

限閱一

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

應用計算流體力學程式分析爐渣於圍阻體內之熱傳模式

CFD Investigating the Heat Transfer Models for Debris

Characteristics in the Containment

計畫編號：1002001INER005

受委託機關(構)：國立清華大學

計畫主持人：馮玉明

聯絡電話：03-5735363

E-mail address：ymferng@ess.nthu.edu.tw

核研所聯絡人員：王郁文

報告日期：一〇一〇年十二月

目 錄

目 錄.....	i
中文摘要.....	1
英文摘要.....	2
壹、計畫緣起與目的.....	3
貳、研究內容與成果.....	4
參、結論與未來工作.....	13
參考文獻.....	14

中文摘要

當核電廠假設性之嚴重事故進入所謂”Ex-Vessel” Phase 時，高溫熔融 Corium 的控制是結束嚴重事故與降低事故結果的主要決定因素。Corium 控制的物理特性包含熔融 Corium 從壓力槽流出、在圍阻體底部遷移與擴散以及冷卻凝固等。熔融 Corium 在壓力槽外冷卻與凝固特性(包含熱輻射冷卻速率、固化速率以及凝固形狀與高度等)，對於嚴重事故處理策略的有效性，有極大的影響。一般大型系統安全分析程式 MAAP、MELCOR 或 SCDAP/RELAP5 等，均採用一維的守恆方程式或經驗式進行分析，無法掌握 Corium 擴散與熔融 Corium 凝固等三維的分布特性，計算流體力學程式正能彌補這系統程式之不足。由是之故，本計畫擬以兩年的研究時間，研究 CFD 有關 Corium 與 Debris 等熔融金屬之流動、冷卻與凝固等理論模式，以建立熔融 Corium 由從壓力槽流出至圍阻體底部而遷移、擴散與凝固等熱流特性之 CFD 模擬能力。

ABSTRACT

It is a dominant measure to control the high-temperature molten corium as the postulated severe accident progresses into the so-called “ex-vessel” phase. Control of the thermal–hydraulic characteristics related to the molten corium includes the outflow of corium from the pressure vessel, the transport and spread of the molten corium, and its solidification. Therefore, the cooling and solidification rates of molten corium, as well as the shape and height of solidification have significant impact on the effectiveness of severe accident management strategy. Using one-dimensional conservation equations or correlations, the system safety codes can not capture these localized and three-dimensional characteristics, which can be modeled by way of CFD methodology. Through two-year study, this project want to investigate the CFD mathematical models related to the thermal–hydraulic characteristics including the transport, spread, and solidification of the molten corium. Finally, the capability of simulating these characteristics can be established.

壹、計畫緣起與目的

當核電廠假設性之嚴重事故進入所謂”Ex-Vessel” Phase 時，Corium(高溫熔融的金屬與氧化物的混合體)的控制是結束嚴重事故與降低事故結果的主要決定因素。Corium 控制的物理特性包含熔融 Corium 從壓力槽(Pressure Vessel)流出、熔融 Corium 在圍阻體底部遷移與擴散(Transfer and Spread)以及熔融 Corium 冷卻凝固(Solidification)等。熔融 Corium 在壓力槽外冷卻與凝固特性(包含熱輻射冷卻速率、固化速率以及凝固形狀與高度等)，對於嚴重事故處理策略(Management Strategy)的有效性，有極大的影響。當濕井灌水進入圍阻體底部之高度高於熔融 Corium 的高度時，此嚴重事故處理策略屬於有效的，且熔融 Corium 會凝固而形成 Debris Bed；反之，其策略是無效的，而熔融 Corium 會與圍阻體底部水泥(Concrete)作用形成非凝結氣體(Non-Condensable Gases)。若此時其他嚴重事故處理措施(Measures)亦失效的話，會造成圍阻體過壓(Over-Pressurized)而失效(Failure)，進而導致輻射外釋。一般大型系統安全分析程式 MAAP[1]、MELCOR[2]或 SCDAP/RELAP5[3]等，均採用一維的守恆方程式(Conservation Equation)或經驗式(Correlation) 進行 Corium 形成、流動、冷卻與凝固等分析，無法掌握 Corium 擴散與熔融 Corium 凝固等三維的分布特性，計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)程式正能彌補這系統程式之不足。

近年來，國外在這方面相關的研究包含 Spindler 與 Veteau[4]利用 THEMA 程式模擬熔融 Corium 擴散的特性並與相關實驗進行比對；Moriyama[5]等人利用 JASMINE_pre 程式進行熔融噴射流(Melt Jet)熱流特性分析；Alsmeyer 等人[6]進行 ECOSTAR(Ex-vessel COre

melt STAbilization Research) 計畫以研究爐心熔毀事故後進入 Ex-Vessel Phase 期，熔融 Corium 之行為特性，以期能緩和嚴重事故之結果；Dombrovsky 與 Dinh[7]利用方程式進行熱輻射對於熔融金屬氧化物固化行為之影響效應；Pohlner 等人 [8] 發展 IKEJET/IKEMIX 程式集模擬熔融金屬噴射流解體(Breakup)與爐渣床(Debris Bed)形成之現象。

由是之故，本計畫擬以兩年的研究時間，研究 CFD 有關 Corium 與 Debris 等熔融金屬之流動、冷卻與凝固等理論模式，以建立熔融 Corium 由從壓力槽流出至圍阻體底部而遷移、擴散與凝固(Solidification)等熱流特性之 CFD 模擬能力。

貳、研究內容與成果

2.1 研究內容

如前所述，本計畫主要是針對 CFD 模擬熔融 Corium 從壓力槽 (Pressure Vessel) 流出與其在圍阻體底部遷移與擴散等流動特性，以及熔融 Corium 冷卻凝固與凝固特性(包含熱輻射冷卻速率、固化速率以及凝固形狀與高度等)等之理論模式之研究與剖析，並深入探討這些模擬模式之理論基礎與建立熔融 Corium 冷卻與凝固的 CFD 模式。

CFD 基本上運用熱焓(Enthalpy)與孔隙度(Porosity)反應的數學模式，模擬金屬凝固和熔化等特性。CFD 考慮液、固兩相區為一種多孔區，並利用介於 0 和 1 的孔隙度值，來定義固液兩相共存熔化區內液體的部分。當熔融金屬逐漸凝固，此固液兩相區的孔隙率亦隨之降低。若熔融金屬已完全凝固時，孔隙率即變為零，而速度也降為零。同時，配合適當的動量消散係數反應到動量方程造成的固體材料的壓力降，動量消散係數也可配合固體區域所佔的孔隙度減少，加入到適當的紊流模式。

2.1.1 數學模式

以熱水流的觀點而言，CFD 模擬熔融 Corium 固化特性之模式基本上分成液態熔融金屬與固態凝固金屬兩個區域，這兩區分別描述的方程式與一般 CFD 模擬的模式大致相同，亦即包含連續方程式、動量方程式、能量方程式以及紊流模式等。只有在液、固兩相交界上，需要建立另外的模式處理。由於熔融 Corium 大都由多種物質組成，其熔點溫度($T_{liquidus}$)與凝固點溫度($T_{solidus}$)不盡相同。存在於

液、固兩相中間的區域屬於部份液態與部份固態的混合態(如圖 1 所示)，此區域亦稱為糊狀(Mush)區域。其可以用下面的方程式表示之

$$\beta = 0 \quad \text{當} \quad T < T_{solidus} \quad (1)$$

$$\beta = 1 \quad \text{當} \quad T > T_{liquidus} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} \quad \text{當} \quad T_{solidus} < T < T_{liquidus} \quad (3)$$

其中： β = 液態金屬體積分率

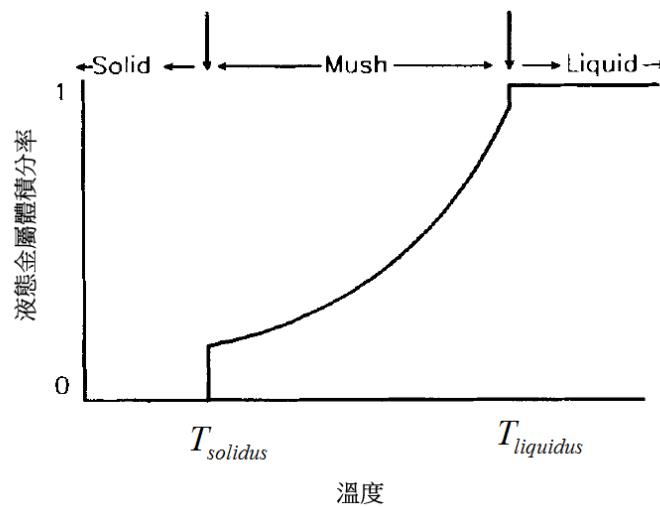


圖 1 液態金屬體積分率與溫度關係之示意圖

此外，在糊狀區域，其能量方程式的熱焓必須為金屬本身的熱焓在加上固液變化潛熱，亦即

$$H = \text{修正焓} = h + \Delta H \quad (4)$$

$$h = \text{焓}$$

$$\Delta H = \text{固液變化潛熱}$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (5)$$

$$h_{ref} = \text{參考焓}$$

T_{ref} = 參考溫度

C_p = 比熱

$$\Delta H = \beta L \quad (6)$$

L = 固液轉換的潛熱

如前所述，CFD 利用適當的動量消散係數，將熔融金屬逐漸凝固之現象反應到動量方程的源項：

$$S = \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{mush} (\vec{v} - \vec{v}_p) \quad (7)$$

其中： ε = 介面係數提供方程式被消除為零

A_{mush} = 固液熔化常數(Mush Zone Constant)

\vec{v}_p = 固化金屬熔化所造成熔化的拉速度

而金屬固態融化後所產生的速度變化會被添加到所有的紊流方程組，並在固、液共存區域以下列方程式帶入金屬固液熔化動量方程式。

$$S = \frac{(1-\beta)^2}{(\beta^3 + \varepsilon)} A_{mush} \Phi \quad (8)$$

其中： Φ 為紊流方程式所需解決的 k 、 ε 、 ω 等紊流參數

在液態熔融金屬區域方面，描述其熱水流特性的方程式包含連續方程式、動量方程式、能量方程式以及紊流模式等，分別描述如下。

連續方程式

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \bar{v}) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n \left(\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp} \right) \quad (9)$$

其中， \dot{m}_{qp} 為 q 相傳遞至 p 相的質量流率

\dot{m}_{pq} 為 p 相傳遞至 q 相的質量流率

S_{α_q} 為質量源項

α_q 為 q 相的體積分率，同時符合 $\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1$ (10)

ρ_q 為 q 相的密度

$$v \text{ 為混合相的速度} = \frac{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q v_q}{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q} \quad (11)$$

動量方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{v}) = -\nabla \cdot \left[\mu (\nabla \bar{v} + \nabla \bar{v}^T) \right] + \rho \bar{g} + \bar{F} - \nabla p \quad (12)$$

其中， μ 為混合相的黏滯度

F 為外界作用力

g 為重力加速度

p 為壓力

能量方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\bar{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_h \quad (13)$$

其中， k_{eff} = 等效熱導度

$$E = \frac{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q E_q}{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q} \quad (14)$$

E_q 為 q 相的內能

$k - \varepsilon$ 紊流模式

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (16)$$

其中， k 為紊流動能

ε 為紊流消散率

G_b 為浮力造成的紊流動能

Y_M 紊流消散率因可壓縮性之修正項

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}, \sigma_k$ 與 σ_ε 均為紊流模式的常數

後面這三項可參考 Fluent 的手冊[9]。

此外，由於熔融 Corium 溫度很高，在其熱傳機制除了傳導與對流外，仍須考慮高溫的輻射效應。本研究中採用 DOM 模式進行熱輻射之計算。為了簡化問題，僅考慮表面熱輻射而不考慮氣體吸收效應的影響，因此忽略氣體吸收和散射常數所產生的效應，此模式是藉由求解輻射傳輸方程式 (Radiation Transfer Equation, RTE) 進而獲得熱輻射效應，此方程式為：

$$(\Omega \cdot \nabla) I(r_p, \Omega) = -(a_{net} + \sigma_s) I(r_p, \Omega) + \kappa I_b(r_p) + \frac{\sigma_s}{4\pi} S(r_p, \Omega) \quad (17)$$

其中： Ω 為立體角 (solid angle)

r_p 為向量位置 (position vector)

a_{net} 為淨吸收系數 (Absorption coefficient)

σ_s 則為散射係數(Scattering coefficient)

$\kappa = a_{net} + \sigma_s$ 則是消散係數(Extinction coefficient) (18)

$I(r_p, \Omega)$ 與 $S(r_p, \Omega)$ 項則分別是輻射強度與源項

$I_b(r)$ 項則為黑體輻射強度

S 為熱源項(source term)

根據最初之假設，於本研究只考量各材料於流固介面之間的表面熱輻射效應且無額外的熱源發生於氣體區，且所有材料皆假設為不透明。故上式中之吸收係數、散射係數以及源項將可加以刪除，而將輻射傳輸方程式進一步被簡化為：

$$(\Omega \cdot \nabla) I(r_p, \Omega) = 0 \quad (19)$$

藉由流固介面的能量平衡，將熱輻射效應視為該網格面之額外源項，即可將熱輻射與流場迭代加以耦合，而達成熱輻射影響的模擬。能量方程式與RTE將聯結(Couple)在邊界條件內，亦即

$$q''|_{wall,cond} = q''|_{wall,conv} + q''_{wall,rad} \quad (20)$$

而其中輻射熱通率則可表示為：

$$q''_{wall,rad} = \phi \int_{n \cdot \Omega' < 0} |n \cdot \Omega'| I(r_p, \Omega) d\Omega' - q''_{\phi,w} \quad (21)$$

2.1.2 數值方法

上述已展示本研究採用的雙相流 Volume of Fluid(VOF)模式，其非線性的偏微分方程式則需數值化，才能進行電腦模擬。數值化的方法主要是採用有限差分法，而方程式中的對流項採用了二階迎風法(Second-order Upwind)來進行離散化。在離散方程式中，求解速度

及壓力是重要關鍵，因此本研究採用了壓力速度耦合算法來進行求解。選用的壓力速度耦合法為 PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators)法，此方法非常適合於暫態的計算，故本研究之暫態數值模擬便採用之。而 CFD 分析的收斂條件為每個離散方程式的相對殘差值都低於 10^{-5} ，且數值均下降兩個數量級(two order)。

因此，本計畫之研究內容為：

- 蒐集、彙整與研究 Corium 與 Debris 等熔融金屬之流動、冷卻與凝固等理論模式。
- 篩選適合之 CFD 程式(包含 FLUENT, CFX, STAR-CCM, 或 CFDRC 等)，並剖析其理論模式、數值方法以及副程式 (Subroutine)撰寫邏輯。
- 研究與評估 CFD 程式所採用之熔融金屬流動模式、紊流擾動模式、熱傳與熱輻射模式以及凝固模式等。
- 蒐集與研究嚴重事故程式模擬事故進入”Ex-Vessel” Phase 時之事故歷程與嚴重事故處理策略。
- 蒐集與彙整爐心熔毀形成高溫熔融 Corium 的組成與物理性質，並撰寫副程式將熔融金屬之物理性質建入 CFD 程式中。

2.2 研究成果

本計畫之執行，可完整地蒐集、彙整與研究 Corium 與 Debris 等熔融金屬之流動、冷卻與凝固等理論模式。同時，針對 CFD 程式內建熔融金屬流動模式、紊流擾動模式、熱傳與熱輻射模式以及凝固模式等，以建立熔融 Corium 由從壓力槽流出至圍阻體底部而遷移、擴散與凝固(Solidification)等熱流特性之 CFD 模擬能力。本計畫

兩年之研究成果，可運用 CFD 模擬熔融 Corium 在壓力槽外三維局部冷卻與凝固特性(包含熱輻射冷卻速率、固化速率以及凝固 Debris Bed 之形狀與高度等)，以協助嚴重事故系統分析程式如 MELCO 與 MAAP 等評估濕井灌水進入圍阻體底部以冷卻高溫熔融 Corium，進而減緩嚴重事故進入”Ex-Vessel” Phase 時發展等處理策略之有效性。本計畫亦能訓練與培養有關 CFD 與嚴重事故歷程的核能人才。而本計畫第一年預期完成之工作項目及成果如下：

- 完成 Corium 與 Debris 等熔融金屬之流動、冷卻與凝固等理論模式之蒐集、彙整與研究。
- 完成適合之 CFD 程式之篩選與副程式撰寫邏輯。
- 完成 CFD 程式所採用之熔融金屬流動模式、紊流擾動模式、熱傳與熱輻射模式以及凝固模式等之研究與評估。
- 完成熔融金屬之物理性質副程式之數值建入 CFD 程式。
- 完成 CFD 模擬熔融金屬熱水流特性之模式建立。

首先本計畫參考 Abe 等人(10)的實驗，進行 CFD 熔融金屬遷移、冷卻與凝固等模式的評估與校驗。其實驗為一直徑 20 公分與高度 150 公分的圓筒，噴射的液態金屬為 U-Alloy 78。噴射入口直徑為 0.5 公分，初速度為 4.2m/s，噴射時間為 0.148 秒，一共噴射 100 公克的液態金屬。而噴射金屬的初始溫度為 300 °C，冷卻水的初始溫度為 58 °C。圖 1 為實驗設施的示意圖，實驗設施包含下面主要部分：

- Water tank：用來凝結液態金屬並觀察其遷移特性
- Ejection equipment：用來加熱金屬並將其噴入 Water Tank
- Slide gate：至於 Water tank 上方，為絕緣所用

- Nitrogen pressure equipment：用來噴射液態金屬
- Heater：用來調節液態金屬的溫度
- Solenoid drawing-out equipment：用來開起液態金屬噴射
- Thermocouples：用來量測液態金屬的溫度
- High-speed video camera：用來觀察液態金屬落下的特性

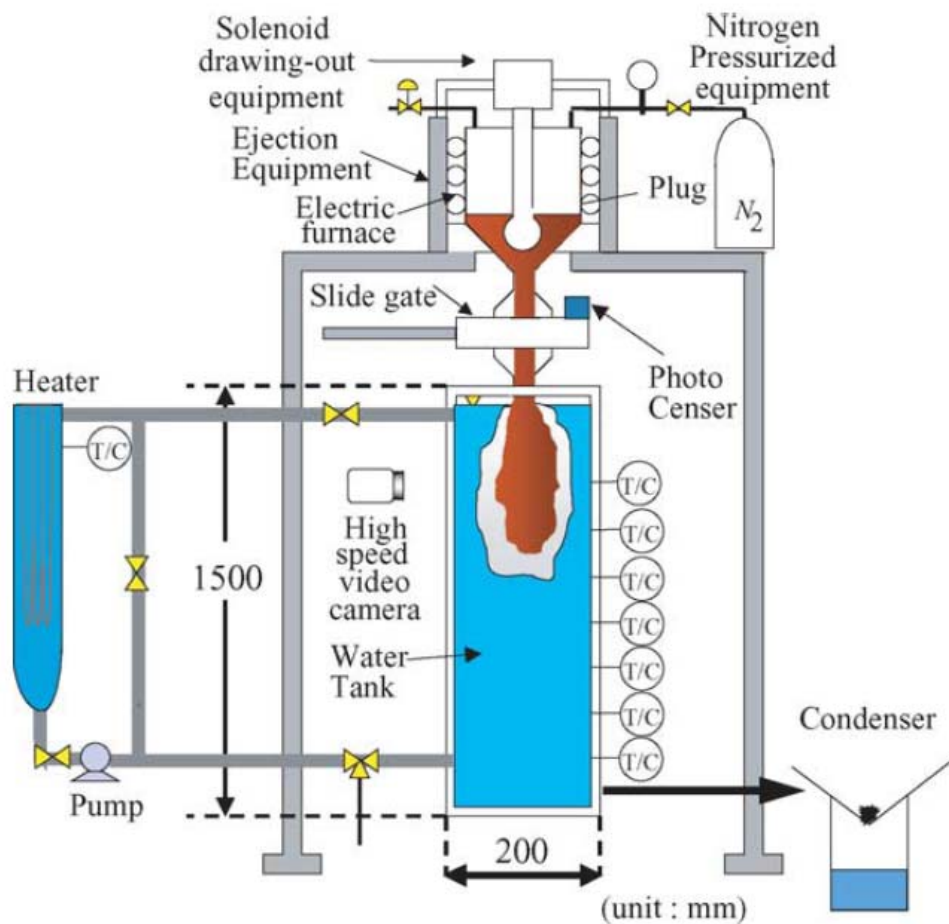


圖 1 實驗設施的示意圖

本研究首先採用二維(2-D)的簡化模擬，之後再進行三維的實際模擬。其中，三維格點圖顯示於圖 2 之中。

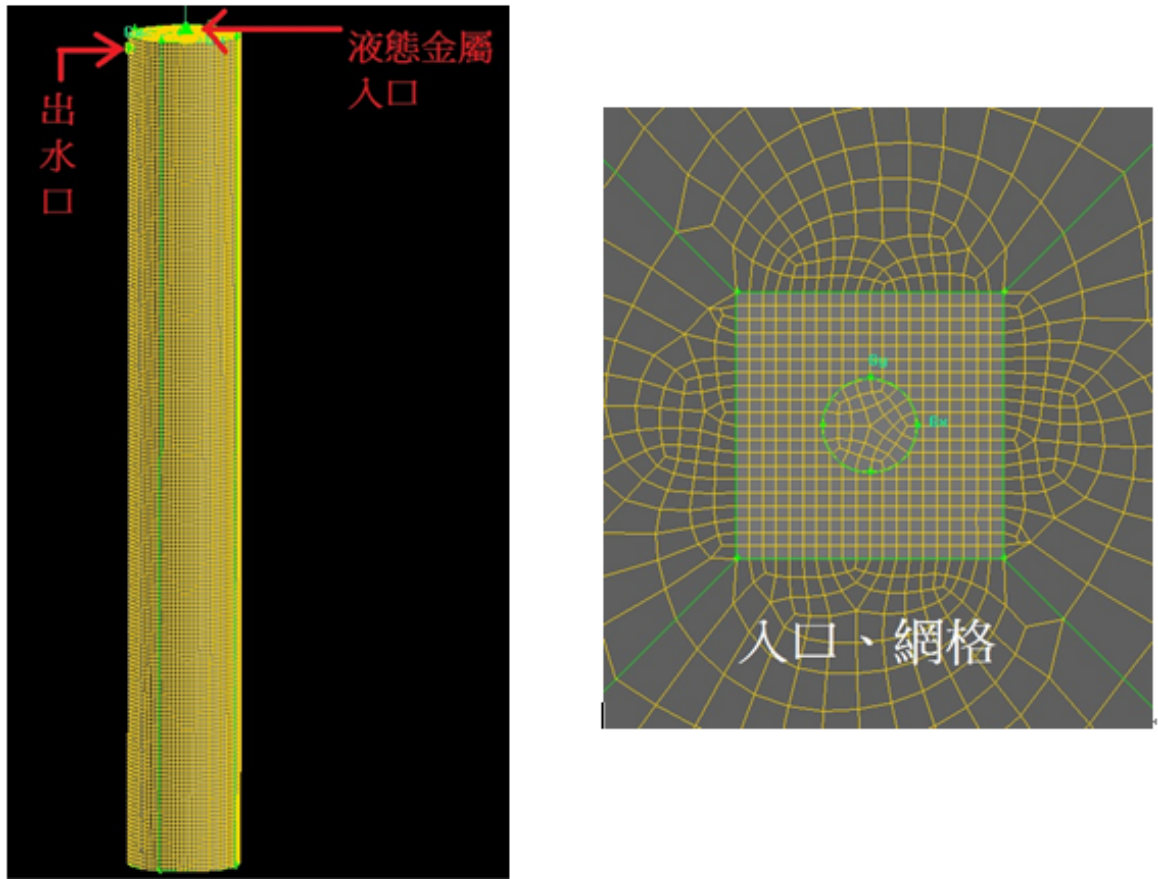
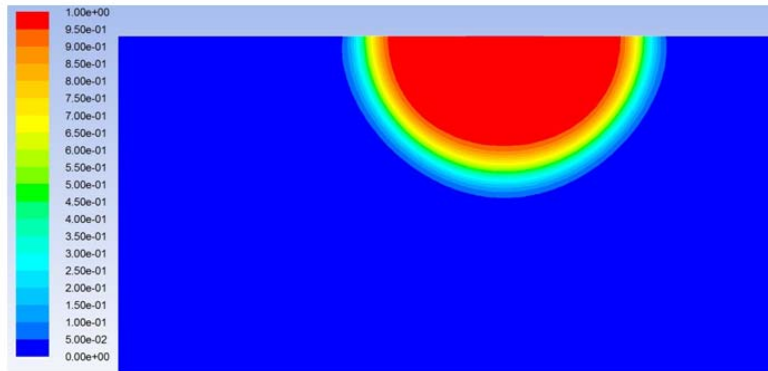
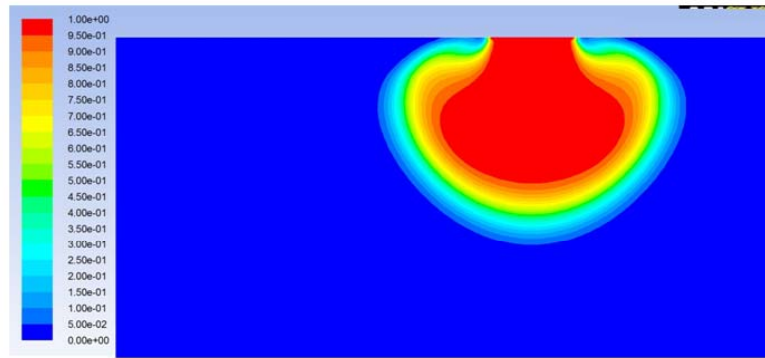


圖 2 模擬分析的格點圖

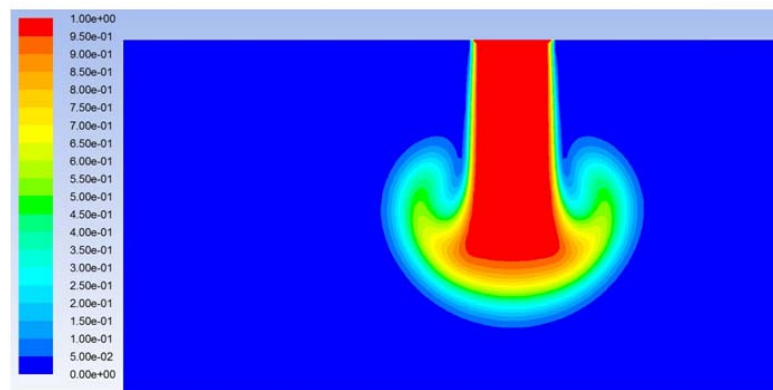
圖 3 先展示不同 A_{mush} (Mushy Zone Constant) 對液態金屬遷移特性的影響，圖中是顯示時間為 0.01 秒的計算結果，從此圖可以看出， A_{mush} 對於液態金屬凝結的形狀有較大的影響。因此，在進行三維模擬時，本研究亦進行不同 A_{mush} 值的靈敏度分析，並與實驗的觀察做比對，發現 $A_{mush} = 90$ 所計算液態金屬的凝結形狀較吻合實驗。故接下來的分析，本研究均採用這個數值。



(a) Mush Zone Constant = 5000



(a) Mush Zone Constant = 500



(a) Mush Zone Constant = 50

圖 3 不同 A_{mush} (Mushy Zone Constant) 對液態金屬遷移特性的影響

圖 4 為實驗量測與觀察的結果，其顯示高溫液態金屬注入低溫水中遷移、冷卻與凝固等特性之影像以及金屬前端位置與移動速度之量測值。圖 4(a)為高速攝影機所拍攝不同時間內液態金屬注入低溫水中遷移的特性；圖 4(b)為液態金屬前端位置隨時間的變化；而圖(c)則是液態金屬前端落下速度隨時間的變化。從此圖可以看出，在時間在 0.15 秒以後，液態金屬前端落下速度會達到一個定值，亦即所謂的終端速度(Terminal Velocity)。

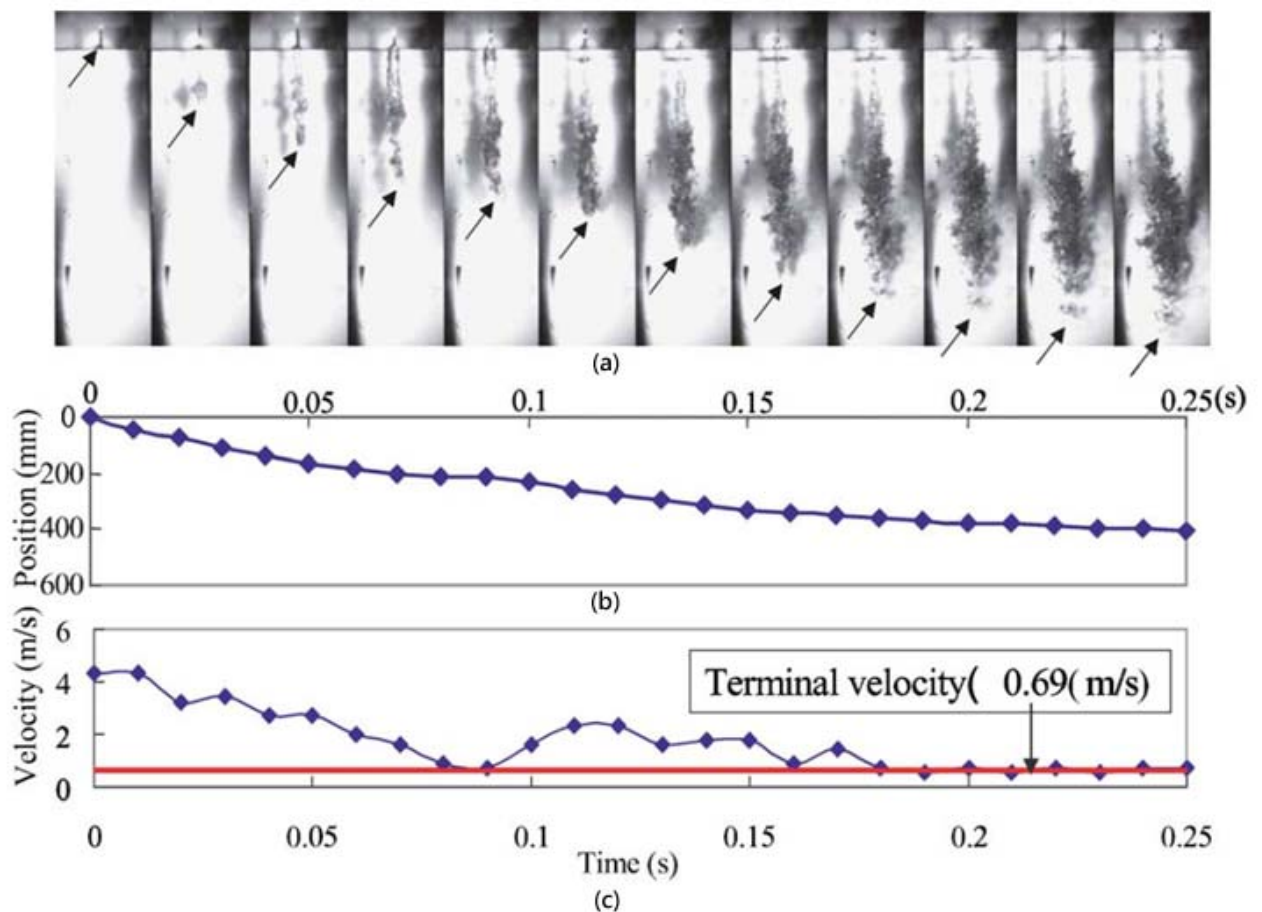
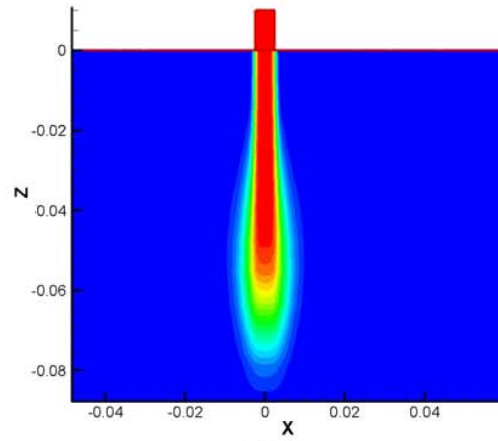


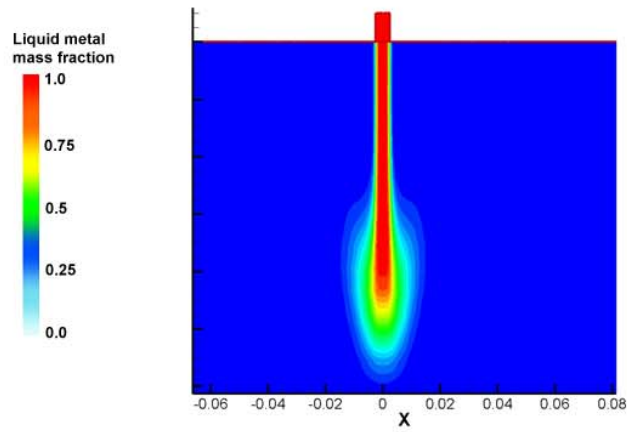
圖 4 (a)液態金屬注入低溫水中之影像；(b)金屬前端位置；(c)移動速度

而圖 5 則是本研究利用 CFD 進行實際三維暫態分析液態金屬凝結遷移的特性，此圖是以液體體積分率來表示液態金屬的分布特

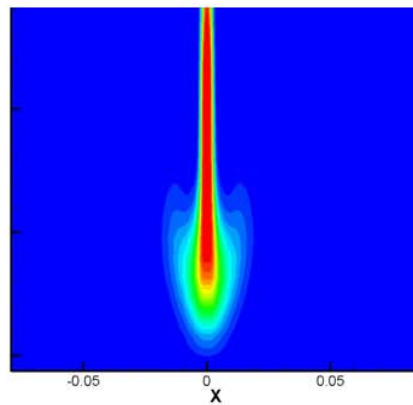
性，其中數值 0 為凝結的液態金屬(藍色)，數值 1 為未凝結的液態金屬(紅色)，而外界的水，我們也用藍色來表示。分析結果(如圖 5 所示)與實驗的照片(圖 4(a))相比較，兩者在液態金屬形狀上，非常類似。不過，在液態金屬與水交界處，也有一些分散液滴的不穩定現象，同時，水受高溫液態金屬加熱而沸騰的特性，是現有 CFD 程式無法模擬的。因此，也影響到液態金屬落下的速度，圖 6 顯示 CFD 預估液態金屬落下速度隨時間的變化，並與實驗量測值做比較。從此圖可以清楚看出，CFD 有低估液態金屬落下速度的現象現有的最終穩態速度上。同時，對於液態金屬終端速度而言，實驗值約為 0.69 m/s，而 CFD 預估值只有約 0.4 m/s。



(a)



(b)



(c)

圖 5 在(a) 0.05; (b) 0.1; (c) 0.15 秒時, 液態金屬分率之分布特性

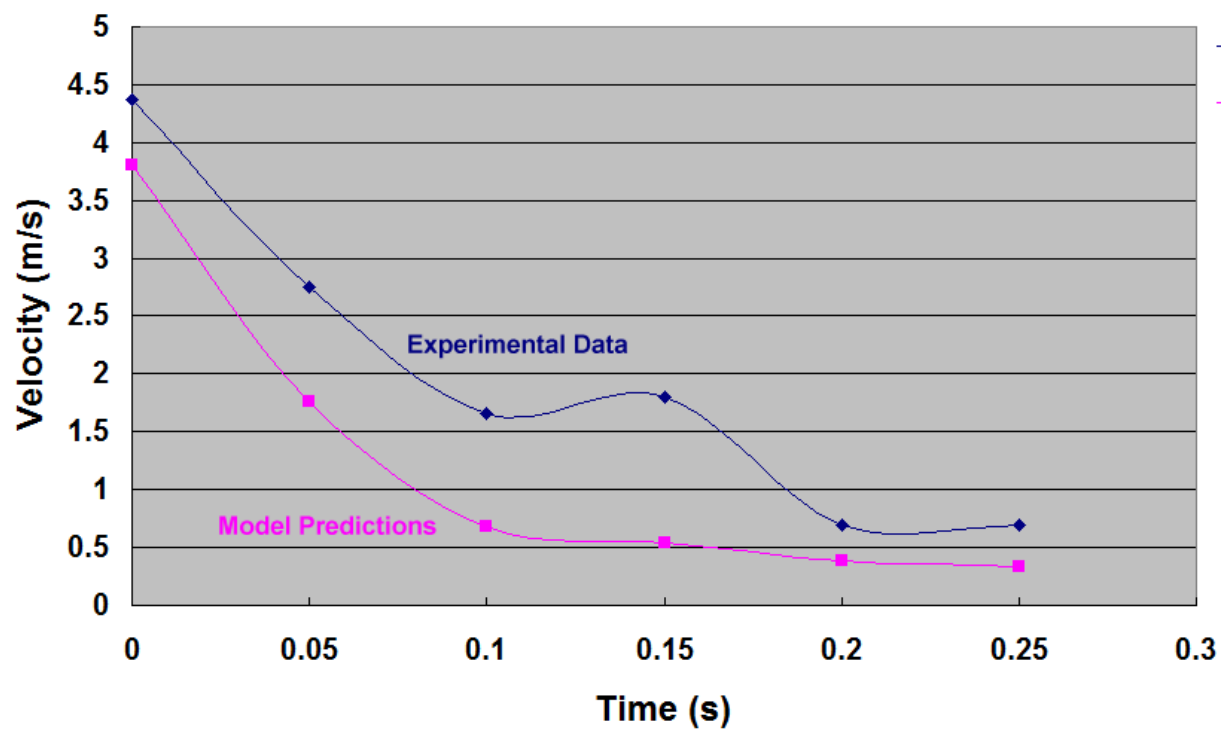


圖 6 實驗量測與 CFD 預測液態金屬落下最終速度之比較圖

參、結論與未來工作

依據本計畫之一年的研究結果，可得到下列幾項結論與未來工作；

- 現有商用 CFD 軟體的固化模式可以 qualitatively 模擬高溫溶溶液態金屬遷移與固化結合的現象，不過，在量化的數值上比對，呈現低估的現象。其結果顯示 CFD 之凝結固化的模式有其不足之處。其主要原因在與液態金屬與水交界處，一些分散液滴的不穩定與水受高溫液態金屬加熱而沸騰等現象，是現有 CFD 程式無法模擬的，如圖 7 所示。
- 解決凝結固化模式之缺失，也許是採用 Two-fluid model (Solid/Liquid) 並自行撰寫副程式，進行相關模擬與分析，可以進行改進。
- 未來 CFD 可以實際模擬 Corium 於爐槽外流動、冷卻與凝固等特性，如圖 8 所示。
- 運用參數靈敏度分析，找出影響 Corium 凝固形狀或高度之參數

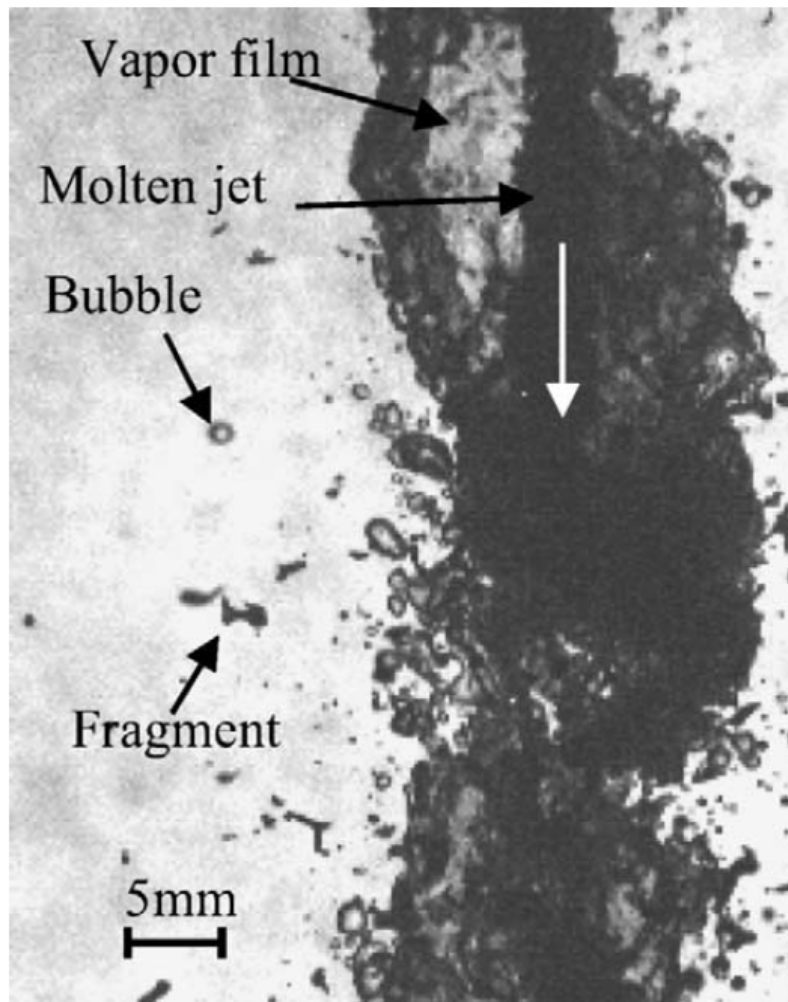
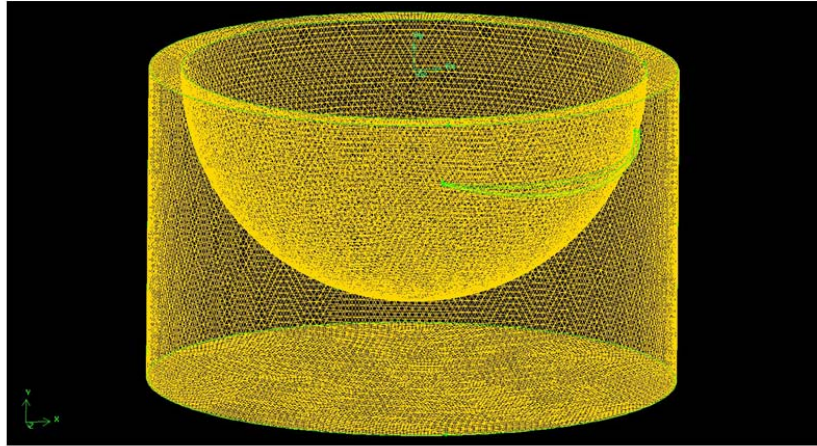
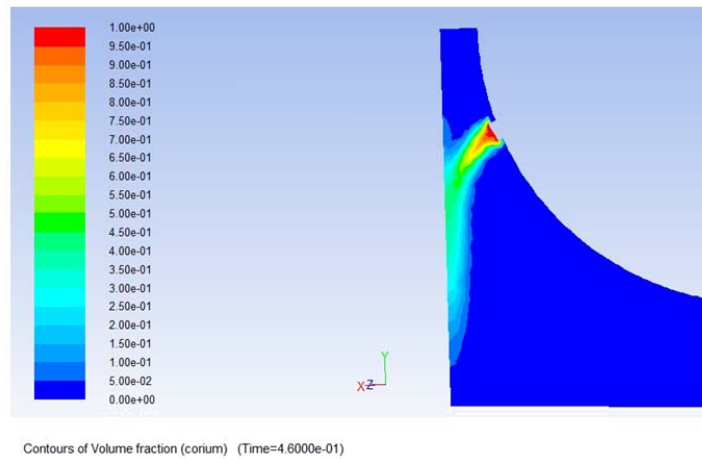


圖 7 水受液態金屬加熱產生紊流擾動與沸騰現象



(a)



(b)

圖 8 實際模擬 Corium 於爐槽外特性之格點圖(a); 液體分率分布圖(b)

参考文献

1. “MAAP4 Code Manual,” prepared for EPRI, Research Project 3131-02, Fauske and Associates Inc., 1994.
2. R.M. Summers et al., MELCOR 1.8.0: A Computer Code for Nuclear Reactor Severe Accident Source Term and Risk Assessment Analysis. NUREG/CR-5531, SAND 90-0364, Sandia National Laboratories, 1991.
3. C.M. Allison, E.C. Johnson, SCDAP/RELAP5/MOD2 Code Manual, NUREG/CR- 5273, EGG-2555, Idaho National Engineering Laboratory, 1989.
4. B. Spindler, J.M. Veteau, “The simulation of melt spreading with THEMA code Part 2: Assessment against spreading experiments,” Nuclear Engineering and Design 236, (2006), 425–441.
5. K. Moriyama, H. Nakamura, Y. Maruyama,” Analytical tool development for coarse break-up of a molten jet in a deep water pool,” Nuclear Engineering and Design, 236, (2006), 2010–2025
6. H. Alsmeyer et al., “Ex-vessel core melt stabilization research (ECOSTAR),” Nuclear Engineering and Design, 235, (2005), 271–284.
7. L.A. Dombrovsky, T.N. Dinh, “The effect of thermal radiation on the solidification dynamics of metal oxide melt droplets,” Nuclear Engineering and Design, 238, (2008), 1421–1429.
8. G. Pohlner et al., “Simulation of melt jet breakup and debris bed formation in water pools with IKEJET/IKEMIX,” Nuclear Engineering and Design, 236, (2006), 2026– 2048.
9. ANSYS Inc.. Fluent R12 User’s Guide. 2009.
10. Yutaka Abe, Tetsuya Kizu, Takahiro Arai, Hideki Nariai, Keiko Chitose, Kazuya Koyama, "Study on thermal-hydraulic behavior

