

燃氣引擎利用稀薄燃燒的低 NO_x 化技術

宇津山 俊二 著作* 陳 茂 松 譯**

一、前 言

燃氣引擎汽電共生設備由於其優越的經濟性，有顯著的普及。但是在另一方面，特別是在都市，最近存在著大氣污染的問題。

燃氣引擎汽電共生設備等的定置型發電設備，由於一般的容量均相當大，且運轉時間也甚長，所以排氣量也相當大。伴隨著設備的普及，對環境也造成很大的影響。

供給燃氣引擎的燃料瓦斯，一般不含有硫磺等有害物質的潔淨燃料，為此，燃氣引擎排氣中不含有 SO_x ，而伴隨燃燒排出的係氮氧化物(NO_x)，一氧化碳(CO)及碳氫化物(HC)。

其中，特別是 NO_x 是環境問題的重要一環，故對降低 NO_x 技術的要求很強烈。

眾所周知，目前燃氣引擎的脫硝技術中實用化的有三元觸媒法，已被廣泛的使用了。這個方法係將觸媒裝置於引擎排氣後端，藉此除去排氣中的 NO_x 。

最近實用化的稀薄燃燒引擎(Gas Engine Lean Combustion)，以下簡稱為GL引擎)係利用改變引擎的燃燒形態，以實現降低引擎排氣中的 NO_x 量。

如此一來，為降低 NO_x 的排氣後處理便没有必要再設置，而且可以提高引擎的熱效率。

GL引擎在歐美已有多數實績，在國內(日本)僅有一部份的設備適用而已。

本公司也推出以GL引擎的特長為主的商品化系列，如VHP 系列及AT系列。

以下將概要介紹GL引擎。

二、燃燒排氣

2.1 排氣(NO_x , CO, HC) 的發生機構

燃氣引擎的燃燒排氣當中，對環境污染影響特別大的是氮氧化物(NO_x)，一氧化碳(CO)及碳氫化物(HC)三種。

*NKK(株)原動機プラント技術部設計室 課長

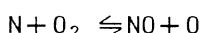
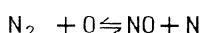
CO被人吸入體內時，會和血液中的血紅素結合而妨礙到氧氣的輸送，這是眾人都知道的。HC及NO_x 若大量吸入人體也是有害的。與其說是排出程度所造成的直接有害物質，不如說是形成光化學Smog最大原因。

1. 氮氧化物(NO_x)

氮氧化物(NO_x) 係由於在高溫燃燒時，空氣中的氮氣(N₂)和氧氣(O₂) 反應而生成的，NO_x 係氮氧化物的總稱。NO在大氣中會慢慢氧化成NO₂，NO₂受太陽光的照射，再分解成NO及氧原子的光化學連鎖反應。氮氧化物(NO_x) 中，不僅含有NO，也含有NO₂，而NO_x 中大部份是NO。

NO的生成，其化學平衡在高溫的方向則相當顯著，實際上也是如此，在高負載下，燃燒溫度變高，排出量也變多。所以像這樣排氣的NO濃度，其平衡濃度在如此排出溫度、壓力下是相當高的。這和CO的情形相同，於高溫燃燒下生成的NO，可利用降低膨脹行程的溫度，來“凍結”其生成。

NO的生成機構可用下列反應式來說明：



NO的生成係和下列三個因素有關：① 氧氣存在的程度，② 高的燃燒溫度，③ 高溫下且長時間燃燒反應，則NO生成變多。

2. 一氧化碳(CO)

一氧化碳是燃料中的碳氫化物因不完全燃燒而生成的，碳氫化物的燃燒過程相當複雜，至今尚未完全明瞭其過程。如圖1所示為甲烷的氧化路徑。一般而言，碳氫化物的氧化反應是極快速的。在氧氣不足下，也能很容易氧化成CO。但是，CO→CO₂ 的氧化反應則比較緩慢。因此，在氧氣不足時的濃混合氣，大都生成CO。

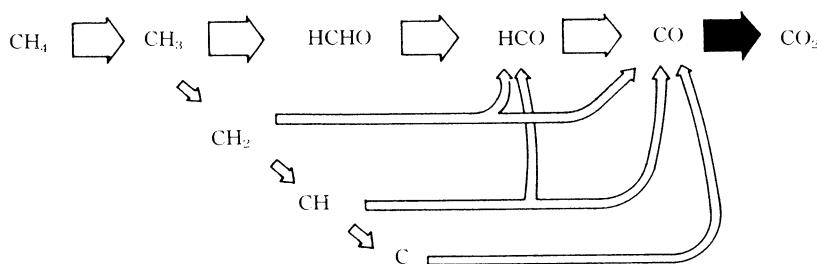


圖1 甲烷的氧化路徑

3. 未燃碳氫化物(HC)

排氣中的HC係由一部份的未燃燃料原封不動而排出，或僅部份氧化、分解後而排出。

HC由於光化學連鎖反應的助長，其結果是生成臭氧(O_3)及有機過氧化物等。這些會對眼睛和鼻子的粘度，有強烈的刺激性，甚至造成植物葉片的枯萎，引起像表面的裂痕，當濃度高時還會引起吸收困難。

2.2 引擎的燃燒特性

引擎的排氣中所含NO, CO, HC量係隨著引擎的設計規格及運轉狀態而改變，這些影響因子相當多，且彼此之間的關係也很複雜。引擎的影響有各種各樣的程度，其中以空燃比的影響最大。

NO_x: NO的生成決定於溫度，一旦生成後，大致原封不動的被排出，此受燃燒最高度的影響。又在生成時燃燒必要的氧氣及為了發熱而消耗氧，因此常使氧氣在剩餘狀態下，此即對空燃比造成很大的影響。

CO: CO係因氧氣不足下，不完全燃燒的生成物，此受空燃比的影響也很大。

HC: HC係為未燃混合氣的主體，受空燃比的影響。排出的未燃混合氣在排氣管內和高溫的已燃氣體混合而氧化，其氧化速度比CO大，此受排氣溫度的影響甚大。

關於三成份的排出濃度及空燃比的影響，以圖2的汽油引擎來做例子，NO在最高燃燒溫度的空燃比15附近生成最多，和熱效率有比例關係存在。在過濃區域，CO和其他成份有很大的差別，在理論空燃比附近，其排出量反而較多。而在稀薄區域則排出量接近零。HC在空燃比16~17時量最少。如此一來，提高空燃比，則使排氣溫度下降，甚至常會招致引擎的熄火。

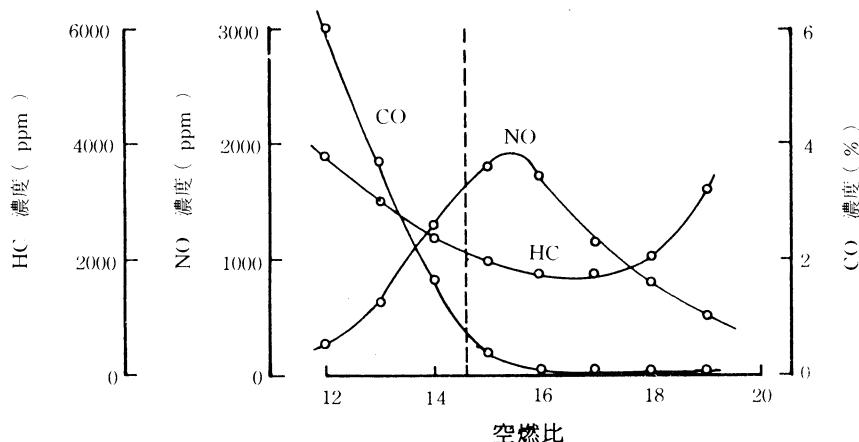


圖 2 空燃比的影響

三、稀薄燃燒引擎的開發

3.1 原理

在稀薄燃燒區域，空氣和燃氣的混合氣中，由於燃氣的比例降低，使得混合氣所持有的熱能降低。

為此，降低了燃燒溫度，進而使NO_x 排出濃度及排氣溫度下降。並且，希望藉此能減低燃料消費率（提昇熱效率）。

如圖2所顯示的傾向，有趨向稀薄區域的傾向。

但是，直到目前能讓燃氣引擎得到安定燃燒的空燃比範圍是相當的狹窄。若在太稀薄區域運轉時，常發生熄火(misfire) 等而無法獲得安定的燃燒。

GL引擎係直到今天能實現在超稀薄區域的安定燃燒，因而降低NO_x，甚至藉此使引擎高效率化。

3.2 構造

GL引擎的稀薄燃燒室構造如圖3所示。

GL引擎是利用預燃燒室來點火，使能源變大，因此實現了稀薄燃燒區域的安定燃燒。

圖4為一般引擎和GL引擎的空燃比之比較。

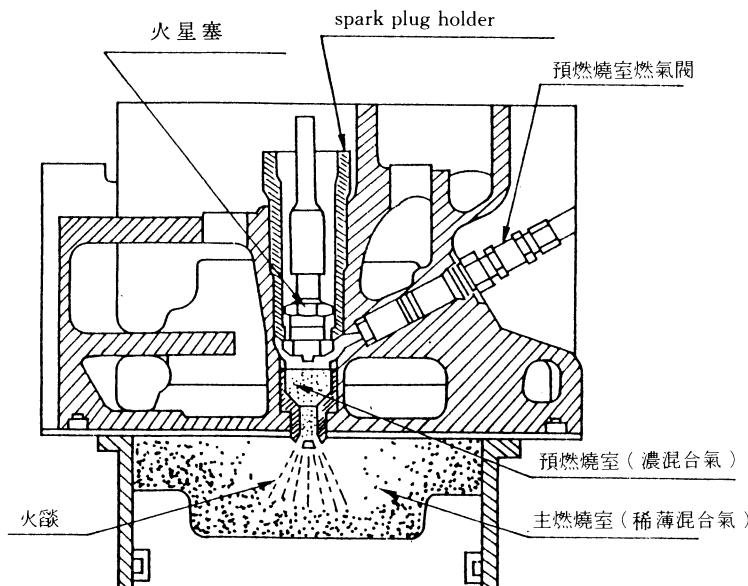


圖3 GL引擎的燃燒室構造

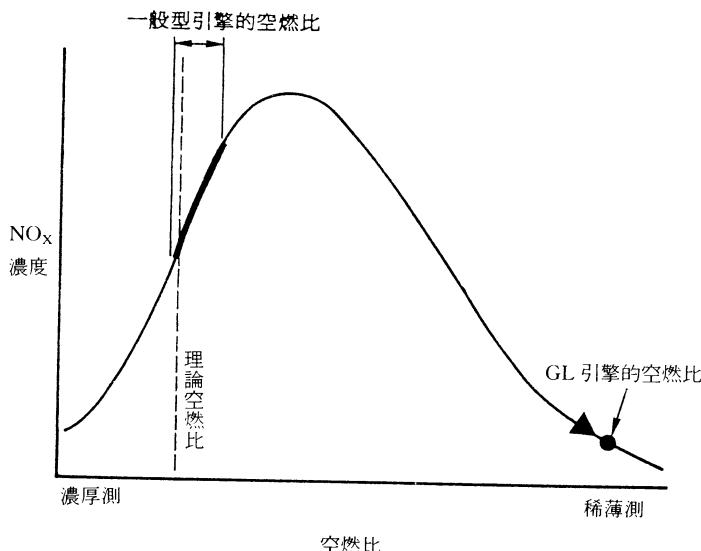


圖 4 空燃比的比較

主燃燒室和一般的引擎相同，係利用氣化器來混合空氣和燃氣成混合氣以供給引擎使用。

這混合氣的空燃比因稀薄燃燒而使其比理論空燃比高出很多。

另一方面，預燃燒室係由專用的燃料系統及氣化器所組合而成，以供給濃厚混合氣。

預燃燒室內的混合氣係利用點火裝置來點火。這時候，利用從預燃燒室所帶來的高能量之火焰，將主燃燒室的混合氣點燃，以安定燃燒。

一般而言，在稀薄混合氣的條件下，很難使燃燒安定。而GL引擎藉著予燃燒室的設計，使得上述問題獲得解決。

圖 4 所示，一般的引擎要將空氣過剩率提高至 $1.2 \sim 1.3$ 左右是不可能的。而GL引擎則可以到達 2 倍的空氣過剩。為此，NO_x 便不再產生，同時CO、HC的排出濃度也降低不少，是以使排氣變為更潔淨。

3.3 性能

GL系列的引擎比其他一般型引擎有較優越的性能發揮出來。

以下是本公司的GL引擎F3521GL和一般的 F3521GSI(VHD) 的性能比較。

1.引擎效率的提高

如圖 5 所示，為在額定出力時的熱效率比較，從圖顯示，GL型比 GSI 型高出35%的熱效率。

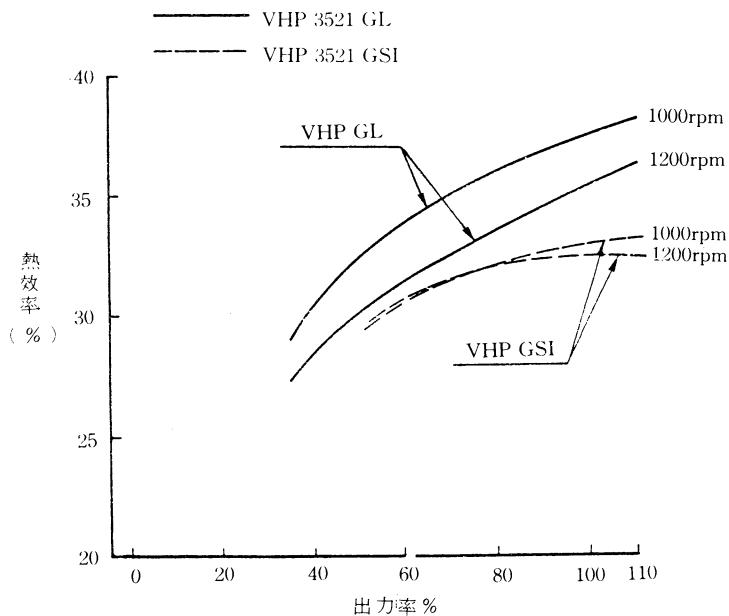


圖 5 热效率

2. 排氣污染的降低

如圖 6 所示，在額定出力下， NO_x 濃度約 300ppm 以上 (O_2 0% 換算值)，和 VHPGSI 系列引擎比起來， NO_x 有大幅降低。

又，圖中也顯示出 CO 的降低。

3. 热平衡

圖 7 表示排氣汽缸出口溫度和熱平衡。

排氣汽缸出口溫度在 $350\sim450^\circ\text{C}$ ，和一般型引擎比較起來，其溫度有大幅降低。排氣閥等的燃燒室周邊部份的耐久性也能藉此而提高。

又，從熱平衡來看，在額定出力下，總熱效率高達至 76.3%。

3.4 燃料系統

在 GL 引擎，預燃燒室用的濃混合氣和主燃燒室用的稀薄混合氣各自送到其燃燒室。如圖 8 所示，有二個系統的燃料系統，這和一般的引擎（VHPGSI 引擎）是不相同的。

由於供給主燃燒室的稀薄混合氣，其每單位所含有的能量是很低的，而為獲得高出力，供給燃氣的壓力將比一般舊式引擎為高。

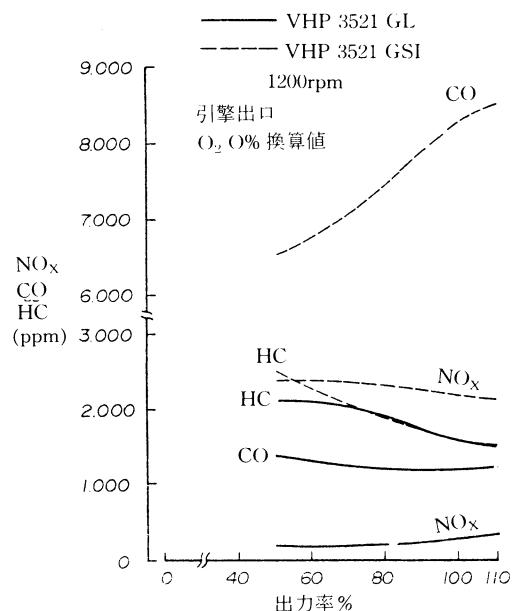


圖 6 排氣成份

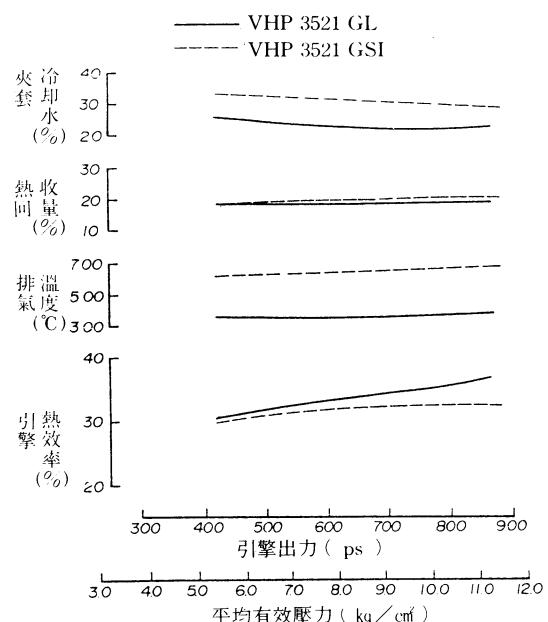


圖 7 热平衡圖

3.5 供氣系統

GL引擎採用稀薄燃燒方式，故所需要的空氣量為一般引擎的1.5~2倍左右。為此，引擎常裝備大型的增壓機及氣化器。而且為使空燃比保持在一定值，必須對增壓空氣溫度加以控制。

3.6 引擎式樣

本公司的GL引擎主要式樣如表1所示。

表1 稀薄燃燒燃氣引擎主規格

機種		VHP系列										AT系列							
		F2895GL		F3521GL		L5108GL		L5790GL		L7042GL		P9390GL		8AT25GL		12AT25GL			
主項	汽缸數	6L		6L		12V		12V		12V		16L		8L		12V			
	汽缸直徑×行程	mm×mm		216×216		238×216		238×191		216×216		238×216		238×216		250×300			
	回轉數	rpm		1000	1200	1000	1200	1000	1200	1000	1200	1000	1200	1000	1200	900	1000		
	引擎額定出力	ps		537	645	653	784	948	1138	1075	1290	1307	1569	1743	2092	1657	1840	2486	2761
目	冷卻方式	熱水冷卻／沸騰冷卻														熱水冷卻			
	發電額定出力	kw		375	450	450	550	650	800	750	900	920	1100	1225	1475	1155	1280	1725	1920
	最低供氣壓力	kg/cm ²		2.1												3.2			

引擎有出力範圍在537~2092PS的VHP系列及出力在165~2761的AT系列。用於發電裝置的出力範圍則涵蓋有375~1920KW。

不論那一系列的引擎，其排出NO_x均在300ppm(O₂:0%)以下，而且，發電效率高達33%以上。

引擎的外觀如圖9所示，表2則為實績表。

表2 稀薄燃燒燃氣引擎的實績

(1989年8月止)

		歐美	國內(日本)
VHP系列	發電用	65	3
	其他	110	—
	計	175	3
AT系列	發電用	11	—
	其他	13	—
	計	24	—

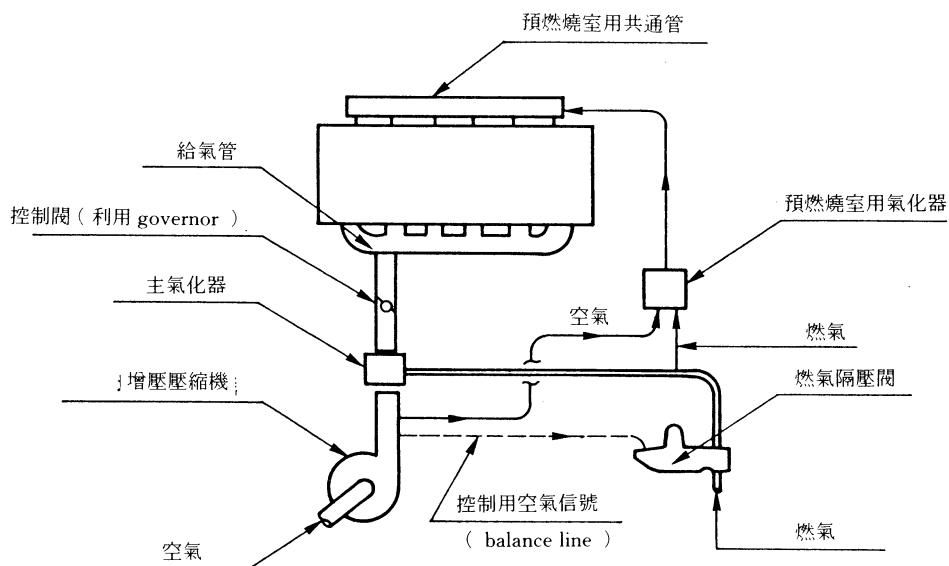


圖 8 稀薄燃燒引擎的燃燒系統

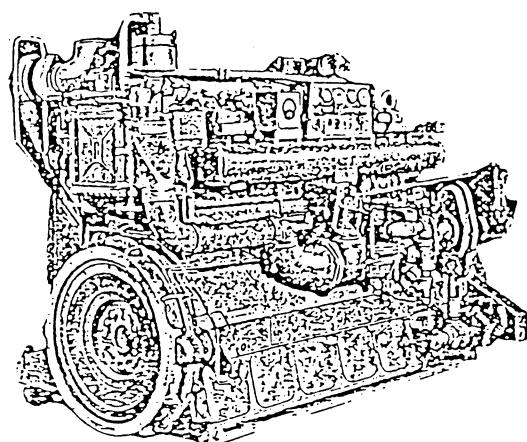


圖 9 引擎外觀

3.7 實例

GL引擎在歐美已有多數的設備在運轉中，國內也有數件實例。

本公司的VHPGL引擎係用於下水道處理場的汽電共生廠。

該GL引擎係用於出力為920kW的發電設備，廢熱以蒸汽形式收回回來。該下水道處理場本已有一般型的引擎，這次係鑑於GL引擎的優越特性而採用之。設備主要規格如表3，設備流程如圖10所示。

由於是一低公害型燃氣引擎，排氣中的NO_x已被淨化過，故没有必要再裝置三元觸媒了。發電系統及熱回收系統，如下說明。

表 3 設備主規格

	項 目	要 點
設 備	發電裝置	920kW×1台
	熱回收方式	蒸汽回收
	NO _x 降低方法	採用稀薄燃燒燃氣引擎
	回路方式	二重母線
	運轉方式	全自動
引 擎	型號	Ln42GL
	出力×回轉數	1350ps×1000rpm
	冷卻方式	沸騰冷卻
發 電 機	型式	開放保護型 3相交流同步發電機
	出力	1150kVA, 3φ, 50Hz
排 交 換 熱器	型式	水管式排氣熱交換器
	容量	1415kg/H×1.05kg/cm ² G

1. 發電系統

發電機係採用同步發電機，並且和商用電源並列運轉。由於回路方式係採用二重母線，所以即使商用電源停電時，甚至沼氣發電裝置發生故障，電力系統也不會發生混亂，圖11為電力系統圖。

2. 热回收系統

引擎的冷卻方式是沸騰冷卻式，可產生1.05kg/cm² G、121°C的蒸汽。廢熱的回收包括引擎夾套冷卻水及排氣廢熱。沸騰冷卻方式係藉著熱水和蒸汽的比重差，使夾套水能自然循環，如此便不再需要夾套水循環水泵浦及調溫閥。從引擎熱回收的蒸汽，經由

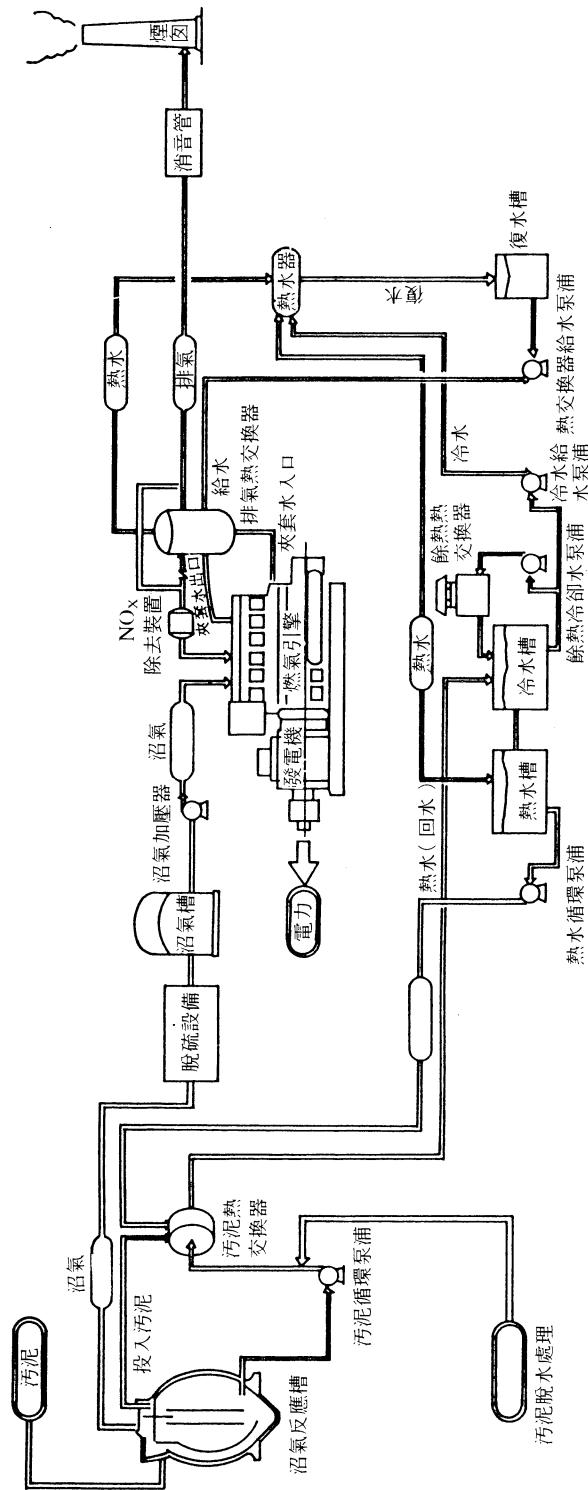


圖 10 設備流程

熱交換器後，以熱水形式儲存於水槽中，此水槽所蓄的熱量可經污泥熱交換器而用於沼氣反應槽的加溫。若有過剩的熱量，利用冷卻塔來散熱。

發電、熱回收及沼氣反應槽的加溫系統均為自動化的控制，和從前的鍋爐運轉方式比較，大幅的節省很多人力。

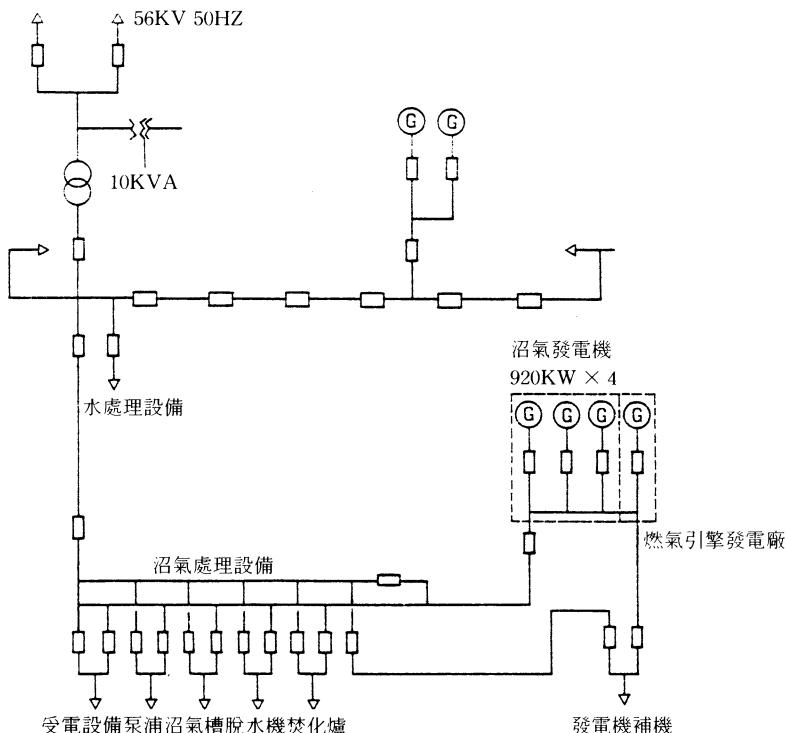


圖 11 電氣系統圖

3. 設備性能

本設備在平成元年 7 月開始運轉，照計畫的性能均可獲得，設備性能和一般型燃氣引擎比起來，有大幅上昇。

① 發電效率

一般型燃氣引擎其發電效率約有30%，而本設備的發電效率則高達33.8%。請參考圖12的熱平衡圖。

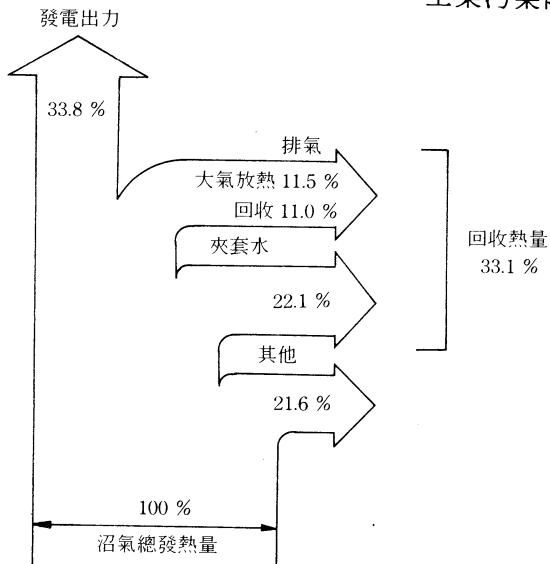


圖 12 設備熱平衡圖

發電效率的差異，從以同量的沼氣所發出來的電量差異中被看出。即一年以8000小時運轉為例，本設備的發電量為7360MWH/年，而在一般型引擎於同量的沼氣下，一年發電量為6533MWH/年，電量相差有827MWH/年，顯現出相當高的經濟效益。

② 排氣NO_x 濃度

雖然本設備沒有利用觸媒，但是在各地方自治體的氮氧化物對策指導綱要下，有充分清楚的數值被記錄下來。

一般型引擎所使用的設備中，排氣NO_x 的去除，常需要採用觸媒裝置，而觸媒裝置有下列幾點缺失：

- 觸媒的效果受空燃比控制的影響
- 因觸媒劣化而造成NO_x 排出的增加
- 為更換觸媒，需定期支付購置觸媒之費用。

本設備雖然不採用觸媒系統，但在公害上也沒有什麼問題存在。直到目前，本設備至少解決了上述的缺失。

四、後記

從大氣污染防治的環境觀點來看，GL引擎配合了社會的需求。是一種省能源的新概念引擎，期待今後在燃氣汽電共生設備中能被大量採用。今後也期望能在低NO_x 化做出更多的努力。

本文出處：定置型内燃機關(ガスタ-ジン・ディ-ゼル機關)の排氣規制とその対策セミナ(1989年10月)