

## 空污防制

# 柴油車氮氧化物污染排放防制技術

林成原\*、陳永和\*\*

### 摘要

氮氧化物 (NO<sub>x</sub>) 包括 NO、NO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O 等氣體，會刺激呼吸系統、喉嚨、眼睛，且會產生酸雨，造成臭氧層破壞，形成光化煙霧，並為臭氧之前驅物質，對健康及環境都有明顯危害。國內柴油車數量約佔機動車輛的 3%，以壓縮點火方式之柴油引擎為柴油車之動力來源，具燃燒成本低、熱效率高、堅固耐用等優點而被廣泛使用為海陸運輸工具，但柴油車的氮氧化物排放量約佔機動車輛之 60%，因此有效減少柴油車排放之氮氧化物，為重要課題。本文探討我國及歐、美、日等國柴油車氮氧化物排放管制措施及排放標準，與燃燒過程前、中、後三個階段可行之氮氧化物控制技術。目前發展中之柴油車氮氧化物防制技術，以冷卻 EGR 及新式共同管噴射系統之技術成熟度及削減效果較高；而 SCR 技術則因系統較複雜、所需體積空間較龐大，尚技術問題待克服，另外氮氧化物吸收單元、主動式去除氮氧化物觸媒、被動式去除氮氧化物觸媒等技術尚未發展成熟，其中以 NO<sub>x</sub> absorption catalyst 為國際先進柴油車廠看好以符合下一階段柴油車 NO<sub>x</sub> 排放標準之重點研發技術。

【關鍵詞】1.氮氧化物 2.柴油車 3.污染削減技術

---

\*國立海洋大學輪機工程系教授

\*\*國立清華大學動力機械工程系博士班研究生

### 一、前言

根據環保署資料<sup>[1]</sup>顯示，最近 10 年臺灣地區車輛數目成長 76 %，車輛密度達 453 車輛數/平方公里，為各先進國家之 2 至 21.5 倍，高居世界第一，所排放之污染物造成空氣品質明顯惡化，環境負荷沈重。又根據交通部統計處所出版之中華民國交通統計月報之統計數據<sup>[2]</sup>顯示，截至民國 90 年 11 月底止臺灣地區機動車輛數共 17,465,820 輛，其中柴油大客車 23,913 輛（含自用 2,616 輛，營業用 21,297 輛），柴油大貨車 155,259 輛（含自用 81,825 輛，營業用 73,434 輛），柴油小貨車 258,214 輛（含自用 254,547 輛，營業用 3,667 輛），特種車 51,228 輛，國內道路用柴油車合計約 488,000 輛，約占全臺灣地區機動車輛數之 3 %。柴油車輛是以壓縮點火方式的柴油引擎為運輸動力，柴油引擎被認為是至目前為止燃料燃燒效率最高之引擎，且具可超過 50 %熱效率、低燃料成本、可靠性及耐用性高、較高壓縮比、結構堅固簡單之優點，而被廣泛使用為貨車、巴士、商船、漁船等海陸交通運輸動力來源，也被使用於建設機械如推土機、堆高機、吊車，與農用機械如曳引機、耕耘機等工具之動力，在法國等歐洲地區，柴油小客車之使用也非常普遍，柴油車在所有車輛之市場占有率更高達 42 %<sup>[3]</sup>。國內或全世界柴油引擎巴士及貨車數量預期將持續穩定成長，不過因車輛所造成之排氣污染已被認定為都會區之主要污染源，因此如何防制柴油車污染排放的問題更值得重視。

柴油引擎經由燃燒反應釋放燃料熱能同時也排放各種固、液、氣態污染物質至外界，最主要之排氣污染物為微粒狀物（PM）、黑煙（smoke）、與氮氧化物（NO<sub>x</sub>）。在 87-89 年度環保署委託工研院機械所執行「柴油車污染改善補助審查計畫」，曾補助全國柴油車客貨運業者申請安裝觸媒濾煙器及引擎調修經費，柴油車所排放之粒狀污染物及黑煙已獲明顯改善，惟柴油車所排放之氮氧化物污染問題至今仍未獲足夠重視及解決。氮氧化物（NO<sub>x</sub>）為包括 NO、NO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O 等成份之燃燒產物，在高溫燃氣的引擎氣缸內經由氧與氮原子之相互碰撞產生。燃氣溫度對於 NO<sub>x</sub> 的排放量有極明顯影響，由於柴油引擎氣缸內高燃氣溫度，通常有高的 NO<sub>x</sub> 排放量。適用於一般汽油引擎之氧化觸媒轉化器或三元觸媒轉化器(同時具抑制 HC, CO, NO<sub>x</sub> 功

能之觸媒轉換器)並不能有效減低柴油引擎之氮氧化物排放量,因為柴油引擎操作於貧油條件,而這些轉化器在這種操作環境下對於氮氧化物轉化效率並不理想,因此如何在技術上達到低氮氧化物排放要求,在柴油引擎之設計上是重要挑戰。

氮氧化物全國年排放量約為 57.5 萬公噸,由移動污染源所排放的約占 47 %,其中雖然柴油車數量僅占全國車輛數之 3 %,但約 60 %由移動污染源所產生之 NOx 是由柴油車所排放出來<sup>[4,5]</sup>,因此對於使用中柴油車之 NOx 排放污染需特別予以重視及管制。氮氧化物會刺激肺部、喉嚨、眼睛,也可能會加重心臟血管、呼吸道病患之病情,另外氮氧化物亦可能形成硝酸,引致酸雨,或破壞在同溫層之臭氧層,或在陽光照射下產生光化煙霧(photochemical smog),而且由柴油車等污染源所產生之氮氧化物與碳氫化合物為臭氧(O<sub>3</sub>)之前驅物質。臭氧為強氧化物,會引起打噴嚏、咳嗽、胸痛、肺部阻塞、肺功能劣化、肺部組織破壞等傷害<sup>[6,8]</sup>。臭氧及懸浮微粒為臺灣地區最近幾年之主要空氣指標污染物,尤其臭氧所造成之空氣污染有日益嚴重之趨勢,在民國 88 年空氣品質不良日數有 56 %比例是由於高臭氧濃度所產生,特別是在北部空氣品質區,因臭氧引起之空氣不良站日有 183 天,其餘 11 天為因懸浮微粒所引起之空氣品質不良站日,即臭氧產生之空氣品質不良站日超過 95 %,使得臭氧已成為最主要空氣指標污染物<sup>[9]</sup>。因此若能經由管制技術及措施著手有效減少柴油車排放氮氧化物污染,當能有效改善空氣品質。

## 二、氮氧化物種類及形成

氮氧化物 NOx (nitrogen oxides) 為包括 NO、NO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O 等成份之有毒氣體,以 NO (一氧化氮) 為主要組成。柴油引擎之 NO<sub>2</sub> 排放濃度一般占總 NOx 濃度之 10~30 %,可經由在氣缸內火焰區之 NO 迅速轉化而成。氮氧化物是燃料或空氣中氮成份經由燃燒過程而氧化產生。在火焰面前端或後面接近理論當量比之燃氣區域是主要的 NO 生產區,特別是在火焰區後面與高溫燃氣滯留時間長之區域。NOx 依據其產生來源,分成 (1) thermal NOx (熱式 NOx), 經由在後火焰區之氮分子氧化,燃氣溫度、高溫滯留時間、氧分子濃度為主要影響生成因素; (2) fuel-bound NOx (燃

料 NO<sub>x</sub>)，經由氧化燃料中之含氮化合物而產生；(3) prompt NO<sub>x</sub> (瞬間式 NO<sub>x</sub>)，在火焰面前端經由燃料中裂解之碳氫化合物與在火焰中之氮分子反應而迅速產生。熱式 NO<sub>x</sub> 為主要之 NO<sub>x</sub> 生成來源<sup>[6, 10, 11]</sup>。

### 三、我國柴油車氮氧化物排放標準及措施

我國自民國 88 年 7 月 1 日起開始實施第三期柴油及替代清潔燃料引擎汽車排放標準<sup>[12]</sup>，如表 1 所示，對於重型客貨車適用新車型審驗之 NO<sub>x</sub> 排放量需小於 5.0 g/bhp ·hr；輕型貨車適用新車檢驗，NO<sub>x</sub> 排放值不得大於 0.625 g/km。使用中柴油車檢驗目前只規定目測判定黑煙不透光率需小於 35%，儀器判定黑煙污染度不得大於 35%，未就其他排放之氣狀污染物如 NO<sub>x</sub> 設定使用中柴油車排放標準。財團法人車輛研究測試中心曾接受行政院環保署委託執行研擬訂定柴油及替代清潔燃料引擎汽車第四期排放標準工作計畫<sup>[5]</sup>，以因應國內可能於民國 93 年開始實施之柴油及替代清潔燃料車輛第四期排放標準。該中心主要參考歐盟及美國已實施或即將實施之排放標準，配合柴油引擎污染排放控制技術之發展成熟狀況，分別研擬輕型柴油貨車及重型柴油客貨車引擎第四期排放標準建議草案，如表 2 及表 3 所示。這二表顯示未來對於輕型柴油貨車的新車檢驗及重型柴油客貨車之新車型審驗最主要之排氣加嚴管制或削減項目皆針對 NO<sub>x</sub>，其中輕型柴油貨車之 NO<sub>x</sub> 排放標準可能由原第三期標準之 0.625 g/km 下降至 0.25 g/km ~0.5 g/km，對於行駛於都會區之車隊可能更需加嚴至 0.05 g/km。而重型柴油客貨車由第三期 NO<sub>x</sub> 5 g/bhp ·hr 排放標準降低至 2.4~4 g/bhp ·hr 之間。

由國內對於柴油車排放標準演進情形觀察，無論新車型審驗或新車檢驗對於粒狀物 (PM) 及氮氧化物 (NO<sub>x</sub>) 都有逐期加嚴之趨勢，但對於使用中柴油車目前只針對排放黑煙之不透光率或污染度訂定規範，尚未訂定使用中柴油車排放氣狀污染物如 NO<sub>x</sub> 之排放標準。目前我國針對柴油車氮氧化物排放管制政策一覽表，如表 4 所示。

表 1 第三期柴油及替代清潔燃料引擎汽車排放標準<sup>[12]</sup>

交通工具種類	施行日期	適用情形	排放標準							
			行車型態測定				目測判定	儀器判定		
			分類	CO	HC	NOx	粒狀污染 物	黑煙 (不透 光率 %)	黑煙 (不透 光率 %)	黑煙 (污 染度 %)
柴油及替代清潔燃料引擎汽車	88年7月1日	新車型審驗	重型客、貨車 總重量逾 3,500 公斤 客貨車或 十人座以 上客車	10.0 g/bhp ·hr	1.3 g/bhp ·hr	5.0 g/bhp ·hr	0.1 g/bhp ·hr	-	-	35
		新車檢驗	輕型貨車 總重量逾 2,500 公斤 以下之貨 車	2.11 g/km	0.155 g/km	0.625 g/km	0.05 g/km	-	-	35
		使用中車輛檢驗						35	-	35

28 柴油車氮氧化物污染排放防制技術

表 2 輕型柴油貨車第四期排放標準建議草案<sup>[5]</sup>

方案	參考標準	測試程序	NMHC g/km	CO g/km	NOx g/km	PM g/km	OBD
1	美國 NLEV	FTP-75			0.25	0.05	N
2	美國 Tier 2 2004	FTP-75	0.078	1.06	0.125	0.05	Y
3	歐洲 Euro III 2000	ECE R15 + EUDC	-	0.64	0.5	0.05	N
4	歐洲 Euro IV 2005	ECE R15 + EUDC	-	0.50	0.25	0.025	Y

表 3 重型柴油客貨車引擎第四期排放標準建議草案<sup>[5]</sup>

方案	參考標準	測試程序	CO	HC	NOx	PM	減量效果
1	美國 1998MY	U.S. Transient Cycle	10.0 g/bhp ·hr	1.3 g/bhp ·hr	40 g/bhp ·hr	0.1 g/bhp ·hr	至民國 99 年 NOx：下 降 10 % PM：下降 56.5 % 若以公車車隊平均污 染管制則再降 PM 4 %
2	美國 2004MY	U.S. Transient Cycle	10.0 g/bhp ·hr	1.3 g/bhp ·hr	2.4 g/bhp ·hr	0.1 g/bhp ·hr	至民國 99 年 NOx：下 降 20 % PM：下降 56.5 % 若以公車車隊平均污 染管制則再降 PM 4 %
3	歐洲 Euro III 2000	ESC or ETC	2.5 g/kwh	0.7 g/kwh	5 g/kwh	0.1 g/kwh	至民國 99 年 NOx：下 降 10 % PM：下降 56.5 % 若以公車車隊平均污 染管制則再降 PM 4 %
4	歐洲 Euro IV 2005	EST or ETC	2.5 g/kwh	0.7 g/kwh	3.5 g/kwh	0.08 g/kwh	至民國 99 年 NOx：下 降 20 % PM：下降 56.5 % 若以公車車隊平均污 染管制則再降 PM 4 %

表 4 我國柴油車氮氧化物排放管制政策一覽表

	新車型審驗	新車抽驗	使用中車輛召回調查	定期檢驗
標準值	第三期排放標準：5.0 g/bhp ·hr	第三期排放標準：5.0 g/bhp ·hr	三期車：5.0 g/bhp ·hr 二期車：6.0 g/bhp ·hr	無
對象	新領引擎族排氣合格證明函者	已取得引擎族排氣合格證明函，並已開始量產及進口者	已銷售之使用中柴油車，而行駛里程或使用年限仍於保證期限內者	對車主定期檢測
耐久測試或劣化係數	新引擎族測試值須再加上劣化係數(DF) 劣化係數： -耐久測試 -指定劣化係數 (目前大部份引擎族 NOx 劣化係數為 0)	1.新引擎族測試值需再加上證明函上核准之劣化係數。	無需再加劣化係數	無
測試方法	暫態循環測試(U. S. Transient Cycle)，未來我國進入 WTO 後，另將開放歐聯測試程序(ESL or ETU)	同引擎族新車型審驗測試	同引擎族新車型審驗測試	無
罰則	不得請領引擎族排氣合格證明函	撤銷引擎族排氣合格證明函 業者須提出原因調查說明及改善對策 針對當年度已銷售車輛實施召回改正	業者調查原因或影響範圍分析 撤銷引擎族排氣合格證明函，不得繼續銷售 針對所有有污染虞慮車輛進行召回改正，並判定改正完成時間表	無

#### 四、其他國家對於柴油車之氮氧化物排放標準及措施

世界主要柴油車生產製造或使用國（歐盟、美、日）之重型柴油車 NOx/PM 排放標準演進情形如圖 1<sup>[13]</sup>所示，並分別說明如下。

### 4.1 歐盟柴油車管制標準及措施

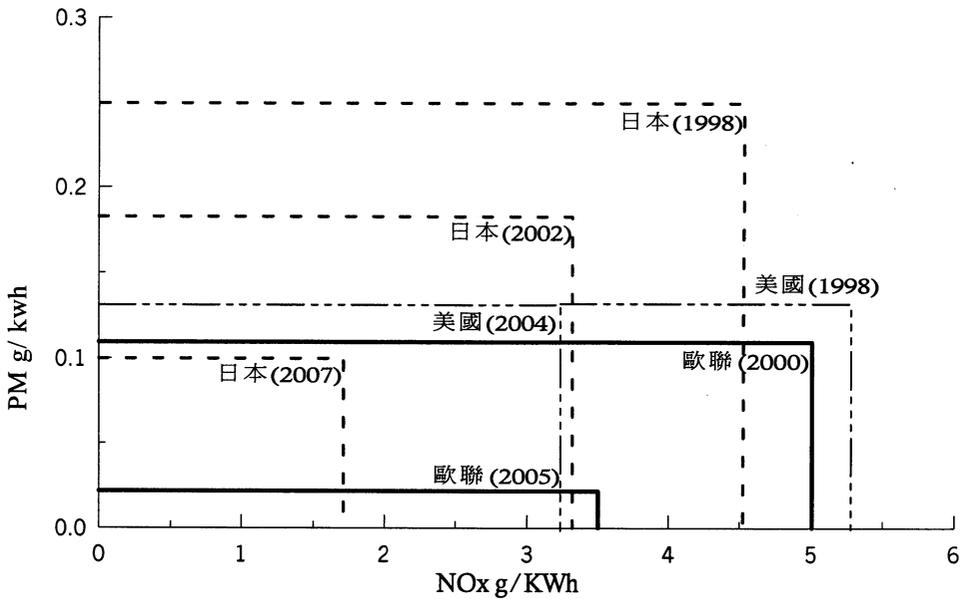
#### 1. 重型柴油車排放標準及措施

歐盟自 1999 年 10 月開始實施 Euro III 重型柴油車排放標準，如表 5<sup>[14]</sup>所示，但僅限於 EEVS（即 extra low emission vehicles 或 enhanced environmental friendly vehicles）就是超低污染車輛，自 2000 年 10 月全面實施 Euro III 標準，NO<sub>x</sub> 排放量需小於 5 g/kwh，測試模式開始以歐洲靜態循環 ESC（European Stationary Cycle）及歐洲暫態循環 ETC（European Transient Cycle）代替實施原 Euro I 及 II 標準所使用之 ECE R49 測試程式，ETC 測試程序之排放標準如表 6 所示。ELR（European Load Response）測試程序則用以檢測重型柴油車所排放之黑煙濃度。歐聯預定在 2005 年 10 月及 2008 年 10 月分別實施 Euro IV 及 Euro V 重型柴油車排放標準，其 NO<sub>x</sub> 排放量需分別小於 3.5 g/kwh 及 2.0 g/kwh，因此可見 NO<sub>x</sub> 為主要逐期加嚴管制排放項目。自 2000 年以後之重型柴油引擎型式認證可選擇 ESC 或 ETC 任一種測試程序，實施 Euro IV 標準之後的重型柴油引擎認證則需同時符合 ESC 及 ETC 二種測試程序<sup>[14]</sup>。預期於 2005 年 10 月之後所實施之 Euro IV 重型柴油車將裝置 OBD（on-board emission diagnostics system）即隨車診斷系統，也將配置去除氮氧化物觸媒轉換器（De-NO<sub>x</sub> catalytic converter）及粒狀物過濾器（particulate trap），以減少氮氧化物及粒狀污染物排放，並及時察覺污染排放系統異常狀況，得予調整維修，避免持續造成不當污染。

#### 2. 柴油小客車與輕型柴油貨車（light-duty trucks）排放標準及措施

歐盟在輕型車輛污染排放管制規定方面，汽、柴油車輛之排放標準不同，因為柴油引擎較汽油引擎排放較高之 NO<sub>x</sub> 但較低之 CO。表 7 所示為歐盟柴油小客車排放標準，自 2000 年開始實施 Euro III 排放標準，NO<sub>x</sub> 排放量不得高於 0.25 g/km 且 NO<sub>x</sub> +HC 排放量需少於 0.56 g/km；預定自 2005 年開始實施 Euro IV 排放標準，NO<sub>x</sub> 排放量需低於 0.025 g/km，NO<sub>x</sub> +HC 排放量不得高於 0.3 g/km，測試程序沿用前期標準所使用的 ECE R15+EUDC。歐盟柴油輕型商用車排放標準如表 8 所示。依車重需分別低於 0.5 g/km 及 0.25 g/km；第二類車輛於 2001 年及 2005 年所實施之 NO<sub>x</sub> 排放標準分別需低於 0.78 g/km、0.39 g/km。

無論柴油小客車或輕型柴油商用車，NO<sub>x</sub> 皆為主要加嚴管制排放項目，導因於 NO<sub>x</sub> 對於生態環境及人體健康之明顯危害，因此受到關注。另外對於柴油車輛裝置 OBD 系統，歐盟將於 2000-2005 年間實施，在油品方面亦提出相關配套規定，包括柴油含硫量需低於 350 ppm 重量百分比，於 2005 年更需降至 50 ppm 重量百分比，以配合裝置觸媒濾煙器後處理系統，另外十六烷值不得低於 51。



■ 1 主要國家重型車輛 NO<sub>x</sub>/PM 排放標準<sup>[13]</sup>

表 5 歐盟重型柴油車排放標準<sup>[14]</sup>

單位：g/kwh

標準	測試程序	生效日期	NOx	PM	Smoke	CO	HC
Euro III	ESC & ELR	1999.10, EEVs only	2.0	0.02	0.15	1.5	0.25
		2000.10	5.0	0.10	0.8	2.1	0.66
Euro IV		2005.10	3.5	0.02	0.5	1.5	0.46
Euro V		2008.10	2.0	0.02	0.5	1.5	0.46

表 6 歐盟 ETC 測試重型柴油車排放標準<sup>[14]</sup>

單位：g/kwh

標準	生效日期	測試程序	NOx	PM	HMHC	CO
Euro III	ETC	1999.10, EEVS only	2.0	0.02	0.40	3.0
	ETC	2000.10	5.0	0.16	0.78	5.45
Euro IV		2005.10	3.5	0.03	0.55	4.0
Euro V		2008.10	2.0	0.03	0.55	4.0

表 7 歐盟柴油小客車排放標準<sup>[14]</sup>

單位：g/kwh

標準	生效日期	NOx	HC+ NOx	PM	CO
Euro III	2000	0.50	0.56	0.05	0.64
Euro IV	2005	0.25	0.30	0.025	0.50

表 8 歐盟柴油輕型商用車排放標準<sup>[14]</sup>

單位：g/kwh

車重分類	生效日期	NOx	HC+ NOx	PM	CO
I (<1,305 kg)	2000	0.50	0.56	0.05	0.64
	2005	0.25	0.30	0.025	0.50
II (1,305-1,760 kg)	2001	0.65	0.72	0.07	0.80
	2006	0.33	0.39	0.04	0.63
III (>1,760 kg)	2001	0.78	0.86	0.10	0.95
	2006	0.39	0.46	0.06	0.74

## 4.2 美國柴油車管制標準及措施

### 1. 重型柴油車排放標準及措施

對於總車重大於 8,500 lbs 之重型柴油車，美國環保署 1998 年開始實施之排放標準，NOx 排放量需小於 4 g/bhp ·hr，在 2004 年後 NOx 之排放標準有二個方案可以選擇，方案 1：NMHC +NOx 需小於 2.4 g/bhp ·hr；方案 2：NMHC +NOx 排放量需小於 2.5 g/bhp ·hr 且 NMHC 排放量小於 0.5 g/bhp ·hr。測試方式為在引擎動力計上以暫態循環行車型態（U. S. Transient Cycle）進行。

### 2. 輕型客車及貨車（light duty vehicle and light duty truck）氮氧化物排放標準及措施

LDV 屬 12 人座以下之小客車，LDT 則不包括 LDV 且總車重不大於 8,500 lbs 之貨車、休旅車、小型客貨二用車等。對於 LDV 及 LDT 車之排放標準，美國 EPA 依據不同之實施生效日期分別實施 Tier 1 及 2 標準，說明如下：

#### （1）Tier 1 排放標準及措施

如表 9<sup>[15]</sup>所示為美國 EPA 對於輕型車之 Tier 1 排放標準，1994~1997 年生產之 LDV 及 LDT 車適用此標準，惟 NOx 排放標準將自 2003 年實施。HLDT 指 heavy light duty truck 為總車重大於 6,000 lbs 之輕型車，LVW 為 loaded vehicle weight。對於保證哩程數為 100,000 miles/10 years 之輕型車，NOx 排放標準介於 0.97 至 1.53 g/mile

## 34 柴油車氮氧化物污染排放防制技術

之間。測試程序採用美國 EPA 於 CFG (Code of Federal Regulation) 之 Title 40 Part 86 Subpart B 所規定之 FTP-75 程序<sup>[15]</sup>。自 2000 年之後另需依據 Supplemental Federal Test Procedure (補充聯邦測試程序) 增加模擬在市區使用空調及極高速狀態下之二種行車型態下排放狀況之測試程序。

### (2) Tier 2 排放標準及措施

美國 EPA 對於輕型車 Tier 2 排放標準經美國 EPA 於 1999 年提出，如表 10 所示，共將車種分成七個車等，稱 EPA bins，另針對每個車廠生產之所有車輛排放之 NO<sub>x</sub> 平均值要求需低於 0.07 g/mile，以進行 NO<sub>x</sub> 平均排放值總量管制，預定於 2004 年~2007 年分階段實施 NO<sub>x</sub> 排放管制及車廠總生產車隊 NO<sub>x</sub> 平均排放值管制。對於保證行駛里程為 120,000 miles 之輕型車 NO<sub>x</sub> 排放標準介於 0 至 0.2 g/mile 之間，NO<sub>x</sub> 排放標準愈趨嚴格，對柴油車廠確具挑戰。測試程序仍延用 Tier 1 標準。

## 4.3 日本柴油車氮氧化物排放標準及措施

日本商用柴油車 (commercial vehicles) NO<sub>x</sub> 等排放標準如表 11<sup>[14]</sup>所示。日本商用柴油車依車重分成四個等級。每一排放項目之平均值代表量產車之平均排放值或新車型審驗之排放上限值，每一排放項目最高值代表年產量少於 2,000 部之車型可適用之污染排放值。目前所適用之排放標準，NO<sub>x</sub> 平均排放值至 2002 年新標準實施對於車重小於 1,700 kg 之柴油車由 0.4 g/km 降低至 0.28 g/km，對於車重大於 12,000 kg 之柴油車則由 4.5 g/kwh 降低至 2004 年之後所實施標準為 3.38 g/kwh。表 12<sup>[14]</sup>為日本柴油小客車 NO<sub>x</sub> 等污染物之排放標準，依車重分成二個等級。目前所實施之 NO<sub>x</sub> 平均排放值為 0.4 g/km，在 2002 年之後所實施新排放標準，對於車重小於及大於 1,265 kg 車種之 NO<sub>x</sub> 平均標準排放值分別降低至 0.28 g/km 及 0.30g/km。

表 9 美國 EPA 輕型車 Tier 1 排放標準[15]

單位：g/mile

車種分類	100,000 miles/10 years					50,000 miles/5 years				
	NOx diesel	PM	CO	NMHC	THC	NOx diesel	PM	CO	NMHC	THC
HLDT, LVW < 5,750 lbs	1.25	0.10	4.2	0.31	-	1.0	0.08	3.4	0.25	0.41
HLDT, ATW < 5,750 lbs	1.25	0.10	4.2	0.31	0.80	1.0	0.08	3.4	0.25	-
LDT, LTW > 3,750 lbs	0.97	0.10	5.5	0.40	0.80	-	0.08	4.4	0.32	-
LDT, LVW < 3,750 lbs	0.98	0.10	6.4	0.46	0.80	-	-	4.4	-	0.32
小客車	1.53	0.12	7.3	0.56	0.80	-	-	5.0	-	0.39

表 10 美國 EPA 輕型車 Tier 2 排放標準[15]

單位：g/mile

Bin NO.	120,000 miles					50,000 miles				
	NOx	PM	NMOG	HCHO	CO	NOx	PM	NMOG	HCHO	CO
1	0.00	0.00	0.000	0.000	0.0	-	-	-	-	-
2	0.02	0.01	0.010	0.004	2.1	-	-	-	-	-
3	0.04	0.01	0.070	0.011	2.1	-	-	-	-	-
4	0.07	0.01	0.055	0.011	2.1	0.05	-	0.040	0.008	1.7
5	0.07	0.01	0.090	0.018	4.2	0.05	-	0.075	0.015	3.4
6	0.15	0.02	0.090	0.018	4.2	0.11	-	0.075	0.015	3.4
7	0.20	0.02	0.125	0.018	4.2	0.14	-	0.100	0.015	3.4

表 11 日本商用車排放標準<sup>[14]</sup>

車重分類	測試程序	生效日期	單位	NOx		PM		HC		CO	
				最高	平均	最高	平均	最高	平均	最高	平均
<1,700 kg	10-15 mode	1997	g/km	0.84	0.40		0.08	0.62	0.40	2.7	2.1
		2002			0.28		0.052		0.12		0.63
1,700-3,500 kg	10-15 mode	1997	g/km	1.82	0.70		0.09	0.62	0.40	2.7	2.1
		2003			0.49		0.06		0.12		0.63
3,500-12,000 kg	13 mode	1997	g/kwh	7.80 (DI) 6.80 (IDI)	4.50		0.25	3.80	2.90	9.20	7.40
>12,000 kg	13 mode	1999	g/kwh	7.80 (DI) 6.80 (IDI)	4.50		0.25	3.80	2.90	9.20	7.40
		2004			3.38		0.18		0.87		2.22

表 12 日本柴油小客車排放標準<sup>[14]</sup>

單位：g/km

車重分類	生效日期	NOx		PM		HC		CO	
		最高	平均	最高	平均	最高	平均	最高	平均
<1,265 kg	1997	0.72	0.40		0.08	0.62	0.40	2.7	2.1
	2002		0.28		0.052		0.12		0.63
>1,265 kg	1997	0.84	0.40		0.08	0.62	0.40	2.7	2.1
	2002		0.30		0.056		0.12		0.63

## 五、低氮氧化物技術發展

因柴油車之氮氧化物乃經由燃燒過程所產生，因此根據氮氧化物污染防制技術依燃燒反應前、中、後等三個階段分成燃燒過程上游、中游、下游防制技術，如圖 2<sup>[6, 16]</sup>所示，並分別說明如下。

### 5.1 燃燒過程上游控制技術

#### 1. 控制進氣溫度

渦輪增壓引擎可使用後冷卻器以降低進氣溫度，達到低 NO<sub>x</sub> 排放。

## 2. 使用替代性燃料

如使用新配方燃料 (reformulated fuel)、乳化油 (water emulsion)、注射水或氨進入氣缸等方式。

## 5.2 燃燒過程中游控制技術

### 1. 噴油延遲 (injection timing delay) [17]

延遲噴油正時造成氮氧化物排放量降低，但比油耗率 (specific fuel oil consumption) 和黑煙增加。

### 2. 噴射壓力和噴射率分佈

使用先進燃料閥配合電子控制噴嘴適時開啓，調整噴射壓力，燃料與空氣於氣缸內之混合，與噴射率型態 (injection-rate shaping) 或分割噴射 (split injection) 設計等方式皆可降低 NO<sub>x</sub> 排放量 [18]。

### 3. 壓縮比調整

調整引擎壓縮比可改變氣缸內燃氣溫度和壓力，以降低 NO<sub>x</sub> 排放量。

### 4. 氣缸內空氣和噴霧燃料渦流設計

設計噴霧燃料和進氣產生適當渦流，以改變彼此混合型態，形成不同之燃氣溫度分佈；設計噴油嘴形成不同燃油噴霧型式 (spray pattern)，或設計低氮氧化物噴嘴 (low-NO<sub>x</sub> nozzle) 皆可減少 NO<sub>x</sub> 形成。

### 5. 電子控制排氣再循環 EGR (exhaust gas recirculation)

引入部份排氣與新鮮進氣混合後進入氣缸，因進氣中氧濃度降低而減慢燃燒過程，造成最高燃氣溫度降低，以致減少 NO<sub>x</sub> 形成。15 % EGR 約可降低 50 % 之 NO<sub>x</sub>，而燃料消耗率約增加 2 %。在 EGR 進入氣缸前一般需先加以冷卻並去除粒狀物及硫成份，以避免氣缸襯套遭受硫酸腐蝕或黏附粒狀殘渣於氣缸壁上 [16]。鈍性氣體 (如 N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>) 可取代 EGR 以降低 NO<sub>x</sub> 生成。

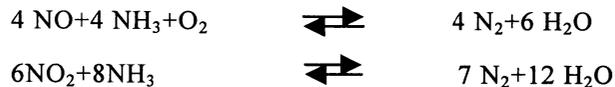
## 5.3 燃燒過程下游控制技術

### 1. 選擇觸媒還原 SCR (selective catalytic reduction) 系統

亦屬排氣後處理 (aftertreatment) 技術一種，以氨 (NH<sub>3</sub>, ammonia) 將排氣中

## 38 柴油車氮氧化物污染排放防制技術

之 NO<sub>x</sub> 還原為 N<sub>2</sub>，H<sub>2</sub>O，約可減少 60-85 % NO<sub>x</sub>。若使用尿素（urea，CO（NH<sub>2</sub>）<sub>2</sub>）則需先經分解反應產生 NH<sub>3</sub> 及 CO<sub>2</sub>。還原反應式為



需另外加裝貯存及噴射尿素系統而使整個系統較複雜，以應用於固定式燃燒設備或重型引擎為主。

### 2. De-NO<sub>x</sub> catalysts（去除氮氧化物觸媒法）

包括（a）主動去除氮氧化物觸媒法（active De-NO<sub>x</sub> catalyst）：作用原理為利用燃油添加劑配合還原反應，以還原 NO<sub>x</sub>，適用於重型柴油車(HDV)；（b）被動去除氮氧化物觸媒法（passive De-NO<sub>x</sub> catalyst）：適用於 LDV，利用觸媒將 NO<sub>x</sub> 還原為 N<sub>2</sub>；（c）吸收式氮氧化物觸媒法（NO<sub>x</sub> absorption catalyst）：將 NO<sub>x</sub> 之吸收材料，如 Ba 加入觸媒，在貧油操作時吸收 NO<sub>x</sub>，當富油操作時，釋放 NO<sub>x</sub> 並予還原，可適用於 HDV 及市區巴士(city bus)。以上三種方法以 NO<sub>x</sub> absorption catalyst 法對於 NO<sub>x</sub> 之削減率最多，以 passive De-NO<sub>x</sub> catalyst 法之削減 NO<sub>x</sub> 效果最低<sup>[13]</sup>。

## 六、防制技術可行性分析

近年來，由於世界各國對於車輛排放法規標準日趨嚴格，而各大車廠、研究機構及學術單位無不投入大量人力/物力積極開發柴油引擎氮氧化物減量技術，然而，由於柴油車仍以暫態（transient state）方式在道路上行駛，因此，氮氧化物的控制技術是否可行，必須考量下列因素：

- 安全性
- 穩定性（即在暫態操作下，依然具良好性能及排放特性）
- 使用燃料
- 耐久性

－維修技術是否可行

而若我們以美國確定實施之 2004 年聯邦法規  $\text{NO}_x + \text{NMMC} \leq 2.5 \text{ g/bhp} \cdot \text{hr}$  的標準而言，具備上述條件的污染控制技術似乎已經成熟（因許多車廠已陸續提出申請合格證），再加上許多發展中的氮氧化物排放控制技術（因 2007 年美國聯邦標準  $\text{NO}_x + \text{NMMC}$  將低於  $1.0 \text{ g/bhp} \cdot \text{hr}$ ），均是本單元探討的重點，分別詳述如後，然而國內若計畫引進相關的標準或技術，則另該考量以下因素：

- －國內油品規格
- －柴油車使用生態及路況
- －維護保養技術
- －成本效益
- －此外，使用中車輛如何進行管制等

## 6.1 排氣再循環（EGR）

排氣再循環（exhaust gas recirculation）係利用引導燃燒後所產生主要含二氧化碳、氮、蒸氣的排放氣體進入進氣系統而稀釋即將參與燃燒的新鮮空氣，其目的在於降低絕熱火焰溫度（adiabatic flame temperature），以減少  $\text{NO}_x$  中之主要成份  $\text{NO}$  的生成量，其中所包含效應有三：

1. 降低絕熱火焰溫度，將使得  $\text{NO}$  的生成率或指數（exponentially）比例的遞減。
2. 由於進氣中氧分子莫耳分量減少，導致  $\text{NO}$  的生成率成正比遞減。
3. 由於二氧化碳及水蒸氣之比熱值（specific heats）高於新鮮空氣，換句話說在相同熱釋放率（heat release rate）下， $\text{CO}_2$  及水蒸氣(vapor)將吸收比空氣較多的熱量，而使得最高溫度（peak temperature）降低。

由於 EGR 降低  $\text{NO}_x$  的效果是可以明顯而易見的，問題是可以降低多少？有無副作用？根據美國環境保護署 2001 年 “Regulatory Impact Analysis” 研究報告<sup>[19]</sup> 顯示，EGR 大約可以在輕負載（light load）狀況下減少 90 % 氮氧化物（ $\text{NO}_x$ ）的生成及全負載（full load）時 60 %  $\text{NO}_x$  生成量，然而由於 EGR 係抑制引擎氣缸內的燃燒率，因此，恐有增加粒狀污染物（PM, particulate matter）及平均制動油耗率（BSFC, brake specific fuel consumption）之虞，尤其是 EGR 氣體若未能在進入引擎進氣之前

## 40 柴油車氮氧化物污染排放防制技術

加以冷卻，將造成進氣密度的降低，相對影響容積效率（volumetric efficiency）進一步降低輸出馬力及增加 BSFC，而 EGR 對於進氣亦無增壓效果以致造成過量空氣（excess air）燃燒，則是造成 PM 生成的主因，然而即使如此，目前符合美國 2004 年標準的引擎族中，EGR 將扮演極重要角色。

以下三點即為 EGR 可以成為未來抑制 NO<sub>x</sub> 排放的主要關鍵技術：

- 足夠的正壓差，可以確保引擎排氣可以自由地導入進氣系統中。
- EGR 在大部份的狀態下，均必須加以冷卻，同時避免管路的銹蝕及阻塞。
- EGR 必須精確地控制流量，而其控制系統的響應也必須快速的因應引擎操作狀況的改變。

### 6.2 Rate shaping 燃料噴射技術

Rate shaping 被美國環保署（U. S. EPA）視為能符合新一代重型柴油引擎排放標準的關鍵控制策略之一，主要由於 rate shaping 技術可以由曲柄軸角度（crank angle）的精確度精準的控制噴油量。所謂 rate shaping 包含在同一曲柄軸角內試噴（pilot injection）約 2 % 的噴射量，再大量噴入燃油，或控制噴油速度以斜坡（類似三角形）噴射曲線方式代替傳統正方形噴射曲線，而有效率的 rate shaping 控制模組，將可獨立控制包含噴射正時（相對應於引擎上死點之噴油作動時之曲軸角度）、壓力、噴油率及噴油時期（duration）而不受引擎負載及轉速的影響。

根據美國 EPA 統計，rate shaping 控制技術可降低 NO<sub>x</sub> 約 20 % 至 50 %，另外也可提昇 10 % BSFC 都不會增加任何 NO<sub>x</sub> 排放。

### 6.3 後處理系統

目前主要發展中之柴油引擎氮氧化物的後處理器大約有三種，即（1）lean NO<sub>x</sub> catalyst，（2）NO<sub>x</sub> absorption catalyst，（3）urea-based SCR，詳細原理分別說明如下：

#### 1. 稀薄 NO<sub>x</sub> 觸媒反應器（lean NO<sub>x</sub> catalyst）

目前已有一些主動（active）及被動（passive）式稀薄 NO<sub>x</sub> 觸媒反應器發展到可以試產階段，並配備在實車以降低柴油引擎 NO<sub>x</sub> 的排放，但此種觸媒只能在狹窄且特定的溫度範圍（range of catalyst temperature）下操作，通常二分為高溫型及低

溫型觸媒，低溫稀薄 NO<sub>x</sub> 觸媒目前已可量產為一種以白金 (platinum) 為基礎材料，並以沸石 (zeolites) 為擔體的反應機制，可同時去除 NO<sub>x</sub> 及 HC，一般用於輕型 (light-duty) 柴油引擎，操作溫度為 200 °C~300 °C 間，而高溫型稀薄 NO<sub>x</sub> 觸媒目前仍在發展階段，主要是針對重型柴油引擎所設計的金屬基材的反應器，操作溫度可超過 300 °C。

新式共同管 (common rail) 噴射系統可以提供主動式 NO<sub>x</sub> 觸媒額外的燃料以利反應，而能夠產生較高的減量效率，但即使如此，整體效率也僅達 15~35%，遠較 NO<sub>x</sub> 吸收觸媒系統之減量效率為低，而發展中的高溫型稀薄 NO<sub>x</sub> 觸媒系統則以 30% 減量效率為目標，同時搭配冷卻式 EGR (cooled EGR) 將有更佳 NO<sub>x</sub> 減量效果。而使用 NO<sub>x</sub> 觸媒另須再考量燃油含硫量之因素，根據美國 EPA 統計，使用 500 ppm 含硫量柴油在 40,000 miles 之後將導致觸媒效率減少 25%，值得國內參考。

## 2. NO<sub>x</sub> 吸收觸媒反應器 (NO<sub>x</sub> absorption catalysts)

NO<sub>x</sub> 吸收觸媒反應器可能是目前最佳的柴油引擎 NO<sub>x</sub> 減量後處理系統，只要在燃料規格許可下，整體減量效果可達 50~75%，甚至高達 100%。此種觸媒主要由白金材料組成，並將排氣中 NO 反應成 NO<sub>x</sub>，並以鋇 (barium) 成份加以反應，且形成氮化鋇 (barium nitride) 之類似貯存效果，之後再藉由噴油系統直接噴射至排氣系統或調整噴射率 (rate shaping) 使在燃燒後噴射，提供足夠之碳氫化合物，由貯存器中將 NO<sub>x</sub> 導出，並經由一般三元觸媒反應器還原 NO<sub>x</sub>。依據美國環保署統計，以 FTP-75 測試程序進行測試，輕型柴油車約可降低 50~75% NO<sub>x</sub> 排放量，惟也將增加 3~5% 油耗率。此種觸媒反應器之效率將比稀薄 NO<sub>x</sub> 觸媒高出許多。而燃油成份也將是此種觸媒的另一挑戰，因柴油中的硫成份也將如同 NO 一般經由白金 (platinum) 反應成 SO<sub>3</sub>，並以硫化鋇方式貯存起來，但這種化合物清除 (purging) 反應，則須比 NO<sub>x</sub> 較高的溫度 (600~700 °C)，而且也須較多油量的供給，如此，對於油耗、PM/HC 排放，甚至反應器本身之使用期限，均是一大挑戰，目前該項技術尚未發展成熟。

表 13<sup>[5]</sup> 為各項柴油車 NO<sub>x</sub> 減量技術之可行性評估結果，冷卻式 EGR 及新式共同管噴射系統有高的技術成熟度且已使用於量產的柴油車，而 SCR 技術雖然可能達

## 42 柴油車氮氧化物污染排放防制技術

到 90 % NO<sub>x</sub> 削減效果，但因尿素儲存及噴射系統較複雜，且有滲漏之虞，所需空間也較龐大，因此雖為可行之 NO<sub>x</sub> 削減技術，但若使用於柴油車尚有待克服之技術問題。最後一項之 passive De-NO<sub>x</sub> catalyst 技術是以還原反應降低尾氣 NO<sub>x</sub> 排放量，較適用輕型柴油車 (LDV)。另外 NO<sub>x</sub> absorption catalyst、active De-NO<sub>x</sub> catalyst 及 passive De-NO<sub>x</sub> catalyst 三種技術屬於尚在研發階段，另外需配合使用低於 50 ppm 的高級柴油，以避免硫成份對於觸媒的危害。表 14<sup>[19]</sup>為各項可行 NO<sub>x</sub> 控制技術可能適用美國及歐盟柴油車排放標準、元件價格、適用於臺灣地區使用之比較說明，其中 EGR、rate shaping 及 lean NO<sub>x</sub> catalyst 都可適用於臺灣地區，且皆可能符合 US 2004、US 2007、Euro IV 及 Euro V 等各階段之 NO<sub>x</sub> 排放標準；而 NO<sub>x</sub> absorption catalyst 技術則為歐、美、日柴油車技術先進車廠正在研發以符合下一階段 NO<sub>x</sub> 排放標準之技術重點，若考慮引進臺灣地區使用仍需考慮將高級柴油目前含硫量標準 (500 ppm) 降低為現行之十分之一，以發揮該技術之 NO<sub>x</sub> 削減成效。

這些發展中的 NO<sub>x</sub> 後處理削減技術之種類、操作原理、適用車種及技術特點整理如表 15<sup>[19,20]</sup>所示，其中 SCR (selective catalytic reduction) 及 NO<sub>x</sub> absorption catalyst 二種技術皆適用重型柴油車 (HDV) 及市區巴士，但以前者較可能達成 US 2004 柴油車排放標準，後者則屬深具發展潛力之 NO<sub>x</sub> 削減技術。

## 七、結 論

氮氧化物為柴油車主要之空氣污染物，國內機動車輛所排放之氮氧化物約有 60 % 是由佔機動車輛數 3 % 之柴油車所產生，為期有效減少柴油車氮氧化物排放污染，除可由制訂及實施柴油車之氮氧化物排放標準及措施著手外，研發及推廣車輛之氮氧化物污染防制技術亦可有效減低柴油車氮氧化物排放。本文就我國、歐盟、美國與日本對於柴油車依據燃燒前、中、後等三個階段將車輛污染防制技術區分為燃燒過程上游、中游及下游控制技術，在燃燒過程上游控制技術包括使用醇類、乳化油及其他替代燃料，中游控制技術可包括噴油正時、噴射壓力調整、噴油 rate shaping 調整、燃燒混合條件改變等，下游控制技術包括使用 SCR、EGR 及 De-NO<sub>x</sub> catalysts

等技術方法。目前發展中之氮氧化物削減技術中，冷卻式 EGR 及新式共同管噴射系統屬成熟度較高之技術，SCR 技術雖然可能削減 NO<sub>x</sub> 之效果最高，但因儲存及噴射系統較複雜及所需空間體積較龐大等問題，現階段尚未適用於柴油車使用；NO<sub>x</sub> absorption catalyst、active De-NO<sub>x</sub> catalyst 及 passive De-NO<sub>x</sub> catalyst 三種技術屬於仍在研發階段，技術成熟度尚低，但深具未來發展潛力，尤其是 NO<sub>x</sub> absorption catalyst 為國際先進柴油車廠為符合下一階段柴油車 NO<sub>x</sub> 排放標準之技術研發重點。

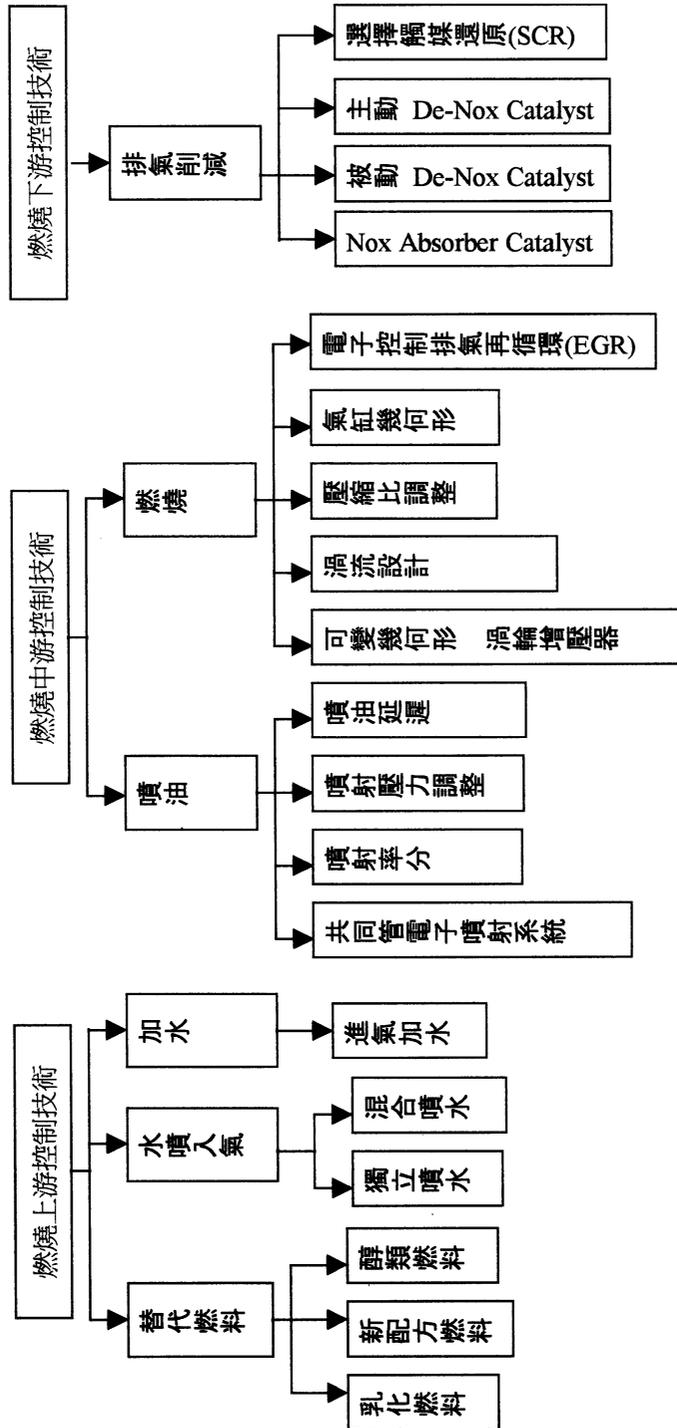


圖 2 防制氮氧化物可行技術<sup>[20]</sup>

表 13 NO<sub>x</sub> 減量技術可行性評估<sup>[5]</sup>

技術種類	效果	技術成熟度	成本	說明
SCR	70~90%	○○	高	需龐大空間，控制管理複雜
Cool ERG	10~30%	○○○	中	
Injection	10~30%	○○○	高	
Rate shaping	20~50%	○○○	中	
NO <sub>x</sub> absorption catalyst	50~70%	○	高	需配合使用低硫(小於 50ppm)柴油
Active De-NO <sub>x</sub> catalyst	15~35%	○	高	需配合使用低硫(小於 50ppm)柴油
Passive De-NO <sub>x</sub> catalyst	15~25%	○	高	需配合使用低硫(小於 50ppm)柴油

註：“○”表示技術研發中尚未量產使用。  
 “○○”表示雖技術可行但用於柴油車技術尚待評估。  
 “○○○”表示已量產使用於柴油車。

表 14 各項 NO<sub>x</sub> 控制技術發展現況<sup>[19]</sup>

技術項目	減量效果	標準				技術現況			成本 (NT \$ 1000)	台灣地區適用性
		US 2004	US 2007	EURO IV	EURO V	Concept	PilotRun	Production		
ERG	10~30%	V	V	V	V			V	30~50	適用
Rate shaping	20~50%	V	V	V	V			V	5~20	適用
NO <sub>x</sub>	15~35%	V	V	V	V		V		200~300	適用
NO <sub>x</sub> adsorption	50~75%		V		V		V		500	1.柴油含硫量 2.再生功能
SCR	70~90%		V		V	V			>1000	1.Ammonia 管理 2.安全法規

目前為歐、美、日各大車廠發展符合下一階段標準的重點!!

目前成本資料僅為元件價格!若大輛引進則應考量單一車量成本效應!

表 15 NO<sub>x</sub> 後處理削減技術<sup>[19、20]</sup>

技術種類	操作原理	適用車種	特點
SCR	以氨(NH <sub>3</sub> )將排氣中 NO <sub>x</sub> 還原為 N <sub>2</sub> 與 H <sub>2</sub> O	HDV 及 City bus	1.系統較複雜需加裝尿素貯存系統及噴射系統 2.有尿素或氨滲漏之餘 3.轉換達成率可達 90% 4.較有可能達成 US2004 標準之技術
NO <sub>x</sub> absorption catalyst	以觸媒將排氣中 NO <sub>x</sub> 捕集儲存，再以碳氫化合物將其還原	HDV 及 City bus	1.技術發展中 2.減量效果可達 50~75%，可能是最佳的 NO <sub>x</sub> 減量處理技術 3.系統複雜
Active De-Nox catalyst	還原反應及額外燃油添加劑	HDV	1.需控制燃油添加劑添加量 2.需換效率 15~35%
Passive De-Nox catalyst	還原反應	LDV	1.低轉換效率 2.觸媒操作溫度範圍小
Cool ERG	排氣再循環	HDV 及 City bus	目前已成熟之技術
Common rail injection	電子噴射技術	LDV	目前已成熟之技術
Rate shaping	噴油控制	HDV 及 City bus	目前已成熟之技術

註：“HDV”表示重型柴油車  
“City Bus”表示市區巴士  
“LDV”表示輕型柴油車

## 八、參考文獻

- 1.行政院環境保護署網站，<http://www.epa.gov.tw/>，民國 91 年。
- 2.行政院交通部統計處網站，<http://www.motc.gov.tw/service/>，民國 91 年。
- 3.Pischinger, F.F., Compression-ignition engines, Handbook of Air Pollution from Internal Combustion Engines, edited by Sher, E., Academic Press Limited, London, U. K., pp. 261-263, 1998.

4. Heywood, J. B., Motor vehicle emissions control: past achievements, future prospects, Handbook of Air pollution from Internal Combustion Engines, edited by Sher, E., Academic Press Limited, London, U. K., pp. 3-7, 1998.
5. 財團法人車輛研究測試中心，訂定柴油及替代清潔燃料引擎汽車第四期排放標準專案工作計畫，行政院環保署，計畫編號：EPA-88-FA33-03-3080，民國 88 年。
6. 林成原，柴油公車污染控制技術，公車污染法規與防治技術研討會專題演講，行政院環境保護署，台北，pp. 1-20，民國 85 年。
7. Nevers, N.D, Air Pollution Control Engineering, 2<sup>nd</sup> ed., McGraw-Hill Book Co., Singapore, pp. 471-481, 2001.
8. Sher, E., Environmental aspects of air pollution, Handbook of Air Pollution from Internal Combustion Engines, edited by Sher, E., Academic Press Limited, London, U. K., pp. 27-41, 1998.
9. 行政院環境保護署，窗外有藍天-空氣品質改善紀實，1999 年 3 月。
10. Heywood, J. B., Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill Book Co., Singapore, pp. 572-592, 1998.
11. Borman, G. L. and Ragland, K. W., Combustion Engineering, McGraw-Hill Book Co., Singapore, pp. 125-133, 1998.
12. 行政院環境保護署，機動車輛排放空氣污染物及噪音管制彙編，民國 90 年。
13. Japan Automotive Manufacturers Association, Diesel Emission Control Technologies for Euro III (2000) and Euro IV (2005) Standards in Japan, Feb. 2000.
14. Concawe Report, Motor vehicle emission regulations and fuel specifications, Part I, Summary and annual 1996 update, 1997.
15. U. S. EPA, Code of Federal Regulations, Title 40, Part 86, 1996.
16. Henningsen, S., Air pollution from large two-stroke diesel engines and technologies to control it, Handbook of Air Pollution from Internal Combustion Engines, edited by Sher, E., Academic Press Limited, London, U.K., pp. 477-534, 1998.

17. Nakano, K. et al., NO<sub>x</sub> reduction test results on a two-stroke low speed diesel engine, 21<sup>st</sup> CIMAC Conference, Paper D 20, Interlaken, 1995.
18. Pedersen, P. S., Emission control of large-bore two-stroke engines, FISITA 96, Paper in Proceeding from the X X VI Congress, Praha, June 1996.
19. U.S. EPA, Regulatory impact analysis: control of emissions of air pollution from highway heavy-duty engines, July 2000.
20. Turns, S. R., An Introduction to Combustion, 2<sup>nd</sup> ed., McGraw-Hill Book Co., Singapore, pp. 572-584, 2000.