

船舶引擎排氣對空氣品質之影響

華 健*

摘要

有關全球性船舶大氣排放的規定已於 1997 年九月成為定案。其防制技術不論是在國際間、各國國內、及各區域內都正被廣泛地討論和研發中。國際海事組織所初訂的目標為在 2000 年將 SO_x 之排放減少 50%，NO_x 減少 30%，而船用燃料油之硫含量上限為 1.5%。評估海運排氣對當地空氣品質的影響可分成兩個階段來進行：先是決定港市船舶的排放物之量及擴散情形，其次再評估其結果對當地空氣品質所造成的衝擊。港市船舶廢氣排放物之估算可藉由船舶總 Kwh 乘上污染物排放因數而得。比較源自船舶空氣污染與台灣地區其他來源之空氣污染及總污染量可看出源自船舶之空氣污染占總污染量之比率以 SO_x 為最高(占 0.52%)，其次依序為 NO_x (0.13%)，粒狀物(0.04%)，及碳氫化物 (0.008%)。目前船舶空氣污染之相關技術都正處研發階段，其成效、使用壽命、提供情形及經濟成本等，都一直隨時間在變。當務之急在於一面獲取可達不同污染防治程度的技術組合，同時針對這些組合進行經濟分析與評估，使臻實用。

【關鍵字】

1. 船舶引擎
2. 海運
3. 大氣排放

*海洋大學輪機工程系副教授

一、前　　言

聯合國國際海事組織(IMO)，在過去近四十年當中一直針對防止船舶污染海洋的方法與其落實不遺餘力。而直到最近 IMO 更進一步針對防制船舶之空氣污染進行立法^[1-4]，並於 1997 年年底在會員國間取得普遍的認同。由於這是針對海運所造成的污染，頭一次將問題擴及海洋本身以外的範圍(包括大氣與陸地)，一般咸信此跨國政策的實行，必會對國際法規與貿易產生廣泛的潛在影響。

目前有關船舶空氣污染之防制技術不論是在國際間、各國內、及各區域內都被廣泛地討論和研發中。IMO 初訂的目標為在 2000 年將硫氧化物(SOx)之排放減少 50%，氮氧化物(NOx)減少 30%，而船用燃料油之硫含量上限為 1.5%^[5,6]。在對船舶排放物進行正式管制之前，必須先實際評估船舶一旦將廢氣排入大氣中，對於當地空氣品質的影響^[7]。

二、國際間船舶空氣污染之立法

當今全球船舶主要以柴油引擎作為動力。由於柴油引擎耗油較低的緣故，其在 1940 年代取代了在那時之前具船舶動力主流地位的蒸汽渦輪機系統。在過去，國際間所共同依循的有關防止船舶污染海洋公約，MARPOL 73/78 所針對的不外船舶直接排放入海的油等污染物^[8]。直到 1990 年，IMO 開始正式討論防制船舶污染大氣的相關議題。其所針對的空氣污染物包括了氟氯碳化物(CFC)，海龍(halon)及揮發性有機化合物(VOC)。而其所提方案中主要將重點集中在船舶所排放廢氣中的 NOx 和 SOx^[2,3]。

2.1 船舶大氣排放之減量目標

IMO 所初訂的目標為在 2000 年將 SOx 之排放減少 50%，NOx 減少 30%，而船用燃料油(bunker)之硫含量上限為 1.5% (如表 1)。

表 1 IMO 所訂源自船舶空氣污染防制逐步減量之目標

(MEPC 第 30 次會期提案 14)

防治對象	減量目標	預定期限
CFCs	減至以 1986 年為基準之 50%	1995 年以前
	減至以 1986 年為基準之 15%	1997 年以前
	全面停用	2000 年以前
Halons	減至以 1986 年為基準之 50%	1995 年以前
	全面停用	2000 年以前
SOx	減至參考值的 50%	2000 年以前
	NOx 減至參考值的 70%；依所採行之 2000 年以前最佳可用技術，且不會增加其它方面的空氣污染，又不會額外增加成本	
	揮發性有機化合物(VOC)	2000 年以前
垃圾及其它船上產生廢棄物之焚化	減至參考值的 70%	
	基於環境之考量，定訂標準在 1993 年補充完成	

資料來源：[9]

2.2MARPOL 73/78 附則陸

1995 年 9 月 IMO 海洋環境保護委員會(MEPC)第 37 次會期決定將附則陸(Annex VI)納入 MARPOL 73/78 中，作為該公約之 1997 年議訂書，且須在合起來的商船總噸數超過全球的 20 至 50% 的 15 個會員國接受後的六至十二個月內生效。至於台灣將會受到 MARPOL 73/78 影響的原因則包括^[10]：

- 1.台灣本身與海運間關係密切；
- 2.台灣可藉著實施 MARPOL 73/78 公約保護本身的海域環境免受本地及外來船隻污染之害；
- 3.為達保護台灣水域之目的，必須依據所訂之環境保護目標結合國內既有之相關環境法令與 MARPOL 73/78，研擬相關法規。

2.3 區域與國家之防制船舶空氣污染

除 IMO 之全球性立法外，類似區域性合作也正在計劃中，而同時也有很多國家正在其國界內擬訂更為嚴苛的管制法令。例如美國環保署(US EPA)即曾提出方案針對航行至洛杉磯及長堤港的船隻收取排放費^[11]：

1. 基本排放費: USD 10,000/噸之 NOx 排放

2. 計算基準線

$$\text{NOx(g/kWh)} = 64.3 \times \text{rpm}^{-0.2}$$

3. 減免：

- 減少 NOx 排放大於 80%者，減免 90% 之收費
- 減少 NOx 排放 30 到 80%者，減免 50% 之收費
- 減少 NOx 排放小於 30%者，零減免。

依照 NOx 限制基準曲線斜率來看，收費最高的應是低速引擎。

三、船舶空氣污染物排放量推估

3.1 船用柴油引擎廢氣的成份

船用柴油引擎排放的廢氣中主要包括了氮、氧、二氧化碳及水，少量一氧化碳、硫氧化物、氮氧化物、和一部份已作用但尚未燃燒的碳氫化合物及粒狀物質。自由氮與氧同時是引擎進氣和排氣中的主要成份。氮在進氣中佔了約 78% 的體積，在燃燒過程中大部份都未參與反應，只有極小部份會起化學反應而成為不同之氮氧化物。至於氧佔了進氣體積 21%，在燃燒過程中也只有少部份會被轉換，而最終所存在自由氧的量則會隨引擎在運轉時的空氣過剩率而變。

3.1.1 NOx

船舶引擎氮氧化物的生成是燃燒空氣中氮分子與燃料中有機氮被氧化的結果。因為使用的燃油不同，尤其是船用重燃油，引擎排氣中所含的氮氧化物中可能會有相當一部份是來自燃料中的有機氮。

至於若考慮大氣中氮的氧化，則主要取決於燃燒室中的局部狀況。以其中主要產物一氧化氮(NO)來說，在高溫和最佳的空氣/燃料比(A/F)條件下，會有助於其產

生。而在燃燒循環末期和在流過排氣系統時所生成 NO 的 5-10% 接著會被轉成二氧化氮(NO_2)，同時還會生成極少量 N_2O 。而從排氣系統排出後在大氣溫度下，NO 還會進一步被氧化成問題較為嚴重的 NO_2 。

NO_x 所引起的負面作用可以分成幾方面來談。 NO_2 最令人關切的問題是對人呼吸系統及植物的戕害；同時其亦為造成酸雨的主因。另外， NO_x 與 VOC 同時存在時還涉及光化學反應而導致危害人體健康與植物，以及對流層中臭氧量的提高^[12]。而 NO_2 對於平流層中的臭氧耗蝕與全球氣候變遷亦具有某種程度的影響^[13]。

3.1.2 SO_x

硫氧化物是直接得自所用燃料中所含的硫。硫在燃燒室中氧化後大部份都成了二氧化硫(SO_2)，極少一部份則成了三氧化硫(SO_3)。而用以保護引擎表面的鹼性潤滑劑則有一小部分會將燃燒生成的 SO_x 轉換成硫酸鈣，這部份的量與影響可謂微不足道。較令人關切的 SO_2 問題是其對人體呼吸系統、植物、以及建築物材料的不利影響^[14,15]。

3.1.3 CO

船舶引擎所排放一氧化碳(CO)是含碳物質不完全燃燒的產物。因此其形成主要取決於過剩空氣量、燃燒溫度、及其空氣/燃料之混合物在燃燒室中是否均勻分佈而定。通常若是過剩氧含量夠多而燃燒過程也有效，則 CO 的排放量會很有限。然而當引擎保養不良，或在低出力範圍內運轉時 CO 含量亦相對提高。人們對於 CO 排放的關切主要是在於其降低血液中血紅素的攜氧能力，而對人體健康產生不利影響。縱然 CO 亦屬溫室氣體而會略微影響全球氣候變遷，其對環境的廣泛影響倒較不受到關切^[15,16]。

3.1.4 HC

船舶引擎排氣中的碳氫化合物(HC)主要包括了燃料和潤滑油未燃或未完全燃燒的部份。通常不完全燃燒的碳氫化合物的性質及量的程度主要取決於燃燒性質及引擎的熱效率。而此主要又受到引擎的狀況和負荷的影響^[14,16]。

3.1.5 粒狀物

船舶引擎排氣中粒狀物(particulates)部分主要包含了元素碳、礦物灰、重金屬、以及各種未燃或部份燃燒之燃油或潤滑油碳氫化合物等有機與無機物質的複雜混合

物。大部分柴油引擎排放的微粒直徑都在一微米以下，其沉降速度很低，而易於被空氣攜帶傳送。因此其所造成的不利影響很可能會遠離排氣源頭的附近。雖然有關船用柴油引擎粒狀排放物組成的文獻極為貧乏，但從應用在其他方面柴油引擎的研究結果卻不難預期其可能導致一般呼吸問題與較嚴重的毒性病變及致癌等後果^[16]。

3.1.6 微污染物

船舶引擎微污染物 (micropollutants)一般指的是，1 ppb(十億分之一)等級，微量存在的污染物。儘管量少，其所造成的負面影響卻不容忽視。典型的有機微污染物，有像是多芳香族碳氫化合物(PAH)、戴奧辛(dioxins)、及夫喃(furans)等。有關排氣中 PAH 在燃燒過程方面及其存在與致癌特性等的文獻都已相當齊全。最近的研究更進一步發現，來自排氣系統，由 PAH 與 NOx 反應所生的硝化 PAH 具有高度引發病變的效果^[16]。

表 2 所示為源自海運與全球每年排放至大氣重金屬與其化合物的比較。整體來說，海運所排放的重金屬就總量來看，只有鎳與釩佔有相當高之比例。由於其為船用燃油中既有的組成，因此只要是繼續使用船用燃油便勢難避免其產生。另外，像是鎘、鉻、銅、汞、鎳及鋅等，在排氣中的含量，可反應出其在燃油中的含量。而船用燃油中重金屬的組成又可進一步反應出燃油的混合情形、其在儲存和處理時的添加劑、以及燃油在船上經處理後所去除的部分。重金屬對於生物經由對生化反應中酵素的毒性及抑制作用已廣為人知，其進一步影響包括降低水生態系的繁雜度及對人致癌等^[17,18]。

表 2 每年排放至大氣之重金屬及其化合物

項目	^{1/} 源自海運之估計值(噸)	全世界之估計值 人為產生	全世界之估計值 天然產生
砷	55	18,820	12,000
鎘	26	7,570	1,300
鉻	20	30,480	44,000
鈷	36	--	--
銅	50	35,370	28,000
鉛	15	332,350	12,000
汞	3	3,560	2,500
鎳	3,043	55,650	30,000
鉻	37	--	--
錫	12	--	--
釩	8,900	200,000	65,000
鋅	90	13,880	45,000

1/由平均在燃油中之含量，乘上每年全球海運之燃油耗量估算所得。

2/資料來源：[17,18]。

3.2 海運大氣排放之量化

通常在評估海運對大氣所造成的汙染時，是在海上某特定區域的貿易航線上，重疊航經商輪的數量建立一模式，然後再套上某種型式的排放因素，將此資訊轉換成不同的排放的程度。然而，困難之處即在於選擇適當的排放因素。這主要是因為標準的適當排放因素迄今尚未建立。目前可能遇到的適當排放因素就有好幾套，包括美國加州、荷蘭、挪威、經濟合作與發展組織(OECD)、美國環保署(US EPA)、以及一些船用柴油引擎製造商在未來所可能陸續提出的。這些適當的排放因素有得自引擎試驗的量測結果、船上服役中的引擎、或是取自其它排放來源的因素。為估算源自船舶排放廢氣至大氣之量，首先必須估計出某特定地區轉換至海運用途之能源量，然後乘上一排放因素以估計轉算成排放物之量^[19]。

3.2.1 排放因素

引擎型式出力、使用年齡與運轉狀況、以及燃油的等級對於排放因數(emission factors)都大有影響。此外，當某甲組織其所採用來定義其所用排放因數的專有名

詞，被乙組織所誤認時，問題會變得更加複雜，例如「碳氫化物」與「揮發性有機化合物」，和「微粒」、「煙灰」與「黑煙」之間的轉換。事實上，以上稱呼的量並不相等，而在其間作互換也就不恰當^[20]。

在文獻上所提過既有的排放因數，其出處一般都無從獲得，而絕大部分的排放因數則是得自於試驗引擎的數據。由於這類引擎一般都藉調整、維護及燃油品質以維持其在最佳狀態，以致雖只是另一部類似的引擎，由於其間必然存在不同的使用與維修狀態，其排放情形也就大不相同^[21]。此外，大部分排放因數所依靠的舊式引擎和目前耗油最經濟的新式引擎之排放程度也有相當大的落差。而有關使用現存排放因數的困難其背景資料，與使用不同的排放因數所計算得的數據間的轉換等各方面的考慮卻又相當缺乏。

當要評比得自幾部不同引擎的統計數據時，亦會出現同樣的困難。以致於若進一步追究藉由排放因數所估計出的排放量，則與其有關量化步驟本身資訊不夠詳細等因素所造成的不確定性也就更不用說了^[21]。

3.2.2 排氣之量測

量測排氣的方法有很多，大致上可分成兩大系統，體積量測與質量量測。體積量測(單位如 g/m³ 或 ppm)雖然很容易實際量得，但很重要的一點是，其必須在某一特定的排氣含氧量之下，例如 0%、5%、或 15% 氧等，否則也可外部空氣稀釋排氣樣本以符合限制。排氣質量之量測(單位如 g/KWh 或 g/GJ 之供應燃油)，僅隨出力、耗油、以及熱效率而改變，故較為實用^[22]。以上兩種量測其間雖可互相轉換，但卻必須視空氣/燃料比值、燃油熱值、及總熱效率之假設而定。因此，當其用在比較二種不同類型的引擎或燃油時也就不太有效了。

3.2.3 海上排氣量測

過去六年內英國勞氏驗船協會，曾在安裝於 50 艘船上的 65 部引擎作過穩定狀態大氣排放測試^[23]。其中大部分的測試都只限於主機，而若情況允許，少數發電機引擎亦一併作了測試。所研究的每艘船上的，穩定狀態的監測項目包括 NO, SO₂, O₂, CO, CO₂ 及碳氫化合物的排放，負荷範圍則從空轉到滿載。

進行以上測試的先決條件是對受測船正常的商業運轉盡可能不造成干擾，而且這些船亦不需作任何結構上的變更。所以採樣也就無法在引擎的排氣系統內進行，

而只能在排大氣末端的煙囪處採樣。可能影響船舶排氣的變數包括船及引擎的大小、年齡與設計、推進系統、燃油品質、以及船在進場週期中所處階段。從所得結果可看出，很顯然地，HC, CO, 及 NOx 之排放隨引擎負荷及轉速而改變。就總排放量來比較暫態運轉與同時間內的定態運轉，暫態運轉單位時間內的 CO 排放量顯然較高，而 NOx 反而較低。相反地就 HC 之排放而言，暫態運轉與穩定運轉狀態則難以看出高低^[23]。從勞氏協會的經驗得知，在決定港市船舶的排放物對當地空氣品質所造成衝擊時，以下是必須獲得的數據：

1. 港市的空氣品質監測數據(風速、風向、氣溫、及溫差等大氣數據)，
2. 來自船舶的大氣污染物之量與船舶的運動途徑，
3. 船舶之相關數據，如引擎出力，
4. 船舶各排放物之排放因數。

至於船舶排放物之擴散情形，則可利用高斯煙團擴散模式來進行估算^[24]。而進一步量化海運排放時尚需要以下資料：船舶位移數據、船舶航線、排放估算、有關船舶錨泊及通過某特定點的數據。

四、台灣地區源自船舶之空氣污染

針對源自船舶之廢氣排放對港市空氣品質的影響，本研究藉由各港務局所取得的船舶統計報表進行源自商輪廢氣排放之初步估算。表 3 所示為民國 84 年本省五大港市商輪進出港之統計資料。其中主引擎總出力之數據，為總噸數乘上一估算因數，1.156 計算得。該估算因數則得自近 200 艘船舶之總出力數據之統計運算。表中第五欄總靠泊時數指的是所有船舶停靠碼頭之總時數。第七欄總操車時指的是所有船舶自進港至靠好碼頭所需時間。

表 3 本省五大港市於民國 85 年之船舶統計資料

港 口	總艘次	總噸數	主引擎總出力,Kw	總靠泊時數	總在港時數	總操車時數
基隆	8,159	114,402,269	96,362,963	250,756	58,946	309,702
台中	4,088	49,531,016	42,844,329	209,306	4,088	213,394
高雄	14,317	214,123,544	207,706,866	489,078	108,289	497,367
花蓮	1,233	8,561,489	7,405,688	60,006	1,066	61,072
蘇澳	645	5,593,103	1,673,775	44,645	1,183	45,828

資料來源：[25]

4.1 港市船舶廢氣排放物之估算

簡言之，港市船舶廢氣排放物之估算可藉由船舶總 Kwh (含操車時之主引擎及靠泊時之輔引擎) 乘上污染物排放因數（如表 4）而得。估算時假設：

- 1.低速主引擎於港內維持 85% 之最大連續出力 (MCR)，
- 2.使用燃料油含硫 2.7%，
- 3.操車與靠泊期間（在港期間）內平均維持 600Kw 出力之中速發電機柴油引擎之運轉，
- 4.低速主柴油引擎於靠泊期間處停止狀態。

表 4 船舶大氣污染物之排放因數

污染物	kg/噸燃料	g/仟瓦小時
氮氧化物	87* 57+	17* 12+
一氧化碳	7.4	1.6
碳氫化合物	2.4	0.5
二氧化碳	3170	660
二氧化硫	20 × %S	4.2 × %S
粒狀物	7.6	1.5

註：*：低速引擎，+：中速引擎，%S： 燃油含硫重量百分比

資料來源：[26]

4.2 船舶各主要空氣污染物之排放量

表 5 所示即為以此估算各港源自船舶廢氣中各主要污染物之排放量。表 6 比較源自船舶空氣污染與台灣地區其他來源之空氣污染及總污染量。從所示結果可看出，源自船舶之空氣污染占總污染量之比率以 SO_x 為最高(占 0.52%)，其次依序為 NO_x (0.13%)，粒狀物(0.04%)，及碳氫化合物 (0.008%)。其中 NO_x 之排放因數得自 NO 之量測，假設 NO 與 NO_x 之間僅有微小差異。

船舶大氣排放物當中之 SO_x 主要來自燃油中的硫被空氣中的氧所氧化後的產物，NO_x 主要則是空氣中的氮和氧在高溫下結合所致。所以在 IMO 所提降低 SO_x 之目標應可由降低船用重燃料油中硫份至 2 到 3.5% 達到。至於 NO_x 之降低理論上應可在燃燒室中溫度的降低和駐留時間的縮短二方面的改進達到^[27]，以下就各染物之防制技術分別探討。

表 5 台灣省各主要港源自船舶廢氣中各主要污染物之排放量(公噸/年)

港口	粒狀物	二氧化硫	氮氧化物	碳氫化合物	一氧化碳	二氧化碳
基隆	47.0	355.6	100.3	15.7	50.2	26,698
台中	14.5	109.6	8.8	4.83	15.5	5,800
高雄	193.8	1,456.2	440.0	64.6	206.7	77,525
花蓮	0.7	5.6	0.7	0.3	0.8	328
蘇澳	0.1	1.1	0.2	0.1	0.2	62
源自船舶總計	256.2	1,937	550	85.4	273.0	104,413

表 6 源自船舶空氣污染與其它空氣污染源總污染量之比較(公噸/年)

污染源	粒狀物(%)	二氧化硫(%)	氮氧化物(%)	碳氫化合物(%)	一氧化碳(%)
海運	256(0.04)	2,152(0.5)	550(0.1)	85.4(0.008)	273(0.01)
公路運輸	50,172(7.1)	21,245(5.2)	184,034(44.3)	395,439(35.8)	1558,045(76.0)
非公路運輸	636(0.09)	2,625(0.64)	5,484(1.32)	885(0.08)	118,568(5.78)
總排放量	706,652	410,142	415,427	1105,813	2051,343

5.1 微粒

由於柴油機排氣中的微粒大部分小於一微米，其去除的困難度可想而知。例如洗滌器(scrubbers)和旋風集塵器(cyclones)便不適於用在船上。至於靜電集塵器(electrostatic precipitators)和袋式集塵器(baghouse precipitators)雖然可有效地分離和收集引擎排氣中的微粒，但其尺寸大約是引擎的三倍大，所以用在船上也不實際。微粒觸媒濾器(particulate catalytic filter traps)可用以燒掉排氣中碳氫化合物及碳的部分，但也尚無法除去其中的灰分。

引擎在一定負荷及一定轉速的情況下，形成煙灰的量相當低，對環境所造成危害亦相當低。船舶在這方面的主要問題是在引擎剛起動以及在港內操車，負荷變動的情況下所冒出的黑煙。其主要是空氣量不足的結果，可經由以下途徑改善^[22]：

1. 排氣增壓機(過給氣機)型式之選擇及規格之要求以確保迅速反應，例如脈動系統，適當型式之軸承，及小慣性動量。
2. 船在港內停機期間預熱氣缸套冷卻水至正常運轉狀態。
3. 除標準配備之起動燃油限制器外，在電子調速器上可另外配備一套煙限制器(smoke limiter)。
4. 利用「空氣協力」來加速增壓機之壓縮機，即藉來自空氣櫃及壓縮空氣系統之加壓空氣或噴氣流來協助加速。試驗結果顯示，藉著空氣協力的確可以將黑煙減至看不見的程度。

5.2 硫氧化物

燃油的來源是有機物，因此在燃油和燃燒室中必然含有不等量的硫份，而後又不可避免地氧化形成硫氧化物。引擎燃燒室中的硫經氧化形成硫氧化物其中主要為二氧化硫(SO_2 ，約 93%)，及三氧化硫(SO_3 ，約 7%)。硫源自燃油而後轉化成 SOx ，因此引擎所形成 SOx 之排放量不外為燃油中硫含量之函數。而柴油引擎之 SOx 排放則可藉著以下之一個對策達到^[23]：

1. 降低油中含硫；
2. 採用排氣脫硫技術

5.2.1 降低油中含硫

石油危機所導致的巨幅油價上漲，使得引擎設計研發的努力著重在使用重殘留燃油上。此努力的結果便是 1980 年問世的單一燃油觀念。然而從環境保護的角度來看燃油品質，近年來 IMO 所最重視的一個重要議題卻又是有關在港區和受限水域內，硫的排放。面對這個問題，國際間有兩個思考主流，第一個認為應該設定一個整體的上限，然而贊同此想法的人卻不多，這主要是因為要在設定限度的水平上取得一致很不容易。另一個想法則是認為應該由各國或各港自行訂定自己的限度標準。這個作法，一般認為像美國或是斯堪地那維亞等國家會比較行得通。不過，無論採行以上任何一種作法，極困難的一件事就是監控與執法。

IMO 最近有關燃油的另一項行動則是由德國代表所提出的，針對燃油中鎳與釩的量設限。不過，這個建議隨即被駁回，理由是其與空氣品質幾乎無關。嚴格的燃油品質限制固然在環境保護的層面有其積極正面的意義，但在短期經濟層面上往往卻也有其負面的效果。例如美國加州的長堤和洛杉磯，向來為往返南美及穿越巴拿馬運河船隻加油的重鎮。其在 1992 年即採行相當嚴格的法規並對違規者施以重罰，結果導致燃油生意大幅滑落及燃油供應商之有效反彈，以致終於放寬了限制 [28]。

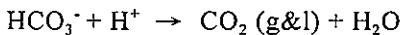
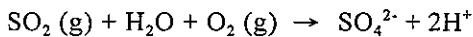
5.2.2 採用排氣脫硫技術

清除廢氣中 SO_x 常用的方法之一是在洗滌器中以水清洗廢氣，但這將留下含有硫酸的廢水，雖接著可以化學方法中和，但最後終將留下棘手的廢棄物處置等問題，而若想從其中回收硫原料或硫酸又都會大大提高引擎上的投資。至於燃油中的硫份，因為會影響燃料的價格，在評估是否選用低硫燃料或採用廢氣清淨系統時，以上因素都須列入考量。

至於採用各種不同的整體吸收劑(Ca(OH)₂ , CaCO₃ , Na₂CO₃)，由於需要大量化學品之存放空間，顯然是行不通的。倒是以海水洗滌器中除去排氣中的 SO_x 是具有相當潛力的。該技術曾在挪威船 M/S 'Kronprins Harald' 上試驗過，報告中指出 SO_x 可因此得到顯著降低，其他類似的以海水脫硫的過程亦被裝設在陸地上大型的 SO₂ 來源而其所獲致的經驗，亦具有相當大的鼓舞作用。海水之所以適於用來吸收 SO_x 有兩個主要理由^[29]：

1. 海水含有碳酸物屬鹼性，可對加入的酸造成緩衝；
2. SO_2 被吸附後，會轉換成為海水既有組成的鎂鹽與鈣鹽等碳酸物。

洗滌器以海水吸附 SO_2 之基本反應，可簡化成如下：



海水洗滌系統主要有以下特性：

1. 高液體/氣體比，一般吸附一公斤之 SO_2 大約需 $2\text{-}3\text{m}^3$ 之海水，至於淡水洗滌器之洗滌效率則相當低；
2. SO_2 之吸附程度一般可達到 95%以上；
3. 洗滌系統會形成酸性霧，因此排氣系統在洗滌器之後的部份須特別作好防蝕處理；
4. 系統中之排氣需先冷卻至接近海水溫度，而最後為了使煙團在大氣中形成有效擴散及浮力，還必須加熱，此另加的副燃燒器又將大幅提高運轉成本。較佳的再加熱方法是以廢氣餘熱在洗滌器前加熱空氣，再以此空氣導入洗滌器之後與燃氣混合；
5. 該系統之操作成本很低；
6. 可同時降低約 10-20%之 NO_x 。

5.3 氮氧化物

柴油引擎燃燒後的 NO_x 產物決定於局部的情況。引擎中的燃燒溫度使氧和氮不可避免地起反應形成了 NO_x ，先是立即產生 NO ，接著在膨脹和排氣的過程中， NO 進一步轉換成 NO_2 和 N_2O ，分別大約是最初所產生 NO 量的 5% 和 1%。決定局部情況的最主要的兩個參數是溫度和含氧量。依照經驗，一個可粗略估計的方法是：溫度每升高 100°C ，生成的 NO_x 會增加三倍^[12]。

通常為提高低速二行程柴油機的效率—即降低耗油，並為延長吊缸間隔時間和提高可靠性，都會設法將燃燒室溫度維持在所謂的「最佳狀況」，因此，未經特別控制所排放到大氣的 NO_x 都相當高。

基本上控制柴油引擎排放 NO_x 的方法有二，即初級方法—著眼於降低燃燒時所形成 NO_x 之量；和二級方法—著眼於從排氣中除去 NO_x 。初級方法包括藉延後

噴油以降低最大燃燒壓力、再循環部份排氣減少掃氣量、噴水到燃燒室，及以水乳化燃油等。這些方法中只有結合乳化燃油和降低最大壓力尚屬可行。如此一來，就某一引擎來說雖然 NOx 可降低 30%，但耗油量也會因而提高 3%^[12]。

總的來說，船舶大氣污染的防制之道在於盡可能預防它的生成，而非在其形成之後才設法加以去除。絕大多數實例顯示，同時從幾個不同的方向來防制 NOx，其效果要比僅選擇單一手段要好得多；尤其當必須符合比較嚴苛的規範時，這點更是明顯。當今的「低 NOx 燃燒」技術已可以符合 IMO 全球性之規則而不須額外增加耗油。至於區域性的 NOx 規定，則可藉以下作法達到：

1. 安裝由引擎控制，可暫時調整噴油正時之裝置；
2. 採用適於安裝在船上的噴水技術，可進一步降低 NOx；
3. 採用多年來已被廣泛應用在各種場合與各種燃料，而有卓越表現的 SCR 觸媒技術。

六、結論與建議

目前有關船舶大氣排放的規定和防制技術在國際間、各國國內、及各區域內都被廣泛地討論和研發。截至目前，用於美國的三個方案都還在爭議當中，而 NOx 限度之確切實施日期，測試程序，及採納的方案也因此都還不確定。而台灣地區源自船舶之空氣污染可以其占總污染量之比率得到初步了解。比較源自船舶空氣污染與其他來源之空氣污染及總污染量，可看出台灣地區源自船舶之空氣污染占總污染量之比率以 SOx 為最高（占 0.52%），其次依序為 NOx (0.13%)，粒狀物 (0.04%)，及碳氫化合物 (0.008%)。

總的來說，船舶大氣污染的防制之道在於盡可能預防它的生成，而非在其形成之後才設法除去它。絕大多數實例顯示，同時從幾個不同的方向來防制 NOx，其效果要比僅選擇單一手段要好得多；尤其當必須符合比較嚴苛的規範時，這點更是明顯。

與其他工業來源比起來，源自柴油引擎的 CO, CO₂, HC, SOx 及粒狀物等的排放程度還相當低。而當今的「低 NOx 燃燒」技術已可以符合 IMO 全球性之規則而

不須額外增加耗油。至於區域性的 NOx 規定，則可藉調整噴油正時、噴水技術、SCR 觸媒技術等方法達到。總的來說，船舶大氣污染的防制之道在於盡可能預防它的生成，而非在其形成之後才設法除去它。絕大多數實例顯示，同時從幾個不同的方向來防制 NOx，其效果要比僅選擇單一手段要好得多；尤其當必須符合比較嚴苛的規範時，這點更是明顯。當今的「低 NOx 燃燒」技術已可以符合 IMO 全球性之規則而不須額外增加耗油。至於區域性的 NOx 規定，則可藉調整噴油正時、噴水技術、SCR 觸媒技術等方法達到。目前相關技術尚處研發階段，其成效、使用壽命、提供情形及經濟成本等，都一直隨時間在變。當務之急在於一面獲取可達不同污染防制程度的技術組合，同時針對這些組合進行經濟分析與評估，使臻實用。

參考文獻

1. IMO, Marine Environment Protection Committee. Draft Protocol of 1997 to amend the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto, MEPC 38/9, London: IMO, 1995.
2. International Maritime Organization, Marine Environment Protection Committee. Marine Exhaust Emissions Research Programme. MEPC 36/Inf.16, 1996.
3. International Maritime Organization, Marine Environment Protection Committee, The Findings of a Research Project into Sulphur Dioxide Emission Reduction Scenarios. MEPC 36/9/6, 1994.
4. International Maritime Organization, Sub-committee on Bulk Chemicals, Marine Exhaust Emissions Research Programme: Phase II Transient Emission Trials. BCH 23/Inf.2, 1993.
5. International Maritime Organization, Sub-committee on Bulk Chemicals, Marine Exhaust Emissions Research Programme: Phase II Transient Emission Trials. BCH 23/7/1, 1993.

6. International Maritime Organization, Marine Environment Protection Committee, Marine Exhaust Emissions Research Programme: Steady State Operation. MEPC 30/Inf.29, 1990.
7. Lloyd's Register Engineering Services Group(LRESG), Study quantifies size of marine emission problem. Marine Propulsion, Aug. 1995:11-13.
8. Carlton, T.S., Wright, A. A. and Coker, R. J. Marine Exhaust Emissions -- A Regional Survey of the English Channel, Trans. I. Mar.E., Vol 106 Part 3, 1994.
9. Gehring, T. and S. Oberthur. Montreal Protocol: The Copenhagen Meeting. Environmental Policy and Law, 23(1):6-12, 1993.
10. 華 健, 海運之空氣污染防治, 船舶科技, 第二十期, pp.28-42, 1997。
11. TRC Environmental Consultants Inc., Ship Emissions Control Study for the Ports of Long Beach and Los Angeles. 1. Marine Vessel Emissions While Hotelling in Port. Mission Viejo, California, USA, 1989.
12. CIMAC. Notes on the proposed legislation relating to NO_x emissions from Ship exhaust stacks. London: CIMAC, 1993.
13. Kremer, H. Chemical and physical aspects of NO_x formation. In: Schneider, T. and L. Grant (eds.), Air Pollution by Nitrogen Oxides, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Co. pp. 97-107, 1982.
14. Kolle, L. Technology perspectives, reduction of emissions from heavy bunker fuels. Environment Northern Seas Conference Report. Volume 7, pp. 181-189, 1991.
15. Remenyi, K., Clean combustion utilizing fluidized-bed boilers. Combustion Efficiency and Air Quality, Eds. Hargittai, I and T. Vidsczy, Plenum Press, pp. 137-283, 1995.
16. Netherlands. Ministry of Health and Environmental Protection, Handbook of Emission Factors-Non-industrial Sources. The Hague, 1980.
17. Nriagu, J.O., Pacyna, J.M., Quantitative Assessment of Worldwide Contamination of Air, Water and Soil by Trace Metals. Nature, 338, 47-49, 1988.

90 船舶引擎排氣對空氣品質之影響

- 18.Nriagu, J.O., A Global Assessment of Natural Sources of Atmospheric Trace Metals. *Nature*, 333, 134-139, 1989.
- 19.United States Environmental Protection Agency, Emission Regulations for New Diesel Heavy Duty Engines, Gaseous Exhaust Test Procedures. US Code of Federal Regulations Part 86-79, Subpart D, 1979.
- 20.United States Environmental Protection Agency, Compilation of Air Pollutant Emission Factors.AP42. 4th Edition, 1985.
- 21.Admiralty Charts, The World Main Ocean Routes for Power Vessels, Chart 5307, Hydrographer of the Navy, Taunton, 1973.
- 22.Diesel Engine Manufacturer's Association. DEMA Exhaust Emission, measurement Procedure for Low and Medium Speed Internal Combustion Engines. Cleveland, Ohio, USA, 1994.
- 23.Lloyd's Register of Shipping. World Fleet Statistics Dec.1992. London: Lloyd's Register1993.
- 24.Lloyd's Register of Shipping, Register of Ships 1993. Lloyd's Register of Shipping, London, 1993.
- 25.港務局(基隆台中高雄花蓮蘇澳)1995 年船舶統計年報。
- 26.Melhus O, NOx Emission Factors from Marine Diesel Engines. EMEP Workshop on Emissions from Ships, Oslo, 7-8 June 1990.
- 27.MER, Clean emissions project sets ambitious targets. MER, April, 22-23, 1996.
- 28.International Standards Organization, Unofficial draft-ISO 8178-2 Reciprocating Internal Combustion Engines-Exhaust Emission Measurement, Part 2: measurement of Gaseous and Particulate Exhaust Emission at Site. International Standards Organization, Geneva, 1994.
- 29.Henningsen, S. and D. Tsalapatis, Emission control of two-stroke marine diesel engines. MAN B&W 20-1-94, 1994.