

車用熱電廢熱回收技術

Thermoelectric Waste Heat Recovery Technology for Automotive

劉君愷 C. K. Liu¹、陳堯舜 Y. S. Chen²、戴明吉 M. J. Dai³、
韓偉國 W. K. Han²、廖莉菱 L. L. Liao⁴

工研院電光所(EOL/ITRI) ¹專案經理、²工程師、³資深工程師、⁴副工程師

汽車及工廠產生的廢熱占能源消耗的60%以上，而產生的大量廢熱對於CO₂的排放及能源的損耗造成非常嚴重的問題。熱電技術具有無動件、可靠度高、體積小等優點，近幾年熱電材料特性不斷提升，因此受到國際的重視。本文由系統及模組層級分析車用熱電廢熱回收技術之發展及應用。

For automotive and industry, more than 60% of energy converts to waste heat. The huge amount of waste heat of automotive and industry leads to the serious issues about CO₂ emission and damage to the environment. Thermoelectric generators have the advantages of no moving parts, high reliability, and small volume. Because of the improvement of thermoelectric material, thermoelectric applications for automotive has been received much attention in worldwide. This article introduces the development and applications of the thermoelectric waste heat recovery technology in module and system levels.

關鍵詞/Key Words

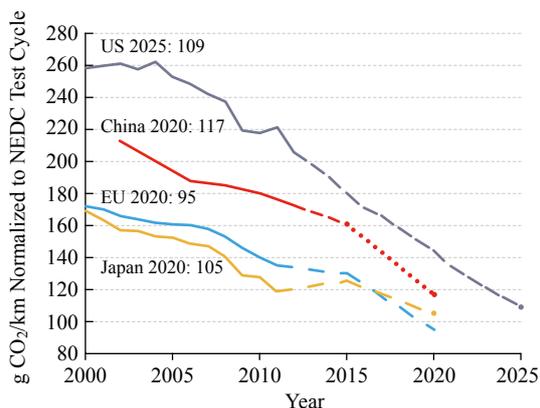
熱電發電(Thermoelectric Generator)、擴散阻障(Diffusion Barrier)、自組裝(Self-assembly)

前言

CO₂ 是全球溫室效應的主因，而汽車及工廠廢氣是CO₂排放的重要元兇。2009年哥本哈根會議對地球暖化溫度上限設定在不能高於2°C，且管制對象將下放至工廠及車廠等業界；節能減碳已不再只是環保概念，而關係著更巨大的利益，降低CO₂排放及能源需求已是全球共同關切的課題。汽車及工廠產生的廢熱占能源消耗的60%以上，而產生的大量廢熱對於CO₂的排放及能源的損耗造成非常嚴重的問題。以美國為例，汽車廢氣約占其國內20%的CO₂

排放及全球5%的CO₂排放。目前全球汽車CO₂排放量規格越趨緊縮，歐盟管制CO₂排放量在2015年時每台車為120 g/km，至2020年時應降低至95 g/km，而日本及中國也提出逐年下降之標準，如圖一所示，這些趨勢對產業造成衝擊並開始尋求新的技術。另一方面，全球石油存量有限，過度開採已造成國際能源問題，汽油價格長期也呈上漲趨勢，將對未來生活造成影響，而汽車節能減碳是目前迫切的技術。

就汽車能源轉換結構來看，汽車引擎動力所用的能量小於輸入燃油能源的20%，大於60%的能源成為損失而以廢熱形式排

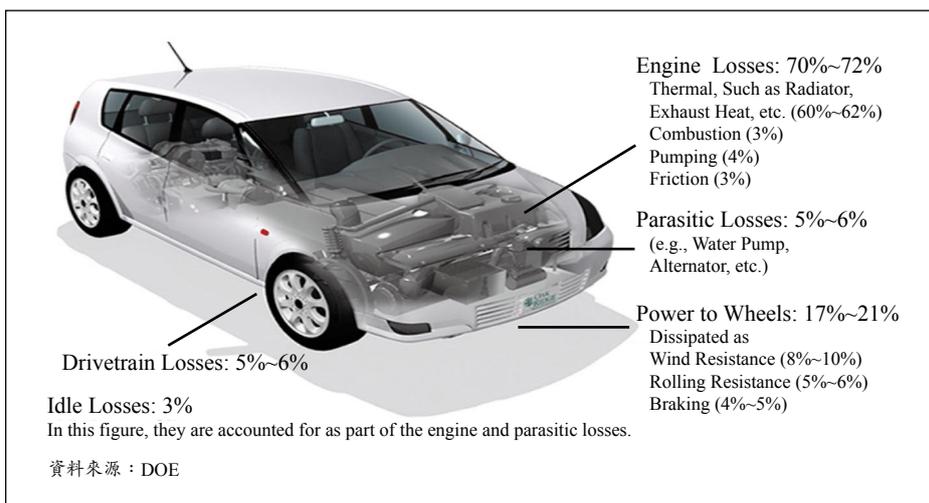


資料來源：Infineon

▲圖一 全球汽車CO₂排放減量趨勢

出，汽車廢能源再生的利用對於汽車能源應用非常重要。圖二是車輛能源分布，說明車輛中各部分的能源應用及損耗比例，其中以引擎的排氣廢熱損耗最高，在高速公路模式下動力輸出較市區模式高而廢熱排放也相對較高。目前這些損耗能源的再利用受到重視，包括剎車能源回收及引擎進氣溫度提升(EGR)等方式都已積極應用於汽車能源再生，但回收比例還很低，因此引擎廢熱利用熱電技術直接發電的應用對於汽車能源再生非常重要。汽車熱量超過

►圖二
汽車能源應用及
消耗比例



10 kW，溫度高達500°C以上，而所造成的CO₂等廢氣排放更是溫室效應的元兇，預估每公升汽油可產生2.36公斤CO₂排放，如能將廢熱轉為再生能源，不但可節省燃油消耗，更可降低碳排放。

熱電技術具有無動件、可靠度高、可直接轉換熱能成為電能等優點，尤其近幾年熱電材料特性不斷提升，因此受到國際的重視。和其他如太陽能等再生能源相比，可在小的面積產生較大的功率輸出，並能在持續熱源下持續發電，熱電技術也成為車廠的節能方向。

以汽車應用而言，由於觸媒轉換器後的排氣管溫度範圍可配合目前熱電材料需求，對整車的性能影響也較低，因此是應用重點。此階段引擎排氣溫度可達600°C，約排放出十多千瓦的熱能。利用排氣廢熱提供熱電溫差發電，每台車約能產生數百瓦的電力，並降低CO₂排放。美國能源部(Department of Energy; DOE)預估熱電發電可提升3~5%的燃油效率。

國際車用熱電技術發展

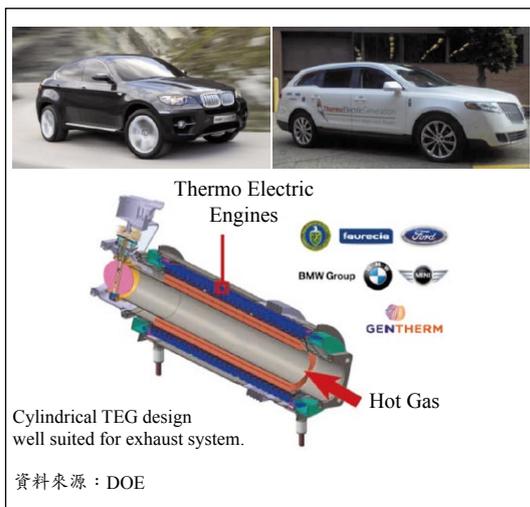
美國Hi-Z公司是最早成功將熱電發

電模組應用於汽車廢熱回收的公司，利用 Bi_2Te_3 的塊材元件，應用於重型柴油引擎，發電量可達1 kW。各大車廠和研究單位或 TEG 模組廠商合作，投入相當多的資源進行研究，美國是由DOE及NSF共同支持計畫開發，包括以GM、Ford以及NASA為首的三個技術團隊，結合Michigan State University、MIT及RTI、ORNL等研究單位。在材料、模組及系統應用等技術上開發較早，且有顯著成果。BMW則和熱電模組廠商BSST公司合作，第一代系統採橫向Y型模組，發電量達300W，GENTHERM公司利用橫向Y型模組開發出新一代圓形排氣管系統，利用Y型熱電模組安裝於圓形排氣管上並結合可降低溫度之旁通設計，發電量可達500~700W，並與BMW及Ford等廠商合作系統應用，如圖三所示。美國GM公司則採矩形排氣管系統設計，利用低溫及中溫熱電材料開發出功率輸出550W的廢熱發電系統。歐洲除了BMW，歐盟HeatReCar也計劃結合Bosch等廠商進行開發，系統測試具有220W之效能，如圖四所示。日本NEDO計

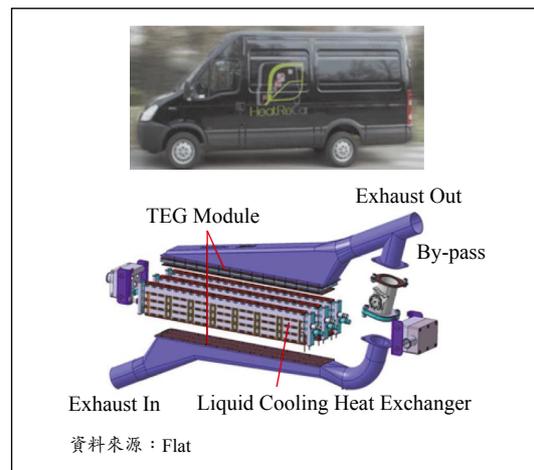
畫進行熱電模組材料及應用技術開發，各車廠如TOYOTA、HONDA等也都有相關技術及專利。而近來中國、南韓政府及車廠也都積極投入資源進行研究。

車用熱電模組封裝技術

熱電材料技術的發展在一些文獻中有詳細介紹⁽¹⁻⁴⁾，本文中將針對熱電模組及系統技術說明。車用熱電系統設計可分成模組、熱交換器及排氣管結構，如圖五所示。車用熱電模組設計的重點是功率輸出、價格及熱應力問題。熱交換器結構位於熱電模組兩端，分成接近排氣管的熱端及模組背面的冷端，熱端設計重點在如何由排氣管中擷取熱量，是系統設計的核心，冷端熱交換器則須將熱電模組冷端的熱帶走。熱電模組效能主要是以發電效率來看， $\eta = W_{\text{out}}/Q_{\text{in}}$ ，其中 W_{out} = 輸出功率， Q_{in} = 輸入熱量，熱電模組效率和材料特性ZT值及操作溫度有關。車用熱電模組的理想效率在 $ZT = 1$ ，模組低溫端 100°C /高溫端 500°C 時，約可達13%，但由於材料性質變化、不



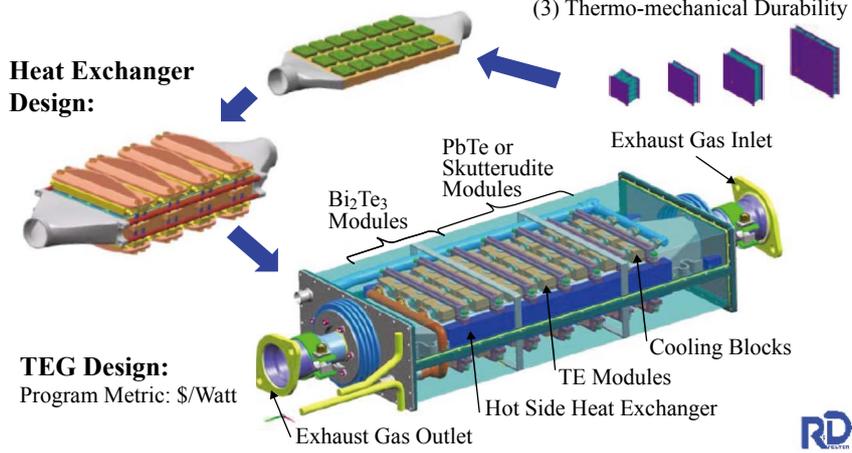
▲圖三 BMW及Ford熱電廢熱回收應用



▲圖四 EU HeatReCar計劃開發之熱電廢熱回收系統

Subsystems Modeling and Design

TE Module Design:
Identify primary module design variables
Examine Effect on primary output variables:
(1) Power Output
(2) Cost
(3) Thermo-mechanical Durability



資料來源：GM

▲圖五 熱電系統構裝應用設計

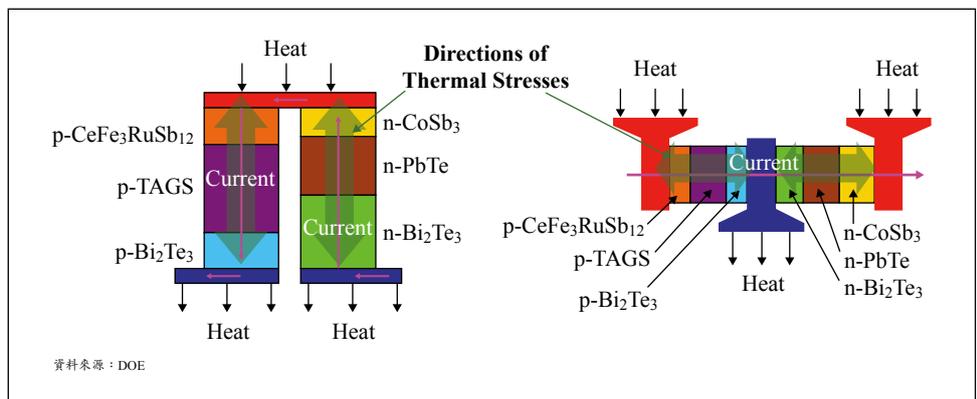
同材料層性質及材料介面阻值等，使得實際模組效率降低。在系統組裝時也會因為材料及介面阻值等因素使得系統效率再降低。因此封裝設計時如何降低各層級原件及材料的阻值是提升系統發電量的關鍵。

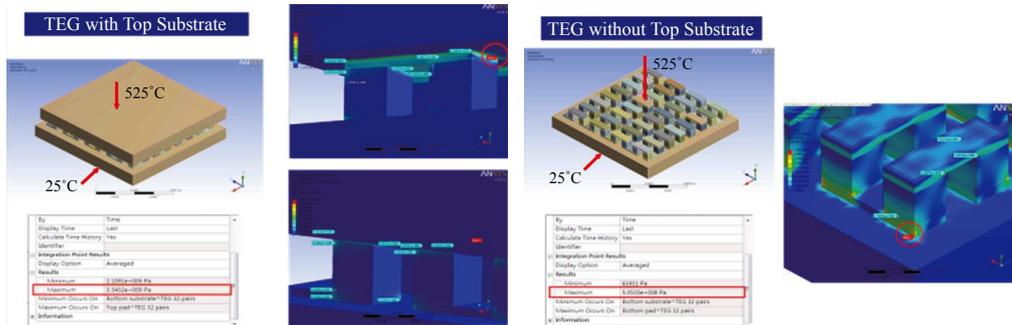
熱電模組由熱電材料、電極、基板及接合材料組成。傳統熱以金屬接觸串連方式做電性連接，而熱則透過導熱基板及熱電材料以並聯方式傳輸，一般以氧化鋁 (Al_2O_3) 作為導熱基板材料。傳統熱電模組

熱電對採 π 型結構，熱傳方向和電流方向垂直，另一種新的結構稱為Y型結構，熱傳方向和電流方向平行，為提升模組效能，熱電材料可利用堆疊方式將不同溫度應用的材料接合組裝，如圖六所示。

工研院電光所發展熱電力耦合分析技術開發熱電模組熱電力設計平台，如圖七所示，可大幅縮短設計時間，提升設計效率。無上基板的模組可將上方基板CTE所造成的應力問題大幅降低。另外Y型熱電模組

►圖六 熱電模組結構





▲圖七 熱電模組結構設計分析

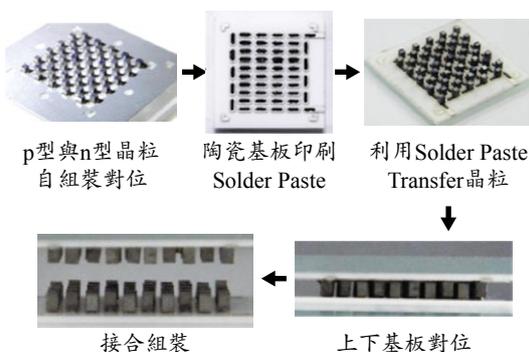
也可以降低模組應力。

除了設計之外，熱電材料的組裝也是重點，由於傳統電子元件之無鉛焊料耐熱溫度有限，對於需更高溫操作的熱電元件，在接合方式上就需要採用其他耐高溫焊料，一般採用硬焊(Brazing)或燒結(Sintering)等方式，但由於需在高溫接合，對熱電材料可靠度造成影響且不利量產。新的製程方式採用奈米銀接合或界面金屬(IMC)接合方式，可將接合溫度降低至接近傳統電子材料接合溫度(<300°C)，且耐溫>400°C，因此可提升模組可靠度及量產性。由於熱電模組高溫操作時，熱電材料成份容易擴散至金屬電極，而導致材料性能下降而影響功率輸出，同時為了增加與接合焊料的接合性，一般在熱電材料表面鍍銀做為擴散阻障層。

在更高溫度時，由於擴散現象更為嚴重，需採用性能更佳之擴散阻障層材料。工研院也開發出以Ag等材料為擴散阻障層的結構，防止材料擴散的溫度可達500°C。針對多數的熱電模組組裝，也開發出熱電模組自組裝技術，利用重力場與磁場的雙勢能場輔助，將接腳自動翻轉至電極面，將可節省組裝人力並提升精確度，如圖八所示。

排氣系統設計

由於傳統熱電模組形狀是平面型，因此排氣管需設計成矩形形狀，以便於安裝，然而安裝面積受到限制，而排氣管由圓形變成矩形，在排氣背壓上也造成一些損失，新設計如GENTHERM的圓形排氣管則可提升系統效能，但組裝上會花較大成本。另外由於排氣管廢熱回收需由排氣管將引擎廢熱擷取出來，因此熱交換器的設計非常重要，傳統熱交換器設計採用平面鰭片，排氣經過鰭片時將熱傳至排氣管表面而供給熱電模組熱端熱源，由於熱沿著管軸向流出，造成流動路徑長，且較不易傳到管壁，結果造成延管壁面的溫差很大，也使得排氣管前後端熱電模組的發電量有很大落差。工研院開發的熱電系統排氣管，採用衝擊流對流設計，使管內廢氣能均勻



▲圖八 熱電模組自組裝技術



▲圖九 熱電廢熱回收排氣管實體及實車安裝

衝擊至熱電模組下方的管壁，並能將熱藉由徑向散熱片傳至壁面，因此可以得到最佳的熱擷取效果，並能保持排氣管壁面溫度維持高溫，使得熱電模組能發揮最高效率，結合高溫熱電模組最高輸出預估可達500W以上，非常具有應用潛力，如圖九所示。由於排氣熱量隨車操作時的變動很大，高效能電源管理也是重要設計項目。

系統整合

熱電系統安裝時散熱系統的整車設計非常重要，液冷的散熱效能高、體積小及重量輕，因此設計於系統中的效能較高，但價格較高，設計較複雜，需結合整車的散熱系統可提升效率。散熱系統的設計方式包括額外的液冷系統設計及直接利用原車的散熱器，後者的設計優點是不需額外的散熱裝置，但需注意熱電模組熱端的散熱影響，以及流路增加容易造成的幫浦負荷及維修等問題，採用額外系統的優點是散熱效能較高、維修方便及不會影響整車性能。熱電系統整合於整車時，需注意的問題是由於安裝熱電系統所造成的背壓提升問題。由於背壓提升過高會造成引擎排氣不順暢而影響動力性能。可設計旁通流路，利用控制閥以控制背壓。旁通設計除了可避免背壓過高問題，也可以有效避免

熱電模組由於突然增加的高溫而破壞熱電模組，並可保護熱電系統的散熱器溫度不會過高。由於安裝於汽車的可靠性及性能要求非常高，因此需經過車輛相關的測試，包括動力計測試及行車型態測試等，以測試系統效能及可靠性。

結論

熱電技術應用於汽車廢熱回收是汽車節能技術的新方向，依據美國車廠及歐盟計畫的評估，熱電技術非常具有應用潛力。在目前材料特性下已可提供汽車新的技術應用。然而材料上需確保價格、量產性及可靠度之需求。車用熱電模組價格目標約每瓦2美金，系統則需每瓦3美金以內。除需設法確認原材料來源穩定及成本降低，在材料合成及模組製程上也需降低成本才能符合需求。對車廠而言，為滿足2020年的CO₂排放需求，熱電模組必須加速降低價格及提升量產性，以滿足未來每年百萬顆以上之車用需求。☐

參考文獻

1. 朱旭山，熱電技術發展及其應用方向，工業材料雜誌，286，2010
2. J. Fairbanks, Automotive Thermoelectric Generators and HVAC, SAE 2011 Electronic Systems for Vehicle Propulsion Symposium, 2011
3. 許家展等，從ICT2012看全球熱電技術發展趨勢與應用，工業材料雜誌，311，2012
4. 朱旭山，熱電技術於車輛廢熱回收及致冷空調之研發與應用，工業材料雜誌，310，2012
5. C. K. Liu et al., Thermoelectric Waste Heat Recovery for Automotive, 2014 IMPACT conference. 2014.
6. D. Magnetto et al., Reduced Energy Consumption by Massive Thermoelectric Waste Heat Recovery in Light Duty Trucks, Warsaw, PL, 2013.
7. P. Els, The Future of Automotive Thermoelectric Generators, Automotive IQ, 2013
8. K. Biswas et al., High-performance bulk thermoelectrics with all-scale hierarchical architectures, Nature, 2012