

二零一三年三月二十五日
討論文件

立法會環境事務委員會

提升本地船用輕柴油質素

目的

本文件就提升本地船用輕柴油質素以減少本地船舶廢氣排放的建議，徵詢委員意見。

背景

2. 船舶是香港最大的空氣污染源。在 2011 年，本地船舶及來往香港和內地的內河船舶的總排放量，佔所有船舶在香港境內排放的二氧化硫的 21%、可吸入懸浮粒子 32% 和氮氧化物 57%。本地船舶及內河船舶排放的污染物會影響沿海地區的居民。我們必須減少這些船舶排放，以更好保障市民健康。

3. 減低船用輕柴油含硫量能有效減少本地船舶排放的二氧化硫和可吸入懸浮粒子。為以身作則，政府船舶於 2001 年底開始全面使用超低硫柴油(含硫量上限 0.005%)，自 2009 年起進一步全面使用歐 V 柴油(含硫量上限 0.001%)。我們於 2010 年完成本地渡輪使用超低硫柴油的試驗計劃，儘管結論是轉用超低硫柴油技術上可行，但當時每公升燃料的成本卻增加 0.93 元(約 21%)，主要是由於要為數艘參加試驗的渡輪提供特別加油服務，因而需要額外的燃料處理成本。為免因只要求部分本地船舶使用清潔燃料而需額外燃料處理成本，並為了達致最大的環保效益，我們建議整體提升本地船用輕柴油質素。

可行性技術研究

4. 2012年5月，我們成立了提升船用輕柴油質素工作小組(工作小組)，成員包括本地船舶業界代表、相關政府部門代表和一位本地大學的船舶工程專家，研究通過把船用輕柴油含硫量上限由0.5%收緊至0.05%以提升船用輕柴油質素的技術可行性。含硫量上限0.05%的輕柴油(低硫柴油)在亞洲燃料市場是一個普及的柴油等級。為回應部分本地船舶業界對建議使用低硫柴油的關注 -- 即低硫柴油與船用發動機是否兼容，及相關的營運和維修成本的影響，工作小組同意測試兩款具代表性的發動機型號(吉拿和康明斯)使用低硫柴油的表現，以研究上述項目。

5. 我們委託香港大學進行此項技術研究。這兩台發動機接駁交流發電機以產生電力，並以電阻負載組改變額定功率輸出。研究分別以現時的高硫柴油(含硫量上限0.5%)和建議的低硫柴油運行發動機進行測試，評估發動機的性能及耐用性；前者包括最大輸出功率和在不同負載情況下的耗油量，後者包括燃油潤滑性能及噴咀和噴油泵損耗(在顯微鏡下觀察)；亦評估經過耐用性測試後機油特性的變化。研究在2013年1月完成，確認本地船舶使用低硫柴油技術上可行。研究的主要結果如下：

(a) 最大輸出功率

兩款發動機使用低硫柴油時，最大輸出功率能維持使用高硫柴油時的水平。吉拿發動機有輕微下降(平均-1.8%，幅度為-5.0%至+0.1%)；康明斯發動機則有輕微增加(平均+0.4%，幅度為-0.1%至+0.7%)。變化幅度非常小，並且在操作過程中不會輕易察覺到。

(b) 在穩定負載情況下的燃油消耗

測試結果顯示：使用低硫柴油時的燃油消耗率輕微增加。吉拿發動機平均增加1.1%，變化幅度為-1.3%至+2.9%；康明斯發動機平均增加1.3%，變化幅度為+0.8%至+2.1%。這測試結果與低硫柴油淨熱值略低的數據吻合。

(c) 在執行功率週期變化的燃油消耗

在執行功率週期變化的過程中，低硫柴油比高硫柴油的燃油消耗率有輕微變化。吉拿發動機的燃油消耗率平均增加 1.4%，變化幅度為+0.8%至+3.0%；康明斯發動機的燃油消耗率平均增加 1.3%，變化幅度為+1.2%至+1.5%。

(d) 磨損

燃油噴射器和燃油泵並無磨損。

(e) 機油(潤滑油)的消耗量和變壞

當發動機使用低硫柴油時，機油消耗量較少，總鹼值下降速度較慢，黏度上升速度亦較慢。這些改變顯示使用低硫柴油可減少營運成本，因為可減少添加和更換機油。

詳情可參考香港大學技術研究的行政摘要，載於附件。

營運成本的影響

6. 如香港全面提升本地船用輕柴油質素，將不會造成額外處理成本。因此，對燃料供應商而言，使用低硫柴油所增加的成本，很大機會只是低硫柴油與現時高硫柴油格價的差距。2012年1月至2013年2月的燃油價格數據顯示，兩種柴油的價格差距¹不多於每公升港幣七仙，即目前零售價(約每公升港幣7元)的百分之一。有油公司表示，根據過去兩個月這兩種柴油價的趨勢，差價應該會進一步收窄。此外，普氏能源資訊(一間十分著名的全球柴油市場價格評估供應商)表示，高硫柴油在亞洲市場的需求和供應一直下降，而低硫柴油的需求和供應則不斷上升。因此，我們預計高硫柴油和低硫柴油的價格差距會繼續收窄。另一方面，發動機使用低硫柴油可減少機油消耗量、減慢機油老化及改善發動機性能(因為相關的尾氣酸性較低和腐蝕性較

¹ 兩種柴油格價的差距是指在星加坡的離岸價格差別。離岸價格包括把燃料運送至星加坡港口、卸落油船及燃料物質的總成本。

弱)，可抵消部份成本增加。

環保效益

7. 船隻使用低硫柴油較使用高硫柴油(含硫量 0.5%)少排放 90%二氧化硫及 30%可吸入懸浮粒子。我們估計實施建議後，可減少 3,219 噸二氧化硫及 233 噸可吸入懸浮粒子排放；若以 2011 年為基準，香港來自船舶排放的二氧化硫及可吸入懸浮粒子排放可分別減少 19%和 10%。這減排成效可改善大氣的空氣質素及減低市民的健康風險，尤以沿海地區的改善更顯著。

建議

8. 我們跟隨國際慣例並參考油公司的做法，建議要求在香港市場銷售、供應或分發予本地船舶使用的燃料的含硫量不得超過 0.05%(按重量計算)；至於其他燃料參數，我們會採用相關的國際規格，即：

- (a) 國際標準組織 ISO 8217 的規格；或
- (b) 普氏能源^[2]的柴油規格，大部分本地油公司採購供應本地市場的船用輕柴油時，均採用這規格。

這兩套標準現時均為油公司採用。保留這兩套標準，可確保柴油含硫量收緊後供應本地船隻的柴油質素不變。船用輕柴油的商業交易活動如不涉及銷售、供應或分發(例如進口再轉口，或同一油公司內部貨物轉運)，將不受本建議的管制。現時，香港並沒有法例規管境內銷售船用輕柴油的質素。

9. 我們亦建議參考《空氣污染管制(汽車燃料)規例》(第 311L 章)的規定和安排，就違反規定的情況制訂違例及罰則制度。

² ISO 8217 是指國際標準組織 8217 規格表格一內 DMA 級的油品。普氏能源規格是指普氏能源發行的亞洲區油品規格和訂定方法指南中為含硫量 0.05%的新加坡離岸的柴油。

諮詢

10. 我們已就建議諮詢相關業界(包括船舶營運者和油公司)，當擬定上述建議時已參考他們的意見。油公司已確認能夠供應符合建議規格的船用輕柴油，並將會作出準備以配合建議的實施時間表。船舶營運者同意技術測試的結果和結論，但關注使用低硫柴油可能引致額外成本。有些營運者認為即使兩種油品(低硫柴油和高硫柴油)進口價格差距非常小，但現時零售差價可能為每公升 1 元。有些營運者提出以下建議：

- (一) 政府應確保油公司不會在引入低硫柴油後提高價格。如價格調整不能避免，幅度不應超過低硫和高硫兩種柴油的進口差價；
- (二) 政府應考慮開放油品供應市場，以促進更大的市場競爭，從而令油價處於更合理水平；
- (三) 由於更換引擎有助進一步減少其他空氣污染物排放，因此政府亦應考慮這措施並向業界提供充足資助。

11. 香港是自由經濟市場，油公司釐定油品價格時會參考市場情況(包括國際油價變動)。由於全面提升柴油質素的建議不會引致額外的燃料處理成本，因此，我們預期兩種油品的實際差價基本上應與進口差價一樣。現時，許多沿海地區建有不少住宅發展，提升柴油質素能即時對沿海地區的空氣質素帶來很大效益。

12. 我們將於 2013 年 4 月就有關建議諮詢環境諮詢委員會。另外，為幫助本地船舶營運者和燃料供應商更了解我們建議的實施計劃，我們將會繼續為他們安排簡報及討論。

立法時間表

13. 若獲得環境事務委員會和環境諮詢委員會的支持，我

們希望可於 2013 年年底前提交新規例予立法會審閱，目標是於 2014 年實施管制要求。

徵詢意見

14. 現就以上 8 至 9 段的管制建議徵詢議員意見。

環境保護署
二零一三年三月

The University of Hong Kong

香港大學



在實驗室環境下輪船發動機測試
行政摘要

提交： 香港特區政府環境保護署

編寫： 香港大學機械工程系
梁耀彰教授及鄭永權工程師

日期：2013年3月14日

行政摘要

背景

過去數十年，船舶空氣污染物排放持續增加，現已成為香港二氧化硫、可吸入懸浮粒子和氮氧化物排放源之首。香港特區政府已研究如何減少船舶排放，其中一個方法是改善本地供應的船用柴油質素，以減少本地和內河船舶的廢氣排放。香港特區政府環境保護署(環保署)建議把船用輕質柴油的含硫量上限由 0.5%降低至 0.05%，這可使個別船隻的二氧化硫和可吸入懸浮粒子排放量分別減少約 90%及 30%。環保署於二零一二年五月成立了一個工作小組，成員包括來自多個政府部門的官員、本地船舶營運商代表和學術界專家。工作小組成員在第一次和第二次會議上同意對兩款使用高硫柴油(按重量計最高含硫量為 0.5%)和低硫柴油(按重量計最高含硫量為 0.05%)的常用輪船用發動機進行測試，以確定低硫柴油與現有船隻發動機是否兼容及其性能。

環保署在二零一二年七月委託香港大學機械工程系進行一項名為「在實驗室環境下輪船發動機測試」的研究，以回應工作小組成員的要求。該項研究採用度身訂造的實驗室儀器，以評估兩款輪船用柴油發動機在不同模擬運作環境下的性能表現。工作小組已於二零一二年六月五日舉行的第二次會議上確認性能測試及耐用性測試的方法。吉拿 6LXB 發動機測試所得的初步結果已在二零一三年一月提交之中期報告敘述。本最後報告詳述吉拿 6LXB 及康明斯 NTA855(M)發動機所得的測試結果。

測試目標和範圍

- (1) 在實驗室控制環境下，向兩款輪船用發動機在使用低硫柴油下進行測試，以評估其：
 - (a) 性能，包括發動機最高馬力輸出和在各種負載情況下的耗油量；以及
 - (b) 耐用性，包括燃油潤滑性能和與發動機是否兼容，即根據量度的燃油潤滑性、噴咀和噴油泵在顯微鏡下的觀察及機油分析；
- (2) 對高硫柴油進行相同測試，作為與低硫柴油比較的基準。

結果

A. 吉拿發動機

(1) 柴油燃料分析

這次測試所使用的高硫柴油和歐盟 V 期柴油(按重量計最高含硫量為百萬份之十)都是由政府指定的燃料供應商所提供。低硫柴油則是用十份(體積)歐盟五期柴油和一份(體積)高硫柴油混合而成。除燃料供應商定期提供高硫柴油及歐盟 V 期柴油的品質證明書外，高硫柴油及低硫柴油的物理特性亦會送交獨立化驗所再次進行分析，以確保測試之柴油質素符合規格。透過分別兩次分析測試的結果顯示，低硫柴油比高硫柴油的淨熱值分別只少 1.6%和 2.2%。

(2) 性能測試

(a) 發動機最大功率

測定發動機使用高硫柴油和低硫柴油對最大功率輸出，本次測試包括以下四種情況：高硫柴油耐用性測試前（基準 1）、高硫柴油耐用性測試後、低硫柴油耐用性測試前（基準 2）及低硫柴油耐用性測試後，結果顯示：

| 最大功率輸出 | 基準 1 | 200 小時後 (高硫柴油- 耐用性測試) | 基準 2 | 200 小時後 (低硫柴油- 耐用性測試) | 整體 平均值 |
|-----------|-------|-----------------------------|-------|-----------------------------|-----------|
| 高硫柴油 (千瓦) | 106.2 | 116.3 | 115.3 | 117.7 | 113.9 |
| 低硫柴油 (千瓦) | 104.9 | 115.0 | 109.5 | 117.8 | 111.8 |
| 相差百分比 | -1.3% | -1.1% | -5.0% | +0.1% | -1.8% |

上述測試結果顯示低硫柴油對比高硫柴油的最高功率輸出數值變化範圍在+0.1%到-5.0%之間，平均比高硫柴油低 1.8%。這下降幅度與兩種柴油淨熱值的差額接近(低硫柴油的淨熱值比高硫柴油平均低(1.9%)。

(b) 燃油消耗率

此測試利用六種不同的發動機負載情況以計量每種情況的燃油消耗率，分別為 100%（即 89 千瓦），85%，75%，50%，25%的額定負載模式和從 83%至 87%的功率週期變化。同時，燃油消耗率測試會在三個不同階段進行：包括基準、已完成 200 小時耐用性測試後但沒有更換機油、以及在已完成 200 小時耐用性測試後並已更換機油。下面的表格紀錄高硫柴油和低硫柴油在不同測試階段和負載條件的相對比較值。

| 高硫柴油耐用性測試 低硫柴油對比高硫柴油 | 基準 1 | 200 小時後 | 200 小時及更 換機油後 | 平均值 |
|-------------------------|-------|------------|------------------|-------|
| 發動機負載情況 | | | | |
| 100% | -1.3% | +0.7% | +1.4% | -0.1% |
| 85% | +0.1% | +0.6% | +0.9% | +0.4% |
| 75% | +1.2% | +0.6% | +1.1% | +1.0% |
| 50% | -0.3% | +1.9% | +1.2% | +0.6% |
| 25% | -1.0% | +2.0% | +1.2% | +0.3% |
| 功率週期變化(83% ~ 87%負載) | +0.9% | +1.0% | +1.3% | +1.0% |
| | | | 整體平均值： | +0.5% |

| 低硫柴油耐用性測試 低硫柴油對比高硫柴油 | 基準 2 | 200 小時後 | 200 小時及更 換機油後 | 平均值 |
|-------------------------|-------|------------|------------------|-------|
| 發動機負載情況 | | | | |
| 100% | +1.1% | +2.6% | +2.9% | +1.9% |

| | | | | |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|
| 85% | +1.2% | +2.7% | +2.6% | +1.9% |
| 75% | +1.1% | +2.6% | +2.5% | +1.8% |
| 50% | +1.1% | +1.9% | +2.0% | +1.5% |
| 25% | +0.6% | +1.3% | +1.6% | +1.0% |
| 功率週期變化(83% ~ 87% 負載) | +0.8% | +2.7% | +3.0% | +1.8% |
| 整體平均值： | | | | +1.7% |

在高硫柴油耐用性測試前(基準 1)和 200 小時之後，低硫柴油於不同負載情況下的平均燃油消耗由-0.1%至+1.0%不等，整體平均值為+0.5%。同樣，在低硫柴油耐用性測試前(基準 2)和 200 小時之後，低硫柴油於不同負載情況下的平均燃油消耗率與高硫柴油相差由+1.0%至+1.9%不等，整體平均值為+1.7%。可見低硫柴油的平均燃油消耗率曾有輕微增加，符合上文提及低硫柴油與高硫柴油在不同時段之淨熱值差額變化(由 1.6%至 2.2%)。

(3) 耐用性試驗

(a) 基本操作數據

耐用性測試先在保持運行 200 小時及恆常功率輸出 68 千瓦時之耐用性測試其間，高硫柴油和低硫柴油分別需要添加 33.5 和 23.0 公升發動機機油以補充消耗。這顯示耐用性測試耗用大量機油，尤其在最初測試高硫柴油時。高硫柴油和低硫柴油的耐用性測試可以相差 10.5 公升。兩者的機油耗用量有如此大之差距，原因可能是：

- (i) 在高硫柴油耐用性測試初期發生機油滲漏情況及補充機油時的管理方法不完善；
- (ii) 發動機在大修後需時以令機件運行暢順，這效果對高硫柴油的影響較大；
- (iii) 使用低硫柴油的自然結果。一些研究人員發現，在燃燒過程中低硫柴油會產生較少的二氧化硫，繼而減少可能轉化為硫酸的機會。這可避免發生氣缸表面點蝕和影響氣缸表面的光潔度的機會，從而減少發動機機油的消耗量。

(b) 燃油噴射器試驗

在使用兩種燃油作耐用性測試前和後都會分別測試全部燃油噴射器的噴油壓力，透過檢查有關壓力值及燃油霧化狀態，以測定燃油噴射器在耐用性測試期間是否運作正常。根據測試結果顯示，無論是高硫柴油或低硫柴油耐用性測試，各噴射器的噴射壓力均符合吉拿操作及維修手冊中的廠方規定。同時，全部 6 個噴射器的噴灑霧化模式均屬於理想範圍。這顯示燃油噴射器在完成耐用性測試後仍然運作正常。

(c) 噴油泵試驗

燃油噴射泵在高硫柴油和低硫柴油耐用性測試之前和之後都會安排進行測試。以測量噴射泵的最高設定和以每分鐘 600 圈轉動速度時運行 200 衝程的燃油輸送量。測試方法以標準噴油泵測試設備量度，並以肉眼觀察及人手記錄。測試結果的誤差為±0.2 立方厘米，並未超出測試設備的不確定性與人為錯誤的綜合誤差範圍。

以上高硫柴油和低硫柴油的耐用性測試結果，符合泵柱塞及噴咀在掃瞄及低功率電子

顯微鏡下的觀察及燃油潤滑性遠低於 460 微米的測量結果。

(d) 機油分析

在耐用性測試開始(0 小時)及其後 100 和 200 小時，分別抽取了機油樣本，以進行化學成份分析。高硫柴油和低硫柴油在耐用性測試前及後之分析結果如下：

| 高硫柴油耐用性測試 測試參數 | 規格 | 0 小時 | 100 小時 | 200 小時 | 變化(200 小 時-0 小時) |
|-------------------------------------|------|---------|-----------|-----------|---------------------|
| 黏性，cSt 在 100°C 下 | 14.1 | 14.0 | 14.2 | 14.7 | +0.7 |
| 總鹼值(毫克 氫氧化鉀/克) | 10.1 | 9.2 | 8.0 | 7.8 | -1.4 |
| 磨損金屬元素 (ppm)：少於 4ppm 的銀、鉬、鎳和錫並無顯示出來 | | | | | |
| 鋁 | 0 | 3 | 5 | 5 | +2 |
| 鉻 | 0 | 7 | 18 | 22 | +15 |
| 銅 | 0 | 5 | 9 | 9 | +4 |
| 鐵 | 0 | 18 | 19 | 19 | +1 |
| 鉛 | 0 | 2 | 4 | 5 | +3 |

| 低硫柴油耐用性測試 測試參數 | 規格 | 0 小時 | 100 小時 | 200 小時 | 變化(200 小 時-0 小時) |
|-------------------------------------|------|---------|-----------|-----------|---------------------|
| 黏性，cSt 在 100°C 下 | 14.1 | 14.1 | 14.3 | 14.6 | +0.5 |
| 總鹼值(毫克 氫氧化鉀/克) | 10.1 | 8.8 | 8.3 | 8.7 | -0.1 |
| 磨損金屬元素 (ppm)：少於 4ppm 的銀、鉬、鎳和錫並無顯示出來 | | | | | |
| 鋁 | 0 | 1 | 3 | 4 | +3 |
| 鉻 | 0 | 2 | 13 | 18 | +16 |
| 銅 | 0 | 1 | 3 | 5 | +4 |
| 鐵 | 0 | 4 | 11 | 16 | +12 |
| 鉛 | 0 | 1 | 2 | 3 | +2 |

以下是從分析機油而有的觀察：

(i) 黏性

黏性在 200 小時的耐用性測試中有所增加，高硫柴油和低硫柴油的黏性增幅分別是 5.0% 及 3.5%。這意味著高硫柴油對黏性增加速度比低硫柴油的高。

(ii) 總鹼值

在 200 小時的測試期間，高硫柴油的總鹼值錄得相當大的跌幅(15%)，但低硫柴油的總

鹼值只微降 1%。一個合理的解釋是透過補充機油能提供額外的添加劑量，足以抵銷在燃燒低硫柴油過程中產生的硫酸(數量遠少於燃燒高硫柴油時產生的硫酸)所消耗的劑量。然而，高硫柴油和低硫柴油的 200 小時總鹼值仍屬正常範圍之內。據該機油製造商表示，當總鹼值下跌至低於原來數值的一半，機油便須更換。由於低硫柴油的總鹼值耗損率較低，可減少更換機油的次數，因此可能有利於發動機運作。而低硫柴油的好處因其消耗較少機油而進一步提高。

(iii) 金屬元素分析

由於發動機磨損，機油在 200 小時測試期間的金屬濃度普遍增加。除了低硫柴油的鐵濃度較高外，高硫柴油和低硫柴油因磨損而產生的遞增金屬濃度大致相若。

(e) 掃描電子顯微鏡檢查

為研究燃油流量會否造成磨損/撕裂，吉拿發動機的燃油噴射器和燃油泵組(可能因燃油潤滑能力不足而出現磨損)的所有部件均是全新購置及通過檢查的。這些部件包括噴咀、空心活塞閥、泵柱塞和出油閥，全部先在進行耐用性測試前接受檢查，作為基準，然後在進行兩次耐用性測試後從發動機和燃油泵拆除出來，重新接受檢查。

從已拍攝的電子顯微鏡照片可見，在使用高硫柴油和低硫柴油的兩種情況下，噴咀的形狀和大小在進行 200 小時的耐用性測試後均保持不變。高硫柴油和低硫柴油的噴咀內發現了一些沉積物，經鑑定後證實大部分是碳和氧，可能來自未燃燒的燃油。總的來說，根據掃描電子顯微鏡觀察所得，在使用高硫柴油和低硫柴油的兩種情況下，均沒有發現發動機部件出現異常磨損情況。

(f) 低功率電子顯微鏡分析

計量泵柱塞和燃料噴射器柱塞的表面光滑度在進行測試之前和之後都進行了比較。顯微鏡檢查發現，金屬表面並沒有因為使用高硫柴油或低硫柴油後出現任何顯著變化。同時，兩個測試都沒有觀察到有磨損/撕裂的情況。

B. 康明斯發動機

(1) 柴油燃料分析

由獨立化驗所檢驗的高硫柴油及低硫柴油樣本，符合燃料供應商的品質證明書內數據。兩個批次樣本的低硫柴油淨熱值比高硫柴油分別少 1.5% 和 2.2%。平均下降值為 1.8%。

(2) 性能測試

(a) 發動機最高功率

下面的表格總結了發動機使用高硫柴油和低硫柴油的最大功率輸出值及變化：

| 最高功率輸出 | 基準 1 | 200 小時後 (高硫柴油- 耐用性測試) | 基準 2 | 200 小時後 (低硫柴油- 耐用性測試) | 整體 平均值 |
|--------|------|-----------------------------|------|-----------------------------|-----------|
| | | | | | |

| | | | | | |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 高硫柴油 (千瓦) | 300.7 | 301.2 | 290.2 | 292.6 | 296.4 |
| 低硫柴油 (千瓦) | 302.7 | 303.0 | 289.9 | 293.2 | 297.5 |
| 相差百分比 | +0.7% | +0.6% | -0.1% | +0.2% | +0.4% |

低硫柴油的淨熱值雖然有輕微下降，測試結果顯示使用低硫柴油發動機的最大功率出現輕微增加，改變幅度由+0.7%至-0.1%不等，整體平均值為+0.4%。

(b) 燃油消耗率

燃油消耗率測試使用六種不同的發動機負載情況，分別為 100% (即 196 千瓦)，85%，75%，50%，25% 的額定負載模式和從 83% 至 87% 的功率週期變化，並在三個不同階段進行：包括基準、已完成 200 小時耐用性測試後但沒有更換機油、以及在已完成 200 小時耐用性測試後並已更換機油。下面的表格紀錄高硫柴油和低硫柴油在不同測試階段和負載條件的相對比較值。

| 高硫柴油耐用性測試 低硫柴油對比高硫柴油 | 基準 1 | 200 小時後 | 200 小時及更 換機油後 | 平均值 |
|-------------------------|-------|------------|------------------|-------|
| 發動機負載情況 | | | | |
| 100% | +1.0% | +1.2% | +0.8% | +1.0% |
| 85% | +1.6% | +1.5% | +1.6% | +1.6% |
| 75% | +1.6% | +1.4% | +1.5% | +1.5% |
| 50% | +1.2% | +1.3% | +1.3% | +1.3% |
| 25% | +1.4% | +1.3% | +1.1% | +1.3% |
| 功率週期變化(83% ~ 87% 負載) | +1.4% | +1.5% | +1.2% | +1.3% |
| 整體平均值： | | | | +1.3% |

| 低硫柴油耐用性測試 低硫柴油對比高硫柴油 | 基準 2 | 200 小時後 | 200 小時及更 換機油後 | 平均值 |
|-------------------------|------|------------|------------------|-------|
| 發動機負載情況 | | | | |
| 100% | +1.4 | +1.7 | +1.7 | +1.5 |
| 85% | +1.2 | +2.0 | +1.9 | +1.6 |
| 75% | +0.8 | +2.1 | +1.9 | +1.4 |
| 50% | +1.0 | +2.1 | +1.9 | +1.5 |
| 25% | +0.9 | +1.6 | +1.9 | +1.4 |
| 功率週期變化(83% ~ 87% 負載) | +1.2 | +1.4 | +1.5 | +1.3 |
| 整體平均值： | | | | +1.4% |

所有燃油消耗率結果都是正常及符合發動機廠方的工作範圍。比較結果顯示在 200 小時運作後更換機油對燃油消耗率沒有明顯影響，這結果與吉拿發動機測試結果相同。

在高硫柴油耐用性測試前(基準 1)和 200 小時之後，低硫柴油於不同負載情況下的平均

燃油消耗率變化由+1.0%至+1.6%不等，整體平均變化值為+1.3%。同時，在低硫柴油耐用性測試前(基準 2)和 200 小時之後，低硫柴油於不同負載情況下的平均燃油消耗率與高硫柴油相差由+1.3%至+1.6%不等，整體平均值為+1.4%。這些輕微變化(上升 1.3%至 1.4%)符合在柴油燃料分析中提到的低硫柴油與高硫柴油之淨熱值差額變化(-1.8%)。

(3) 耐用性試驗

(a) 基本操作數據

耐用性測試先高硫柴油後低硫柴油，以恆常功率輸出 186 千瓦和保持運行 200 小時的過程中，並不需要補充發動機機油。這結果與吉拿發動機測試不同。

(b) 燃油噴油器試驗

測試結果顯示在兩種耐用性測試之前和後，全部 6 個噴射器的噴射壓力和噴灑霧化模式都符合康明斯操作及維修手冊中的廠方規定，這顯示燃油噴射器在完成兩種耐用性測試後仍然運作正常。

(c) 燃油計量泵檢查：

燃油計量泵在執行高硫柴油和低硫柴油耐用性測試之前和之後都會安排進行測試。所有的變化幅度都在±3%以內，屬於測試設備的不確定性和人為錯誤的範圍。總括而言，計量泵通過高硫柴油和低硫柴油耐用性測試之後都沒有顯著變化。

以上高硫柴油和低硫柴油的耐用性測試結果，符合噴咀、計量泵柱塞和燃料噴射器柱塞在掃描及低功率電子顯微鏡下的觀察，及燃油潤滑性遠低於 460 微米的測量結果。

(d) 機油分析

在耐用性測試開始(0 小時)及其後 100 和 200 小時，分別抽取了機油樣本，以進行化學成份分析。高硫柴油和低硫柴油在耐用性測試前及後之分析結果如下：

| 高硫柴油耐用性測試 測試參數 | 規格 | 0 小時 | 100 小時 | 200 小時 | 變化(200 小 時-0 小時) |
|-------------------------------------|------|---------|-----------|-----------|---------------------|
| 黏性，cSt 在 100°C 下 | 15.5 | 14.9 | 14.7 | 15.3 | +0.4 |
| 總鹼值(毫克 氫氧化鉀/克) | 10 | 11.2 | 10.7 | 10.4 | -0.8 |
| 磨損金屬元素 (ppm)：少於 4ppm 的銀、鉬、鎳和錫並無顯示出來 | | | | | |
| 鋁 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 鉻 | 0 | 0 | 0 | 1 | +1 |
| 銅 | 0 | 1 | 3 | 5 | +4 |
| 鐵 | 0 | 3 | 17 | 27 | +24 |
| 鉛 | 0 | 0 | 0 | 2 | +2 |

| 低硫柴油耐用性測試 測試參數 | 規格 | 0 小時 | 100 小時 | 200 小時 | 變化(200 小 時-0 小時) |
|-------------------------------------|------|---------|-----------|-----------|---------------------|
| 黏性，cSt 在 100°C 下 | 15.5 | 15.0 | 14.8 | 15.2 | +0.2 |
| 總鹼值(毫克 氫氧化鉀/克) | 10 | 11.4 | 11.5 | 11.6 | +0.2 |
| 磨損金屬元素 (ppm)：少於 4ppm 的銀、鉬、鎳和錫並無顯示出來 | | | | | |
| 鋁 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 鉻 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 銅 | 0 | 0 | 1 | 2 | +2 |
| 鐵 | 0 | 2 | 12 | 18 | +16 |
| 鉛 | 0 | 0 | 0 | 1 | +1 |

以下是從分析機油而得到的觀察結果：

(i) 黏性

黏性在 200 小時的耐用性測試中有所增加，高硫柴油和低硫柴油的黏性增幅分別是 2.7% 及 1.3%。這意味著高硫柴油對黏性增加速度相對比低硫柴油的高。

(ii) 總鹼值

在 200 小時的測試期間，高硫柴油的總鹼值錄得相當大的跌幅(7.1%)，但低硫柴油的總鹼值卻可以保持(+1.8%)。然而，高硫柴油和低硫柴油的 200 小時總鹼值仍屬正常範圍之內。正如上文所述，當總鹼值下跌至低於原來數值的一半時機油才需要更換。由於低硫柴油能維持總鹼值，可減少更換機油的次數，因此可能有利發動機運作。減少更換機油次數也需視乎黏性增加速度，從上述(i)可見低硫柴油可使機油黏性增加速度減慢，因此低硫柴油的好處應可進一步增大。

(iii) 金屬元素分析

由於發動機磨損，機油在 200 小時測試期間的金屬濃度普遍增加。除了高硫柴油的鐵濃度較高外，高硫柴油和低硫柴油因磨損而產生的遞增金屬濃度大致相若。

(e) 掃描電子顯微鏡檢查

從已拍攝的電子顯微鏡照片可見，在使用高硫柴油和低硫柴油的兩種情況下，噴咀的形狀和大小在進行 200 小時的耐用性測試後均保持不變。高硫柴油和低硫柴油的噴咀內發現了一些沉積物，經鑑定後證實大部分是碳和氧，可能來自未燃燒的燃油。總的來說，根據掃描電子顯微鏡觀察所得，在使用高硫柴油和低硫柴油的兩種情況下，均沒有發現發動機部件出現異常磨損情況。

(f) 低功率電子顯微鏡分析

計量泵柱塞和燃料噴射器柱塞的表面光滑度在進行測試之前和之後都進行了比較。顯微鏡檢查發現，金屬表面並沒有因為使用高硫柴油或低硫柴油後出現任何顯著變化。

同時，兩個測試都沒有觀察到有磨損/撕裂的情況。

結論

- (a) 當使用低硫柴油時，吉拿和康明斯發動機的最大輸出功率與使用高硫柴油時相近。吉拿發動機有輕微的下降（由+0.1% 至 -5%，平均 -1.8%）而康明斯發動機則有輕微增加（由-0.1% 至 +0.7%，平均+0.4%）。然而，這些變化都是非常少，並且在實際操作過程中不會輕易被察覺到。
- (b) 測試結果顯示低硫柴油的燃油消耗率與高硫柴油比較有少幅增加，吉拿發動機和康明斯發動機的變化幅度分別為-1.3% 至 +2.9%，平均 +1.1%和 +0.8% 至 +2.1%，平均 +1.4%，這結果符合低硫柴油的淨熱值有少幅減少。
- (c) 在執行功率週期變化的過程中，低硫柴油比高硫柴油的燃油消耗率有輕微變化。吉拿發動機和康明斯發動機的燃油消耗率的變化幅度分別為 +0.8% 至 +3.0%，平均 +1.4%和 +1.2% 至 +1.5%，平均 1.3%。
- (d) 最大功率測試和燃油消耗率的估計誤差值分別是±4.4%和±1.7%，這顯示測試在準確度高的情況下進行。
- (e) 吉拿和康明斯發動機完成 200 小時耐用性試驗後，燃油噴射器和燃油泵內的相關零件都已進行掃描和低功率電子顯微鏡分析，顯示兩種燃油都沒有引致不正常的磨損。
- (f) 機油特性化驗分析結果表明由高硫柴油切換到低硫柴油後可以獲得以下效益：總鹼值下降速度較慢，和黏性上升速度減少。但金屬元素卻沒有顯著的變化。
- (g) 吉拿發動機使用低硫柴油後可以減少機油消耗量，但康明斯發動機測試結果並沒有明顯的變化。
- (h) 從機油消耗量和化學分析等所得到的觀察結果，符合美國環保局聲稱轉用低硫柴油比使用高硫柴油可以獲得的好處。