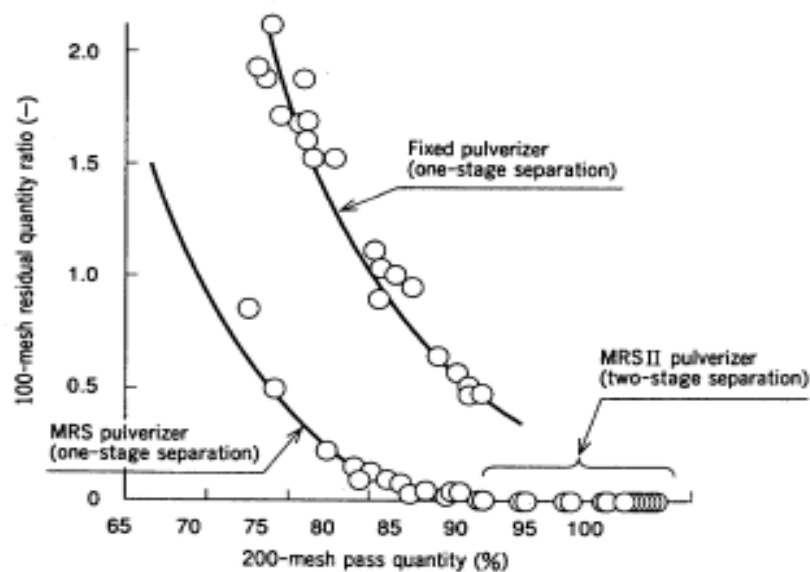
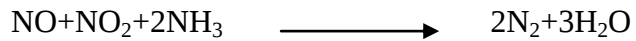
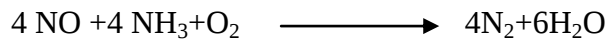


圖 (17) *MRSII PULVERIZER* 之粉煤細度

## 6、三菱重工 SCR CATALYST

在政府環保法規日益嚴格及保護生態環境的使命之下，除了利用低 NOX 燃燒技術之外，更需裝設觸媒脫硝設備（SCR）進一步減低煙氣中 NOX 的濃度以避免酸雨的產生。三菱重工 SCR CATALYST，如圖（18）所示。

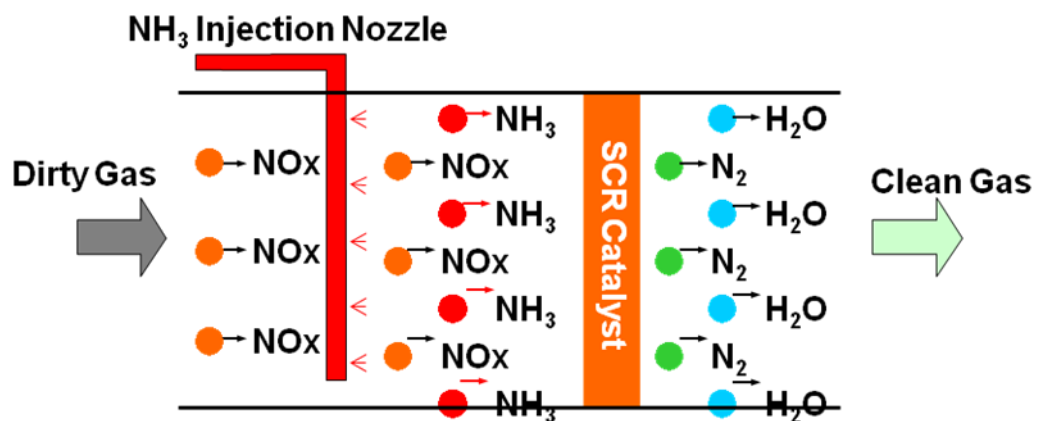
SCR 的反應原理如下：



藉由注入氨在空氣預熱器前的燃氣煙道通過 SCR 設備進行脫硝反應。如圖(19)所示。將 NOX 還原成氮氣及水。



圖(18) 三菱重工 SCR CATALYST

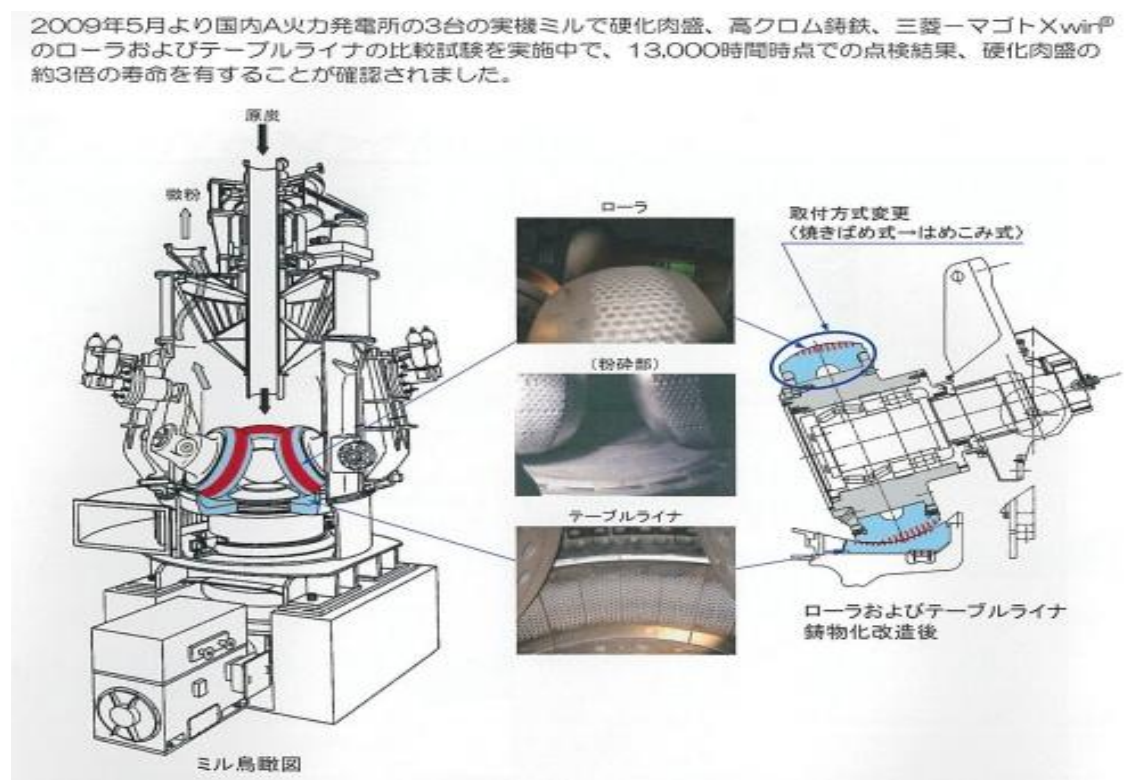


圖(19) SCR 在煙氣道反應示意圖

### 三、 三菱重工新磨輪簡介

本公司採購的煤源種類眾多，燃煤發電機組無法只以單一類煤發電，因此鍋爐設備需能夠接受不同煤質運轉設計設計。由於煤礦場開採煤時會有雜物混入，如石塊等，所以時常在粉煤機排渣槽內發現不可磨物。不同種類的煤源其可磨性、固定碳及揮發物會有顯著的不同，燃煤發電機組作為鍋爐燃料來源的提供者，其運轉穩定性、可靠度、故障率低及低維護費用將是最佳選擇。圖（20）為三菱重工粉煤機結構及模輪示意圖。三菱重工新研發磨輪為利用高鉻鑄鐵為基底，在表面披覆三菱重工新研發 Xwin<sup>R</sup> 作為耐磨面，其結構如圖（21）所示。使粉煤機新磨輪能夠更耐衝擊負荷及更堅硬的表面使粉煤機面對不同種類煤礦及煤礦中雜物的挑戰都能夠一一的克服以產生最佳磨煤效率。

三菱重工新研發 Xwin<sup>R</sup> 其硬度值與一般粉煤機粉煤機磨輪再生焊補材料及各類礦石的硬度比較，如圖（21）所示，可以看出其耐磨性遠高於再生焊補材料。



圖（20）粉煤機結構及模輪示意圖



マゴト社(本社ベルギー)開発のセラミック埋込鋳物技術  
高クロム鋳鉄にセラミックを埋込むことで、耐摩耗性が格段に向上するとともに特殊加工により耐衝撃性を確保

#### セラミックインサートの最適配置

三菱重工の長年に亘る蓄積データに基づいた、ローラおよびテーブルライナの摩耗パターンによりセラミックインサートを最適配置

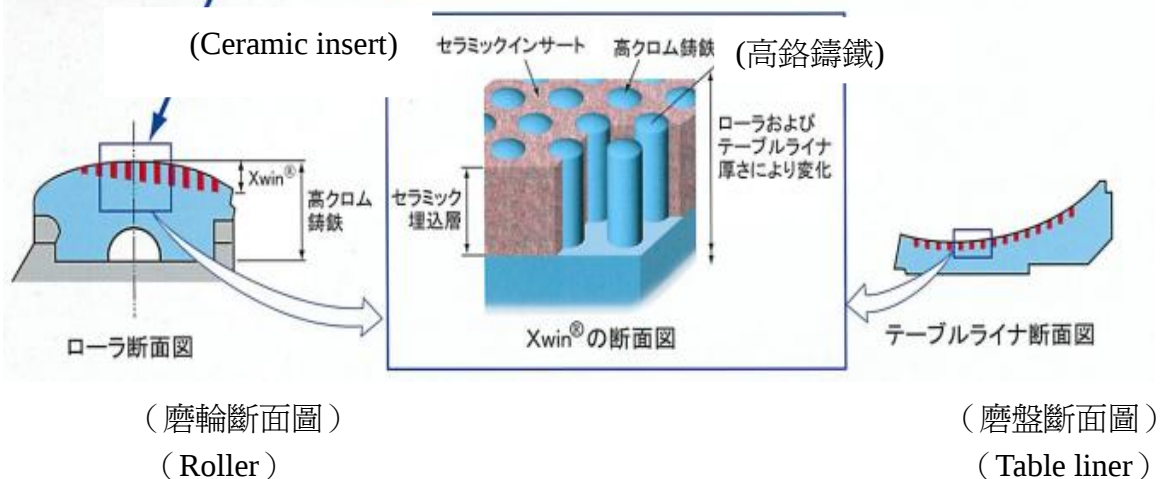


圖 (21)

- 摩耗比較試験によるセラミックインサート部分の耐摩耗性能は非常にすぐれ、硬化肉盛の約4倍の耐摩耗性を有しています。
- 高クロム鋳鉄部分は、セラミック埋込層の補強部材を兼ね、剛性を保持しています。
- 硬さ、断面マイクロ組織、ハンマリング試験を実施し、実機適用時の信頼性を確認しています。

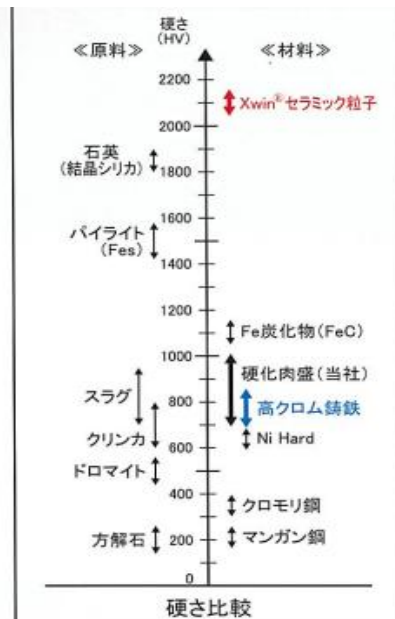
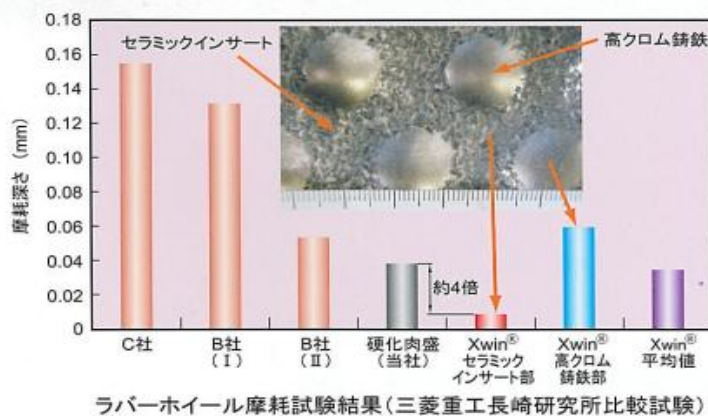
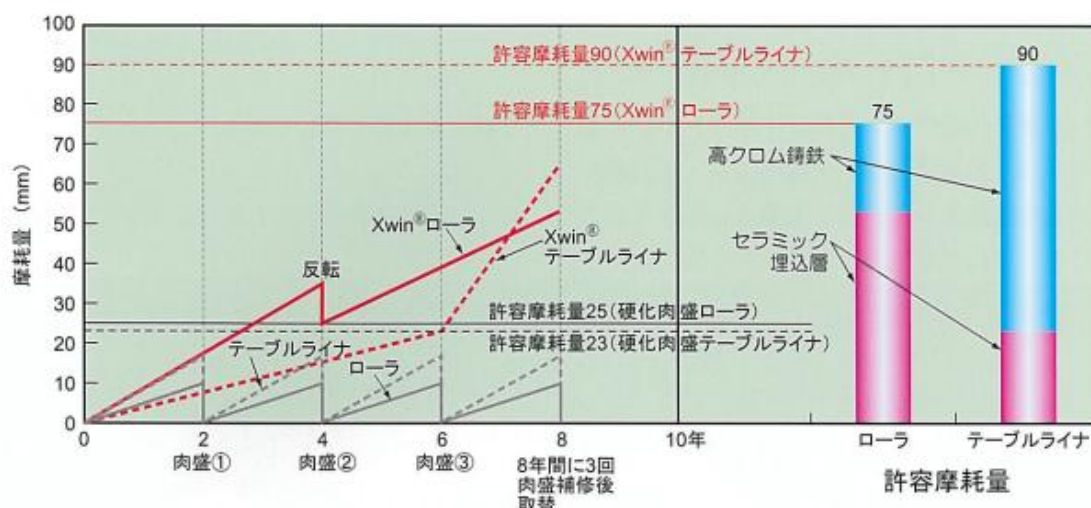


圖 (22)

依據製造廠家建議粉煤機磨輪服役後，磨輪表面模耗至設計磨耗量需要執行磨輪再生焊補工作，一般大約為兩年一次，磨輪再生焊補工作三次以後就不勘使用而報廢。期間為八年，也有因特殊運轉原因而提前損壞的。三菱重工新磨輪可以從服役至報廢不需要執行磨輪再生焊補工作而能保證穩定可靠的運轉狀況，如圖（23）所示。因此可以以降低粉煤機維護工作及維護費用，並提供可靠穩定的運轉，對於電力系統的安定及靈活調度助益甚大。

- セラミックインサートによる耐摩耗性の大幅向上と、セラミックインサート摩耗後も高クロム鑄鉄のもつ耐摩耗性および許容摩耗量の拡大により、硬化肉盛の2～3倍の寿命を達成。



圖（23）三菱重工新磨輪與一般磨輪再生焊補比較曲線圖

#### 肆、結語與建議

高效超臨界燃煤汽力機組為未來發電的主流，在發電機組容量大幅提高下及環評污染排放的加嚴下，大林及林口新電廠未來的營運一定會面臨空前的挑戰。機組穩定可靠運轉、發電成本不斷要求降低並不斷改進以增加機組效率、並不斷減低維護營運費用為必定的目標。

傳承台電公司優質可靠的維護經驗，台電公司由目前亞臨界機組進入高效超臨界燃煤汽力機組，由於機組運轉壓力及溫度的大幅提升，維護及運轉經驗的重新建立將是當務之急。此次赴三菱重工可以學習三菱重工在高效超臨界燃煤汽力機組的豐富建廠經驗，相信對將來新機組興建將有所助益。

- 1、建議新機組採用垂直管內螺紋水冷壁，可避免繁雜的焊接工作，減低膜沸騰發生爆管的機會並減少大修爐內積灰的清除。
- 2、建議新機組採用新材料研發的粉煤機磨輪以增進磨煤效率、省下粉煤機磨輪焊補的成本、增加粉煤機的可用率及電力系統調度的靈活性。
- 3、因應公司燃煤採購種類多源性及未來煤礦熱值的降低趨勢，建議公司未來設計興建新機組應增加機器運轉餘裕以確保機組未來能長期穩定運轉。