

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

脈衝熱輻射灼傷模式研究暨化學火災之危害評估

Skin-Burning Models Due to Pulse Thermal Radiation and Hazard

Assessment of Chemical Fires

計畫編號：NSC90-2214-E-032-006

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

主持人：陳錫仁 淡江大學化工系教授

計畫參與人員：林月琴、李明杰、蘇美心 淡江大學化工系研究生

一、中文摘要

熱輻射的病理效應就是皮膚的灼傷，熱輻射對皮膚的灼傷通常分成三級，按不同的皮膚灼傷深度而分級，二級與三級灼傷常使人失能，嚴重的話，亦有造成死亡的可能性。皮膚灼傷的原因係由於輻射熱傳而造成皮膚表面溫度遽增的結果，化學火災輻射的熱能幾乎百分之百會被皮膚吸收，皮膚表面溫昇的高低及熱能滲透的深淺，造成皮膚或多或少會的灼傷。由液體沸騰氣體膨脹爆炸 (BLEVE) 形成的火球持續時間在 10~20 秒，外溢或洩漏形成的池火則可持續數分鐘或數小時，雖然火球持續時間很短，卻輻射出巨大的熱通量，甚至可達 $200\sim 350 \text{ kW/m}^2$ 。

此研究中，我們針對火球 (fire ball) 在短時間脈衝熱輻射下所造成的皮膚灼傷，推導數學模式。熱輻射所造成之傷害統計模式常依據熱輻射強度與暴露時間而定，藉機率單位方程式，可評估化學火災對人體所造成傷害的程度。此研究中，我們亦藉商用軟體 SAFER/TRACE 評估化學火災引起的災害。

關鍵詞：脈衝熱輻射、灼傷、火災危害。

Abstract

Pathological effects of thermal radiation are

related to the development of burns due to heat transfer to the skin. The injury caused to the skin by the thermal radiation is normally defined as first, second or third-degree burn. This determines to what extent and to which depth the skin has been damaged. Second and third degree burns can lead to disability. A realistic probability of mortality is also present. Burns develop due to the fact that the temperature rise of the skin caused by heat transfer into the skin. At the heat supply produced by thermal radiation due to a chemical fire, the energy absorption is practically total. Dependent on the magnitude of the temperature rise and on the depth of penetration, more or less serious burns can develop. The duration of a chemical fire, such as a fireball resulting from a BLEVE (Boiling-Liquid, Expanding-Vapor Explosion), usually lasts in a periods of few seconds (say, 10-20 seconds). However, a pool fire resulting from a spillage or leakage can sustain a longer time, such as minutes or even few hours. Although the duration of a fireball is short, it emits a very enormous amount of heat flux (say, $200\sim 350 \text{ kW/m}^2$). In this research we developed a mathematical model of skin burns as a consequence of impulse thermal radiation.

Statistical model for injury due to thermal radiation is often used to quantify the hazard analysis. On the basis of a calculation of the thermal radiation load (i.e., intensity and duration), the probit function and population data can then be used to determine the magnitude of the injuries. In the study, we also look into the hazard assessment due to chemical fires by using commercial software SAFER/TRACE.

Keywords: pulse thermal radiation, burns, fire hazard

二、緣由與目的

高壓液化氣，如液化石油氣(LPG)，一直是許多化學災害的來源，包括火災、蒸氣雲爆炸(VCE)與液體沸騰氣體膨脹爆炸(BLEVE)；BLEVE 是 boiling-liquid, expanding-vapor explosion 的縮寫簡稱，係指液體貯存溫度大於大氣沸點溫度時，突然從封閉容器中釋放出來的一種物理現象。由於壓力突然釋放而使部份的液體氣化產生具爆炸性的蒸氣雲。大部分的 BLEVE 一旦被周圍的點火源點燃常形成火球(fireball)，而產生極高的熱輻射是相當恐怖的事故。1984 年 11 月 19 日發生於墨西哥的液化石油氣貯存所爆炸事件，造成五百人死亡，七千多人輕重傷灼傷就是屬於這種狀況 [1]。

此研究中，我們針對火球在短時間脈衝熱輻射下所造成的皮膚灼傷推導數學模式。經由此模式吾人將可預測，在短時間之熱輻脈衝下，使皮膚造成二級與三級灼傷所需吸收的熱通量。在許多碳氫及可燃燃料所引發的意外災中，化學反應常伴隨火球的發生。這些反應可在數秒之內，藉著熱輻射的型式，釋放出大量的熱，對周圍的人們造成傷害。當皮膚吸收了熱之後，熱量將會向內擴散並提高該區域細胞的溫度。根據文獻報告指出，在數秒內提升約 8 至 9 K 的溫度，將會輕易地使細胞受到破壞。而灼傷的程度，則由哪一層的皮膚細胞受到破壞來決定的。圖一為皮膚組織的構造圖，皮膚細胞主要是由兩層所構成的，即表皮組織

(epidermis) 與真皮組織(derma)。表皮組織是一厚度約 0.07 mm 至 0.12 mm 的薄外層，而真皮組織是位於表皮組織之下，其平均深度約 1 至 2 mm。在一級灼傷中，真皮沒有受到破壞或只受到極小部份的傷害；二級灼傷中，所有的表皮及大部份的真皮組織都被破壞，而三級灼傷，所有的皮膚(包括表皮及真皮組織)皆被摧毀。經由熱傳導數學模式吾人可預測，在熱輻射脈衝下，使皮膚造成二級與三級灼傷所需吸收的熱通量。此外，模式可預測在相對皮膚深度中上升溫度的最大值與灼傷程度的關係。熱輻射所造成之傷害統計模式常依據熱輻射強度與暴露時間而定，值得一提的是 BLEVE 所造成的熱輻射通量可高達 200~350 kW/m² 且火球可持續 10~20 秒鐘。

三、研究方法與成果

研究方法

(一) 脈衝熱輻射數學模式

當一熱通量於一段時間內接觸到皮膚，由於熱擴散傳導的作用，皮膚內出現了溫度分佈。這個溫度分佈曲線是熱通量與皮膚熱物性的函數。對一短暫給予表面恆定的熱通量且沒有脫皮(ablation)現象發生時，皮膚內的溫度上升可表為：

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$\text{I.C. : } T(x, 0) = T_0$$

$$\text{B.C.1 : } -k \frac{\partial T}{\partial x}(0, \tau) = \begin{cases} Q_E, & 0 \leq \tau < \tau_c \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{B.C.2 : } T(\infty, \tau) = T_0$$

上述偏微分方程式可藉 Laplace transform 求出其解為

$$T - T_0 = \frac{2Q_E}{\sqrt{k\rho c}} \sqrt{\tau} \text{ierfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha\tau}} \right) - \frac{2Q_E}{\sqrt{k\rho c}} \sqrt{\tau - \tau_c} \text{ierfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha(\tau - \tau_c)}} \right) U_{\tau_c}(\tau) \quad (2)$$

式中， T_0 為皮膚初始溫度， k 為皮膚熱傳導係數， ρ 為皮膚密度， c 為皮膚比熱， x 為皮膚

深度， α 為熱擴散係數， τ 為熱傳導時間， Q_E 為熱通量， τ_c 為火源持續時間， $U_{\tau_c}(\tau)$ 為單位階梯函數(unit step function)，

$$\text{ierfc}(Z) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-Z^2) - Z + \text{Zerf}(Z)。$$

上式中， erf 為誤差函數(error function)。在一熱脈衝期 τ_c 下，皮膚表面總輻射熱量為 $Q=Q_E\tau_c$ 。於加熱末期時 ($\tau=\tau_c$)，熱量 Q 儲存於皮膚表面附近。經過一段時間後，熱量向內部擴散，並且提升了皮膚內某一深度的溫度。再過一段時間後，熱量更進一步擴散到更深層的皮膚，這一深度的皮膚溫度也開始下降。皮膚表面溫度達到 45°C 可謂進入臨界溫度(critical temperature)而溫度上昇 9°C 可視為造成熱傷害(二級或三級灼傷)所需的充要條件。我們可藉著上面推導出的方程式分析皮膚表面熱通量、熱脈衝時間與真皮基部溫度提昇的關係，圖二為皮膚表面熱通量 Q_E 固定 41.6 kW/m^2 ，熱脈衝時間 τ_c 分別為 3 秒、6 秒、9 秒時，真皮基部提昇的溫度變化圖。由圖可知在固定皮膚表面熱通量下，熱脈衝時間越久，真皮基部的尖峰溫昇越大，在熱脈衝時間 $\tau_c=3$ 秒時，尖峰溫昇已快達造成熱傷害的 9°C 。圖三為熱脈衝時間 τ_c 固定為 3 秒，皮膚表面熱通量 Q_E 分別為 41.6 kW/m^2 、 83.2 kW/m^2 、 124.8 kW/m^2 時，真皮基部提昇的溫度變化圖，由圖三可見皮膚表面熱通量 Q_E 越高，真皮基部能忍受的時間越短。

(二)化學火災危害評估

熱輻射所造成之傷害統計模式常依據熱輻射強度與暴露時間而定，值得一提的是 BLEVE 所造成的熱輻射通量可高達 $200\sim 350 \text{ kW/m}^2$ 且火球可持續 $10\sim 20$ 秒鐘。Eisenber *et al.* [2] 提出機率單位方程式 (probit equation) 用池火與明火的熱劑量來估計對人體所造成傷害的程度。

$$Y = -14.9 + 2.56 \ln\left(t_c Q_E^{4/3}\right) \quad (3)$$

式中，probit 變量 Y 與致死機率 P_r 有關，可由下式表之：

$$P_r = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (4)$$

雖然上式之積分值可在書上查出，但對特定 Y 值仍不方便計算 P_r 。為計算方便，我們將上面的積分式導出為誤差函數的形式即：

$$P_r = \frac{1}{2} \left[1 + \text{erf}\left(\frac{Y-5}{\sqrt{2}}\right) \right] \quad (5)$$

通常誤差函數的數值可由電腦計算得知，所以上式只要輸入任意 Y 值即可算出致死機率 P_r ；反之， P_r 已知亦可求出 Y 值。

有許多公式可計算 BLEVE 的物性參數，其中較有用的公式是： $D_{\max}=6.48W^{0.325}$ ， $\tau_{\text{BLEVE}}=0.825W^{0.26}$ 與 $H_{\text{BLEVE}}=0.75D_{\max}$ ，其中 D_{\max} 為最大火球直徑， τ_{BLEVE} 為火球持續時間與 H_{BLEVE} 為火球的中心高度 [3]。BLEVE 發生時，物體接受到的熱輻射量亦可寫為：

$$Q_E = \varepsilon E F_{21} \quad (6)$$

上式中，大氣穿透率 ε ，可用一個包含溼度的相關式計算。

$$\varepsilon = 2.02(P_w X)^{-0.09} \quad (7)$$

上式中， P_w 為大氣壓下水汽分壓， X 為火球表面至接受體間的距離，此式之適用範圍為 P_w 與 X 皆不得為零；例如，在 20°C 時，水之蒸氣壓為 $2,238 \text{ Pa}$ (17.54 mmHg)，在 70% 的相對溼度下，水汽分壓為 $P_w=1,636 \text{ Pa}$ ，若 X 之距離為 150 m ，則 $\varepsilon=0.66$ 。

上式中，表面放射熱量 E 取代了需要火球溫度的 Stefan-Boltzmann 方程式，Roberts [4] 與 Hymes [5] 則提供了一個計算表面放射熱量的公式：

$$E = \frac{F_{\text{rad}} W H_c}{\pi D_{\max}^2 \tau_{\text{BLEVE}}} \quad (8)$$

針對 BLEVE 對人的傷害，火球之幾何觀察因子可表為：

$$F_{21} = \frac{D_{\max}^2}{4R^2} \quad (9)$$

最後，我們可以計算出火球表面與接受者之間的路徑距離 X ，可表示成：

$$X = \sqrt{H_{BLEVE}^2 + R^2} - 0.5D_{max} \quad (10)$$

上述之 E 為表面放射通量， F_{2l} 為觀察因子， R 為火球半徑， F_{rad} 為輻射分率， H_c 為燃燒熱， P_w 為大氣壓下水汽分壓， Q_E 為 BLEVE 的熱輻射量， W 為釋放的質量。圖四為致死機率對暴露時間與輻射量之關係圖，圖五為不同洩漏量對 BLEVE 危險半徑與致死機率的關係圖，圖六為不同洩漏量對熱輻射接收量與致死機率的關係圖。我們使用美國 DuPont 公司的 SAFER/TRACE 軟體 [6] 評估火球與池火的熱衝擊 (thermal impact)，分別輸入發生火球及池火當時的洩漏量、環境溫度、大氣穩定度、地表粗糙度、相對溼度、洩漏時間、風速、離火源之距離和池火半徑等條件以求得熱輻射量及安全距離。因丙烷 (propane) 所造成的 fireball，在距火源 50 公尺處的熱輻射量為 65.32 kW/m^2 ，安全距離 (1 kW/m^2) 為 410 公尺。因丙酮 (acetone) 所造成的 pool fire，在距火源 50 公尺處的熱輻射量為 1.67 kW/m^2 ，安全距離 (1 kW/m^2) 為 59 公尺。圖七、圖八及圖九分別代表丙烷外洩產生火球之輻射熱與距離關係、丙烷外洩產生火球之輻射熱等高線關係及丙烷外洩產生火球，下風距離 100 m 處接受者所承受之輻射熱量對時間關係。圖十、圖十一及圖十二分別代表丙酮外洩產生池火之輻射熱與距離關係、丙酮外洩產生池火之輻射熱等高線關係及丙酮外洩產生池火，下風距離 100 m 處接受者所承受之輻射熱量對時間關係。

成果

由推導出的脈衝熱輻射數學模式及 TRACE 軟體模擬化學火災危害性的結果可歸納如下：

- (1) 皮膚表面溫度上升 9°C 已構成熱傷害所需之基本條件，由推導出的脈衝熱輻射數學模式可知即便熱通量為 41.6 kW/m^2 、熱脈衝時間僅為 3 秒時，短時間內皮膚就已趨近危險的臨界溫度，可能造成三級灼傷。
- (2) 由 TRACE 模擬出的結果可知因丙烷而產生的火球直徑為 58 m，火球持續時間為 6

秒，火球熱輻射最大量為 342 kW/m^2 ，安全距離為 410 公尺。因丙酮而產生池火的直徑為 15.1 m，池火蒸發時間為 2.4 分鐘，池火熱輻射最大量為 40 kW/m^2 ，安全距離為 59 公尺。

四、結果與討論

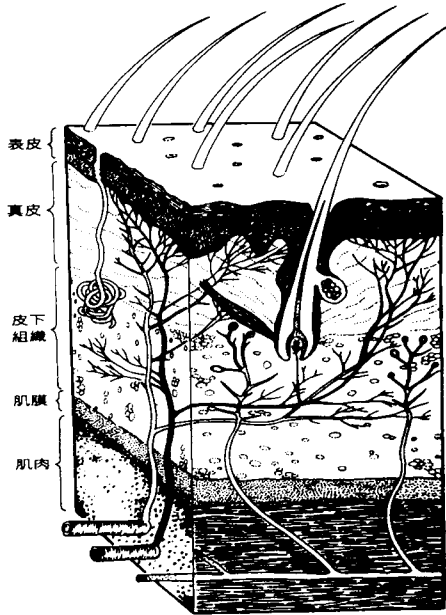
本研究所推導之火球在短時間脈衝熱輻射下造成皮膚灼傷之數學模式，可預測在短時間之熱脈衝熱輻射下，使皮膚造成二級與三級灼傷所需吸收的熱通量，對於熱防護裝備如熱防護衣或熱防護手套具有學理參考價值；此外，DuPont 公司的 SAFER/TRACE 軟體可應用於評估化學火災之危害，在消防應用上，可提供勞工作業場所所有熱暴露環境時之危害防止技術的參考。此研究亦可稱為灼傷後果分析 (consequence analysis) 在化學程序工業上量化風險評估的一環。

五、參考文獻

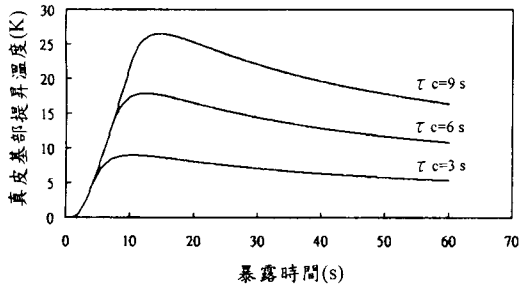
- [1] Pietersen, C.M., 1988; "Analysis of the LPG-Disaster in Mexico City," J. Hazard. Mater., 20, 85.
- [2] Eisenberg, N.A., et al., 1975; "Vulnerability Model-A Simulation System for Assessing Damage Resulting from Marine Spills," U.S. Coast Guard, Office of Research and Development, Report No. CG-D-136-75 NTISAD-015-245, Springfield, VA.
- [3] AIChE/CCPS, 1989; "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis," Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, New York: 126.
- [4] Roberts, A.F., 1981; "Thermal Radiation Hazards from Releases of LPG from Pressurized Storage," Fire Safety J., 4(3): 197-212.
- [5] Hymes, I., 1983; "The Physiological and Pathological Effects of Thermal Radiation," UKAEA Safety and Reliability Directorate, Report SRD R275, Culcheth, UK.
- [6] TRACE (Integrated Software for Chemical

Risk Management), 2001; User's Guide, Safer Systems, California, USA.

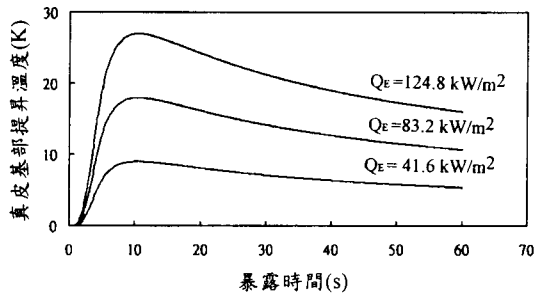
六、圖表



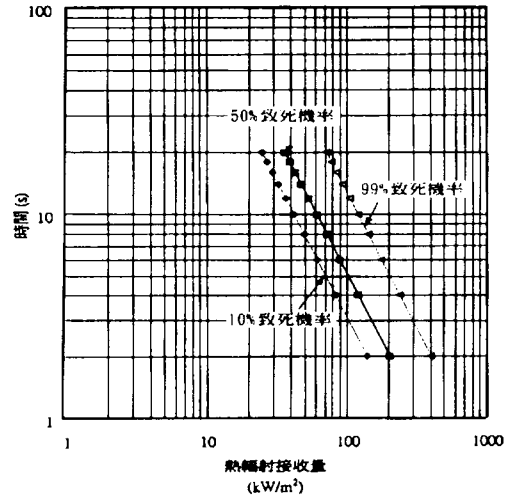
圖一 皮膚組織構造圖



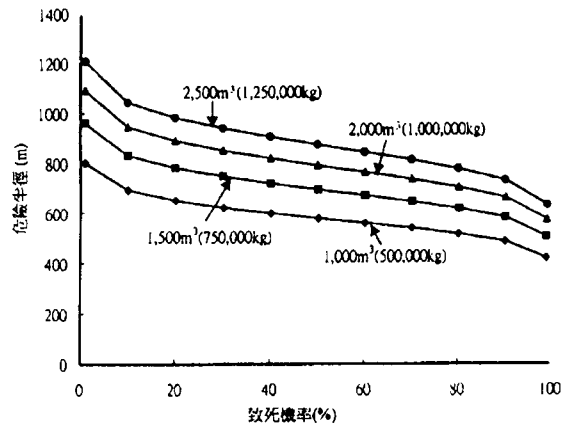
圖二 皮膚表面熱通量 Q_E 固定 41.6 kW/m^2 時，熱脈衝時間 τ_c 分別為3秒、6秒、9秒時，真皮基部提昇的溫度變化圖



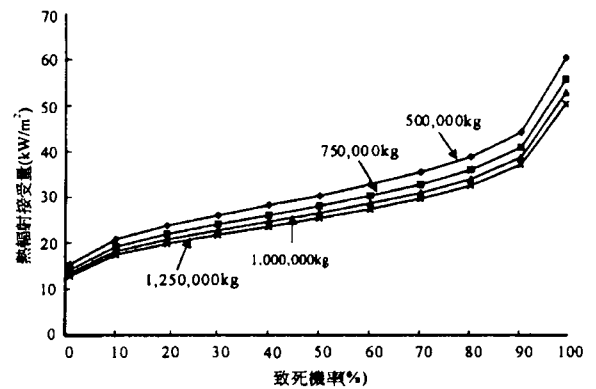
圖三 熱脈衝時間 τ_c 固定為3秒，皮膚表面熱通量 Q_E 分別為 41.6 kW/m^2 、 83.2 kW/m^2 、 124.8 kW/m^2 時，真皮基部提昇的溫度變化圖



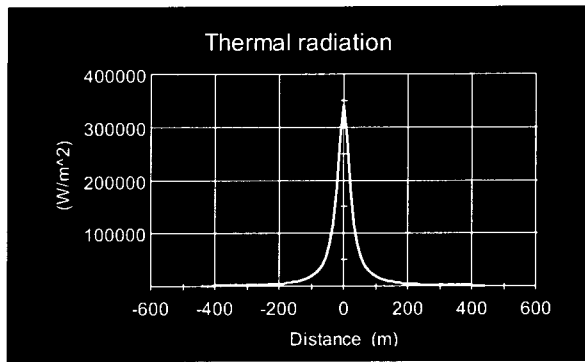
圖四 致死機率對暴露時間與輻射量之關係圖



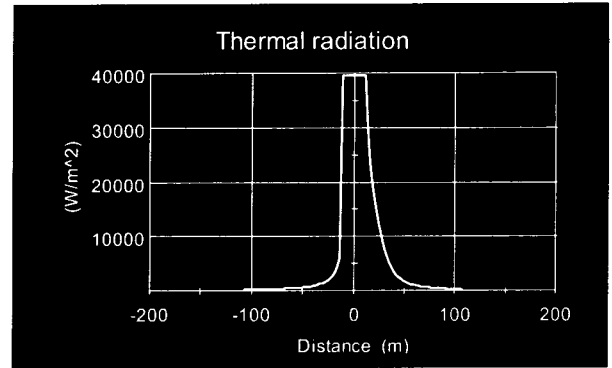
圖五 不同洩漏量對 BLEVE 危險半徑與致死機率的關係圖



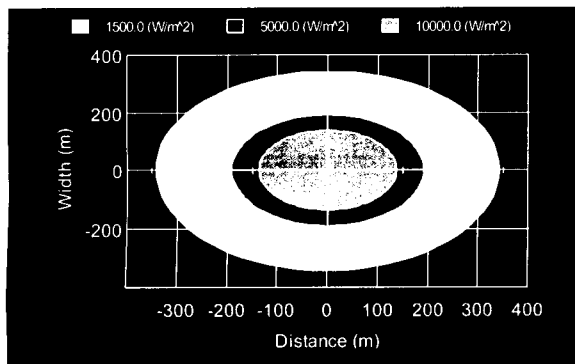
圖六 不同洩漏量對熱輻射接收量與致死機率的關係圖



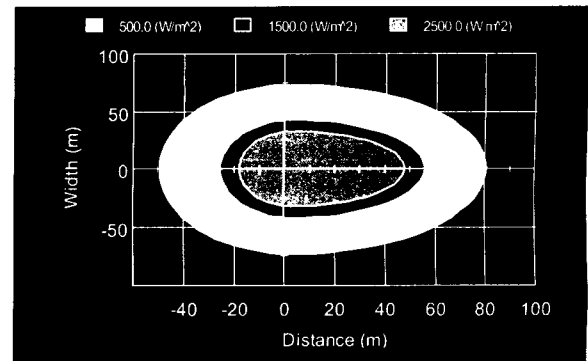
圖七 丙烷外洩產生火球之輻射熱與距離關係圖 (洩漏量=1000 kg、環境溫度=298.15 K、大氣穩定度=D、地表粗糙度=0.03 m、相對溼度=70%、風速=5 m/s、太陽熱輻射=0.3 kW/m²)



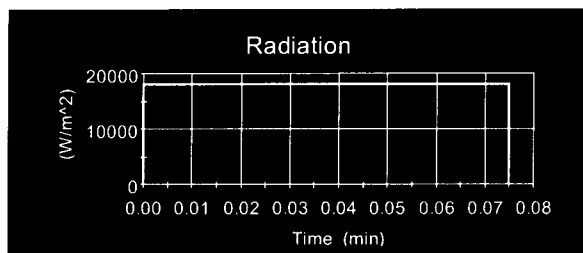
圖十 丙酮外洩產生池火之輻射熱與距離關係圖(洩漏量=1344 kg、洩漏時間=10 min、環境溫度=298.15 K、大氣穩定度=D、地表粗糙度=0.03 m、相對溼度=70%、風速=5 m/s、太陽熱輻射=0.3 kW/m²等條件)



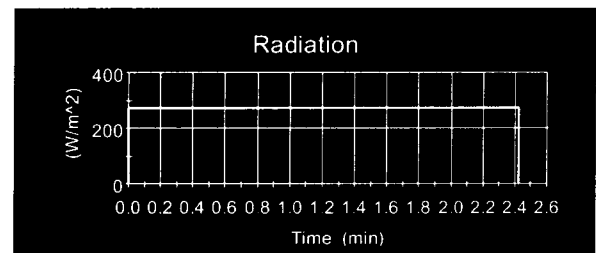
圖八 丙烷外洩產生火球之輻射熱等高線關係圖(外圈為1.5 kW/m²、中圈為5 kW/m²、內圈為10 kW/m²)



圖十一 丙酮外洩產生池火之輻射熱等高線關係圖(外圈為0.5 kW/m²、中圈為1.5 kW/m²、內圈為2.5 kW/m²)



圖九 丙烷外洩產生火球，下風距離100 m 處接受者所承受之輻射熱量對時間關係圖(最大熱輻射量為18 kW/m²)



圖十二 丙酮外洩產生池火，下風距離100 m 處接受者所承受之輻射熱量對時間關係圖(最大熱輻射量為0.27 kW/m²)