

行政院及所屬各機關出國報告

(出國類別：實習)

二氧化碳固定和海水淡化處理技術的發展

服務機關：台灣電力公司
出國人職稱：化學師
姓名：藍啟仁
出國地區：日本
出國日期：92年6月18日
報告日期：92年8月26日

43/
/C09202131

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：二氧化碳固定和海水淡化處理技術的發展

COP20 2131

頁數 38 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台灣電力公司

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

藍啟仁/台灣電力公司/綜合研究所/化學師/02-26815424ext2242

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：92年6月18日~92年6月27日

出國地區：日本

報告日期：92年8月26日

分類號/目

關鍵詞：二氧化碳、化學法二氧化碳固定、海洋儲置、地下層儲置、薄膜分離技術

內容摘要：(二百至三百字)

職本次出國任務係赴慶應義塾大學拜訪 TSUGE 教授，實習化學法二氧化碳固定和薄膜海淡相關技術；以及前往地球環境產業技術研究機構，與 OHSUMI 博士討論並實習物理法固定二氧化碳相關技術。在拜訪 TSUGE 教授期間，實習內容包括有非球型氣泡形成模式、二相不溶性和可溶性氣泡在管柱的行為、氫氧化鎂製備碳酸鎂的技術和逆滲透膜分離技術等。雖然 TSUGE 教授所進行研究工作，較偏重於基礎理論探討，然而此部份研究工作恰屬職現行所進行研究工作所欠缺的部份，相信可做為後續相關研究工作的參考。另在地球環境產業技術研究機構實習物理法固定二氧化碳相關技術，則分別針對現行日本國內正進行中的海洋二氧化碳儲置和地下層儲置二氧化碳的研究現況，與 OHSUMI 博士進行研習討論。其中，將二氧化碳注入海洋進行儲置，雖為日本擬推動的二氧化碳減量策略，但仍需在海洋生態衝擊和廢棄物海拋國際相關法規的限制，做進一步的釐清和克服。由於我國地理環境與日本相類似，因而相關此領域的研究主題，可提供做為我國政府未來在二氧化碳減量技術發展與策略規劃上的參考。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://report.gsn.gov.tw>)

目錄

	頁次
壹、緣由.....	1
貳、考察行程說明.....	1
參、實習化學法固定二氧化碳與薄膜相關技術.....	2
肆、實習物理法固定二氧化碳相關技術.....	23
伍、心得與建議.....	38

壹、緣由

由於二氧化碳為導致全球溫室效應日趨嚴重的主要因素，因此，國外各先進國家正相繼投入大量人力與研究經費，全力推動相關二氧化碳再循環利用與固定處理的研究工作。另外，水資源的獲得問題，亦為人類即將面臨的另一重要課題；其中海水淡化處理技術的開發，已成為目前一個極具潛力與熱門的重要研究課題。因此，本研究初期除擬持續針對現行期刊文獻中，所報導的相關技術進行收集、歸納與評估；另將派員赴國外相關機構實習研究工作推動現況，進而規劃並提出相關的技術方案，以提供本公司相關單位業務上的參考。

對於日本慶應義塾大學(Keio University)應用化學系 TSUGE, Hideki 教授而言，其係屬在薄膜應用及利用化學法固定二氧化碳研究領域專精的學者；其所規劃研究領域與該實驗室所進行的研究計畫，恰與本次出國實習任務相吻合，因而派員前往該實驗室實習薄膜相關技術與其在海淡製程的應用，以及利用化學法固定二氧化碳的應用潛力。至於地球環境產業技術研究機構(Research Institute of Innovative Technology for the Earth)，則是目前負責日本相關二氧化碳減量技術發展的統籌單位。因此，基於相關二氧化碳減量固定研究計畫的需求，乃派員赴該單位拜訪 OHSUMI, Takashi 博士，討論並實習物理法固定二氧化碳相關技術的發展現況及應用潛力。相信所獲得較完整的技術資訊及實務經驗，對於本所現行相關研究工作的順利推行，將有顯著的俾益。

貳、考察行程說明

下表所示為職赴日實習「二氧化碳固定和海水淡化處理技術的發展」的行程概要表。

日期	工作紀要
92年6月18日	往程(台北--東京)
92年6月19-23日	慶應義塾大學(實習(1)薄膜相關技術與其在海淡製程的應用，(2)化學法固定二氧化碳的應用潛力，(3)資料整理)
92年6月24日	東京--京都
92年6月25-26日	地球環境產業技術研究機構(實習物理法固定二氧化碳相關技術)
92年6月27日	返程(京都--大阪--台北)

參、實習化學法固定二氧化碳與薄膜相關技術

Prof. Hideki TSUGE 拓植秀樹教授



現職：教授(Professor)，應用化學科(Department of Applied Chemistry)，理工學部(Faculty of Science and Technology)，慶應義塾大學(Keio University)。

學歷：畢業於慶應義塾大學，1973年獲得應用化學博士學位。

專長領域：(1)氣泡形成機制(Bubble Formation) (2)湧升氣泡的行為(Behavior of Rising Single Bubble) (3)氣泡管柱的水動力學和質量移轉(Hydrodynamics and Mass Transfer in Bubble Column) (4)反應結晶法(Reactive Crystallization) (5)逆滲透分離技術(Reverse Osmosis Separations) (6)氣固流體控制(Gas Solid Fluidization Control)。

一、TSUGE 教授研究室專長領域背景介紹

(1)氣泡形成機制(Bubble Formation)

二氧化碳氣體和 SO_x 和 NO_x 等空氣成份，係屬導致溫室效應的污染氣體，已成為大家所關切的嚴重環境問題。為期能將工業產業所排放廢氣中，相關二氧化碳氣體、SO_x 和 NO_x 等空氣污染氣體，予以有效去除，高效率氣體吸收劑的開發是有其必要性。特別值得注意的，即是一些在溶劑中具高溶解性的氣體，則當該氣體由氣體分散器釋放之後，其在溶劑中的氣泡特定行為的預測是有其必要性。

(2)湧升氣泡的行為(Behavior of Rising Single Bubble)

如何預估一個上昇氣泡在管柱中的持滯時間(Residence Time)和所具備表面積大小，為釐清該氣泡在氣泡管柱(Bubble Column)中，氣相-液相流體動力學(Fluid Dynamics)必要的基本條件。然而，上述條件卻和氣泡的上昇速度和形狀有著密切關係。唯基於氣泡的上昇速度和氣泡的形狀之間是否具有相關性，係屬一個值得深入探討的課題，因此，如何建構一組氣泡形狀圖譜(Bubble-Shape-Map)和單一氣泡上昇速度間的校正方程式(Correlation Equation)為該實驗室現行的研究重點。

(3) 氣泡管柱的水動力學和質量移轉(Hydrodynamics and Mass Transfer in Bubble Column)

Tsuge 教授實驗室現正擬將氣泡管柱(Bubble Column)技術，應用做為生物反應器。然而在進行高密度發酵作用(Highly Populous Fermentation)和聚合物的代謝反應(Polymeric Metabolism)等實驗時，通常媒介溶液的流體特性將轉變成具高黏性的非牛頓(Non-Newtonian)性質。例如當有觸媒(Catalyst)或微細生物體(Microorganisms)存在於氣泡管柱中，則管柱中的流體動力特性將轉變成具氣體—液體—固體三相流體性(Fluidization)，此時該流體動力學(Hydrodynamics)將呈現非常複雜的特質。因此，為提昇氣泡管柱中氣相—液相之間的混合效果，以及質量移轉效能，該實驗室將採以外部迴路氣舉式氣泡管柱(External Loop Air Lift Bubble Column)和多階段氣泡管柱(Multistage Bubble Column)的改善對策來探討其可能性。

(4) 反應結晶法(Reactive Crystallization)

為期二氧化碳能藉由與海水中的陽離子進行反應作用而予以轉變成碳酸鹽，則相關該反應結晶假說(Reactive Crystallization Phenomena)的釐清是有其必要性。例如：將火力電廠所排釋的煙氣，導入製鹽廠所排放具高濃度鎂離子和鈣離子的海水中，則煙氣中的二氧化碳將被轉變成碳酸鎂和碳酸鈣，進而可從氣相中被分離去除。雖然上述結晶顆粒可被應用做為建材或肥料，然而適當結晶顆粒的大小和形狀仍是有其應用要求。目前該實驗室首要工作即在釐清二氧化碳與鎂離子和鈣離子作用轉變成碳酸鹽的結晶機制，進而提出適當的結晶操作條件。

(5) 逆滲透分離技術(Reverse Osmosis Separations)

薄膜分離技術已廣泛被應用於生物產業中，相關產品的分離與純化處理，例如逆滲透(Reverse Osmosis)技術已商業化被應用以進行乳酪中蛋白質的萃取濃縮。唯在進行乳漿的逆滲透技術處理時，卻常遭遇有機質污物黏著於薄膜表面和阻塞於薄膜孔隙的問題，因而導致薄膜分離效率的降低、減降流體可過濾通量和縮短薄膜的使用壽命。至今上述導致原因仍不十分明確，因而該實驗室擬進一步釐清利用逆滲透技術處理乳酪中蛋白質的萃取濃縮時，其所衍生機質污物黏著於薄膜表面和阻塞薄膜孔隙的形成機制。

(6) 氣固流體控制 Gas Solid Fluidization Control

對於流體化床燃燒器而言，相關流體化床的循環技術已十分成熟；唯當利用循環流體化床來充當催化氣相反應器，相關觸媒顆粒循環流速的控制，則成為一個極為重要的參數。因此，霧化閥的設計成為必備的要件，為期能將觸媒顆粒予以有效的傳輸，目前該實驗室已自行發展出具備二股氣流注射的J型霧化閥。

二、實習心得

Tsuge 教授將其最近發表於期刊論文提供職參考並作說明介紹，現將實習內容心得概述如下：

(A) 「Two Phase Bubble Formation with Condensation at Nozzle Submerged in Immiscible Liquid」; Koichi Terasaka, Tirto Prakoso, Wan-Yong Sun and Hideki Tsuge; J. Chem. Eng. Japan, 2000(33)113-119.

摘要

配合利用噴嘴將具備不互溶液體(Immiscible Liquid)和可凝結性氣泡，直接注入溫度較低的液相中，以製備得粒徑大小均勻的液滴(Liquid Droplets)。研究中為估計所製備得液滴的粒徑大小，Tsuge 實驗室乃自行建立一個包括有相變化(Phase Change)的非球型氣泡形成模式(Non-Spherical Bubble Formation Model)來進行模擬。在自行所建立模式的應用條件下，相關二相氣泡成長曲線、氣泡型態的改變和均勻分散液滴莫耳數等項目，皆可予以模擬。經由與實驗結果的比對，可得知實際所獲得的實驗值和模式所模擬的結果相一致。

前言

於 1993 年，Tsuge 教授實驗室即已建立並提出非球型氣泡形成模式的理論，在本論文中則將更進一步深入探討相關二相氣泡的行為和氣泡液滴在連續液相中，其液滴大小和分散的相關特性。

(1)非球型氣泡形成模式的基本概念(Concept of Non-Spherical Bubble Formation Model)

圖 1 所示係一個非球型氣泡形成模式的概要圖示。 Q_v 所示係經由噴嘴所注入蒸氣的流速，且當蒸氣注入溫度較冷且不互溶液體中，則該蒸氣將冷凝而形成具有二相(蒸氣相(Vapor Phase)和凝結相(Condensate Phase))的氣泡液滴。對於二相氣泡液滴而言，其整個體積(V_b)係包括有蒸氣相(V_v)和凝結相(V_c)，亦即 $V_b = V_v + V_c$ 。假若凝結層的平均厚度(Mean Thickness; δ)係遠低於氣泡的直徑，則 δ 數值的估計可以下列數學式來予以表示。

$$\delta = V_c/A$$

其中， A 為所成長氣泡液滴的表面積。

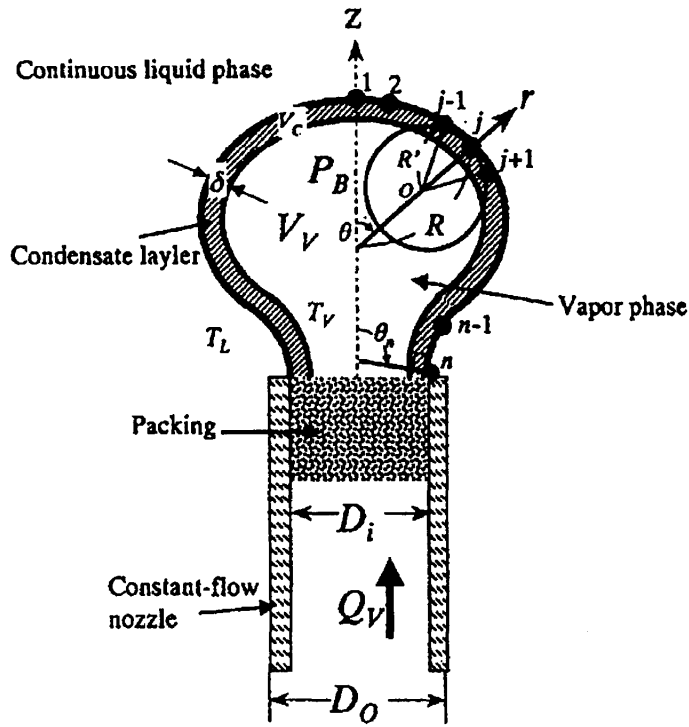


Fig. 1 Schematic diagram of non-spherical bubble formation with phase change under constant-flow condition

圖 1、非球型氣泡形成模式的概要圖示。

(2) 氣泡和連續流動液相界面的熱量移轉(Heat Transfer at Interface between Vapor in Bubble and Continuous Liquid Phase)

圖 2 所示係氣泡液滴表面熱量移轉的機制。對於連續流動液相(Continuous Liquid Phase; T_L)而言，其液體溫度係假設保持固定不變；至於蒸氣相的溫度，則亦係假設保持於沸點的溫度(T_V)。此時，對於蒸氣相與連續流動液相之間，相關熱傳的表示方式，則可以下列數學式來予以表示。

$$1/U = 1/h_G + 1/h_D + \delta/k_C + 1/h_L$$

其中， U 為總熱傳係數(Overall Heat Transfer Coefficient)、 h_G 為氣相對流熱傳係數(Heat Transfer Coefficient for Convection in Gas Phase)、 h_D 為直接接觸冷凝熱傳係數(Heat

Transfer Coefficient for Direct Contact Condensation)、 k_c 為凝結膜的平均流熱導度 (Mean Thermal Conductivity in Condensate Film)、 δ 為平均膜厚度 (Mean Film Thickness) 和 h_L 為連續流動液相熱傳係數 (Heat Transfer Coefficient for Convection in Continuous Bulk Liquid)。

當將蒸氣注入連續流動液相時，於初始階段，由於氣泡表面的氣相膜 (Gas Film) 和液相膜 (Liquid Film) 尚未形成，因而 $1/h_G$ 和 $1/h_L$ 二項可予以忽略；此時，相關氣泡總熱傳係數的表示方式，可予以簡化為 $1/U=1/h_D + \delta/k_c$ 。另假若所形成氣泡其表面積係呈幾何對稱，相關熱通量 (Heat Flux; q) 的計算，則可以 $q=U(T_V-T_L)$ 來予以表示。

至於蒸氣相 (Vapor Phase) 和凝結層 (Condensate Layer) 之間的介面，蒸氣相所損失的潛熱 (Latent Heat)，以及冷凝所導致的莫耳凝結速率 (Molar Condensation Rate; n_c) 的表示方式，則為下列數學式所示。

$$n_c = qA / \lambda$$

因而氣泡形成，相關其凝結相體積 (V_c) 的計算，則可依據下列數學式來予以估算獲得。

$$V_c = Mw / \rho_c \int_0^t n_c dt$$

其中， Mw 和 ρ_c 係分別為凝結相的分子量和密度。

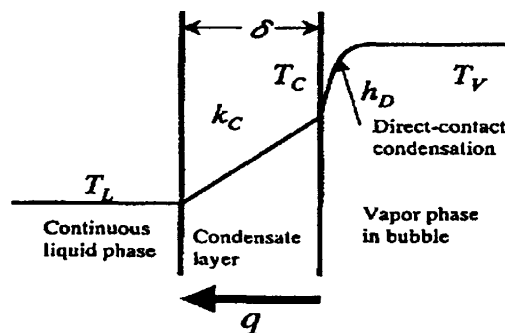


Fig. 2 Heat transfer at interface on bubble

圖 2、氣泡液滴表面熱量移轉機制的圖示。

(3) 二相氣泡的壓力變化(Pressure Change in Two Phase Bubble)

下列所示係相關二相氣泡其壓力改變的數學式。

$$dP_B/dt = (n_V - n_C)R_G T_V / V_V - P_B / V_V \{dV_B/dt - n_C M_w / \rho_C\}$$

其中， P_B 和 R_G 係分別代表氣泡的壓力和氣體常數。對於數學式右側第一項式其係代表蒸氣注入時壓力的增加值，第二項式其係代表氣泡膨脹時的壓力變化量。至於注入氣泡中的蒸氣流量速率(Q_V)則可予以轉變成莫耳流量速率(n_V)，參見下述數學式所示。

$$n_V = P_B Q_V / R_G T_V$$

假若當 P_B 和 T_V 值與時間無關時，則 n_V 和 Q_V 將為一常數。

(4) 等半徑的定義(Definition of Equivalent Radii)

依據圖 1 所示可得知，氣泡表面係分隔成許多二維軸向對稱的單位(Two-dimensional Axisymmetric Elements)，其與氣泡曲度(Curvature)的二個主要半徑 R 和 R' 有關。其中，相關半徑的估算係以 \check{R} 來予以表示， $1/\check{R} = 1/2[1/R + 1/R']$ 。

(5) 氣液介面之間的壓力平衡(Pressure Balance on the Gas-Liquid Interface)

一般對於氣泡的形狀係假設其為球型，且其半徑設定為 R ；此時，相關氣泡膨脹其氣液介面的壓力關係式，則如下述數學式所示。

$$P_B - P_H = \rho_L \{R \times d^2R/dt^2 + 3/2(dR/dt)^2\} + 2(\sigma_{VC} + \sigma_{CL})/\check{R} + 4\mu_L dR/Rdt$$

其中， P_H 、 ρ_L 和 μ_L 係屬流體靜力學的壓力(Hydrostatic Pressure)、密度(Density)和黏稠度(Viscosity)；數學式右側第一項係表示氣泡的慣性壓力(Inertial Pressure)， $P_B - P_H$ 係表示氣泡內側與外側的壓力差值， $2(\sigma_{VC} + \sigma_{CL})/\check{R}$ 則係表示氣泡的表面張力，至於數學式右側第三項係表示液體的黏稠阻力(Viscous Resistance)。

(6) 湧升氣泡的移動數學式(Motion Equation of a Rising Bubble)

在現行所使用的模式中，相關二相氣泡移動的數學方程式，主要與慣性力(Inertial Force)、

浮力(Buoyancy Force)、噴口處的表面張力(Surface Tension at the Orifice)、上昇氣泡所面臨的黏稠阻力拖曳(Viscous Drag of the Rising Vapor Bubble)和蒸氣注入時的動量(Vapor Momentum Rate into the Bubble)等，參見下述數學式所示。

$$d(M'dz/dt)/dt = (\rho_L - \rho_B')V_{BG} - \pi D_i(\sigma_{VC} + \sigma_{CL}) - 1/2 \times C_D \rho_L (dz/dt)^2 \\ \times (\pi D_M^2) / 4 + 4 \rho_V Q_V^2 / \pi D_i^2$$

其中，M'為實際上的質量(Virtual Mass)，D_M為氣泡水平向最大的直徑，C_D為Reynolds數值的函數；最後相關氣泡的平均密度(ρ_B')，則可由下列數學式來予以計算得。

$$\rho_B' = (\rho_C V_C + \rho_V V_V) / V_B = \rho_C \varepsilon + \rho_V (1 - \varepsilon)$$

其中，ε係表示凝結相的體積比。

(7)分散液滴莫耳數的估計(Estimation of Molar Number of Dispersed Droplet)

當一個二相氣泡由噴口位置完全脫離之後，則此二相氣泡於上昇過程中，將因流動液體相溫度較低的關係，而完全凝結並成為液滴。此時，相關液滴莫耳數的計算，則可由下述數學式來予以估算。

$$m = \rho_B' V_B / M_w$$

實驗部份

圖3所示係整個實驗的設備構造圖。本實驗中係己烷和乙酸乙烯酯有機溶劑做為分散蒸氣和凝結相，另以經有機溶劑飽和處理的蒸餾水充當連續流動液相。首先有機溶劑經由蒸餾器加熱繼而揮發，蒸氣經由噴嘴口而注入曝氣管柱；藉由壓力控制，可獲得持續穩定的氣泡以利實驗觀察。該系統備有溫度控制裝置，以為避免連續流動液相蒸餾水的溫度過高而沸騰；以及高速照相機(High Speed Video Cameras)，以做為二相氣泡成長的實際觀測。

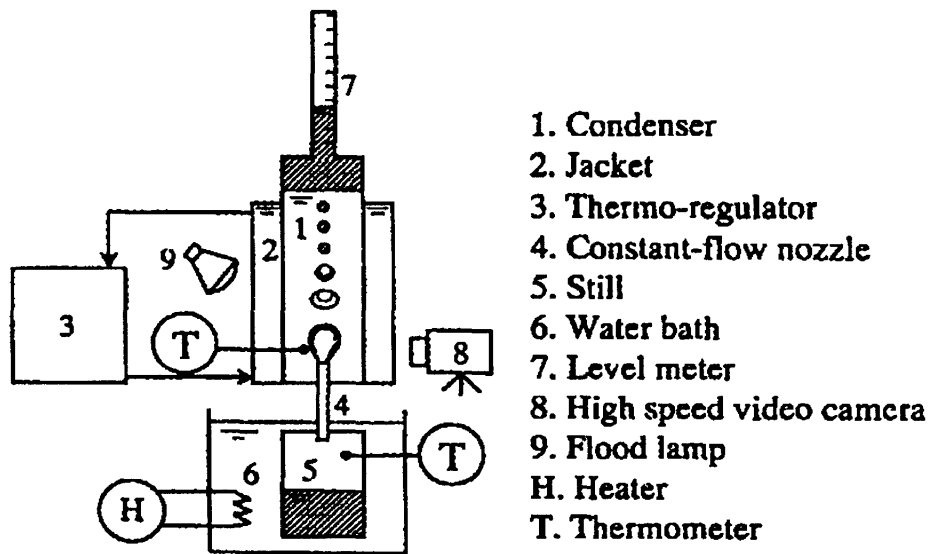


Fig. 3 Experimental apparatus

圖 3、實驗所使用設備的概要構造示意圖。

實驗中所使用以產生二相氣泡的有機溶劑為己烷(Hexane)和乙酸乙烯酯(Vinyl Acetate)，相關該有機溶劑物理化學性質則參見表 1 所示。

表 1、己烷和乙酸乙烯酯有機溶劑的物理化學性質

有機溶劑	己烷	乙酸乙烯酯
分子量(Mw)	86.18	86.20
蒸氣相密度(ρ_v ; Kg/m ³)	3.070	3.035
凝結相密度(ρ_c ; Kg/m ³)	615	870
於 V-C 相介面的表面張力 σ_{vc} [N/m]	0.0504	0.0187
於 C-L 相介面的表面張力 σ_{cl} [N/m]	0.0138	0.00713
熱傳導性 Kc[W/(mk)]	0.135	0.135
潛熱 λ [J/mol]	2.89×10^4	3.28×10^4
沸點 [K]	343.7	346.9
水中溶解度[wt%]	—	2.3

V-C：蒸氣相和凝結膜的介面。

C-L：凝結膜和連續流動液體相的介面

實驗結果

圖 4 所示係於己烷蒸氣流量速率(Q_v)為 0.15×10^{-6} – $5.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 和乙酸乙烯酯蒸氣流量速率(Q_v)為 1.5×10^{-6} – $5.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ，且噴嘴口內徑(D_i)為 $2.00 \times 10^{-3} \text{ m}$ ，噴嘴口外徑(D_o)為 $2.64 \times 10^{-3} \text{ m}$ 和連續流動液體液位的高度為 0.5 公尺條件下；進行實驗所獲得實際氣泡的成長圖譜，以及利用 Tsuge 實驗室自行所建立非球型氣泡形成模式的模擬氣泡成長圖譜。經由理論模擬和實際氣泡成長圖譜的比對，可明確得知在不同時間條件下，經由非球型氣泡形成模式所模擬的氣泡成長圖譜，都可與實驗所獲得實際氣泡的成長圖譜相吻合。

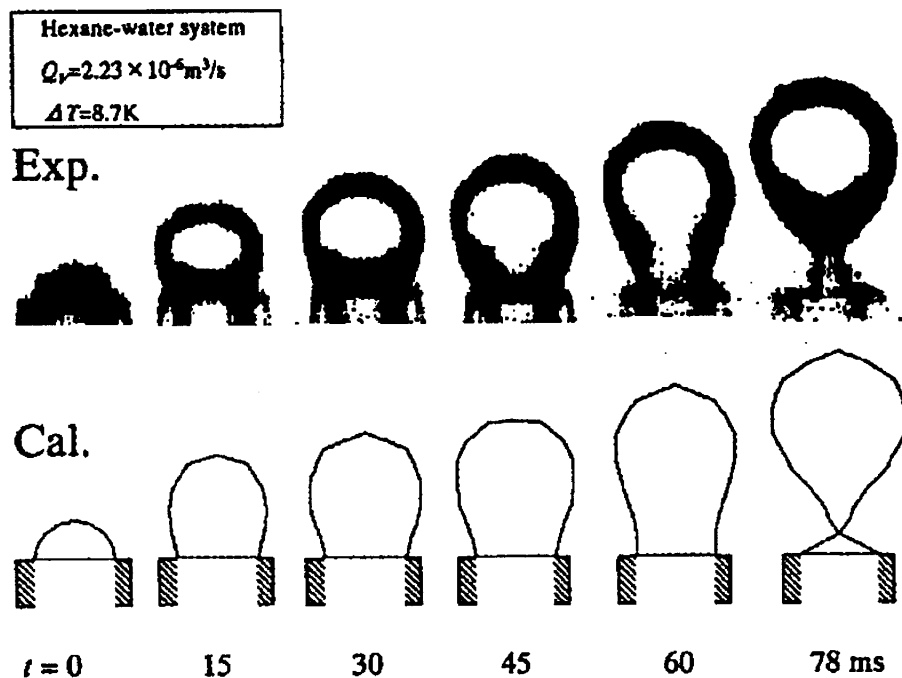


Fig. 4 Comparison of bubble shapes between photographed and estimated

圖 4、實驗所獲得實際氣泡和非球型氣泡形成模式模擬氣泡成長的比對圖譜。

(B) 「Ammonia absorption from a bubble expanding at a submerged orifice into water」; Koichi Terasaka, Junko Oka and Hideki Tsuge; Chem. Eng. Sci. 2002(57)3757-3765.

摘要

將含氨和氮成份的混合氣體以氣泡形式曝氣於水中，繼而以探討氣泡特性中，含可溶水性和不可溶性成份吸收的反應機制。其中，藉由進氣(Inlet Gas)氣體成份組成、氣體流速和氣腔體積等條件的改變，可據以觀察獲得氣泡的成長曲線(Growth Curve)、氣泡的成長體積(Volume)、氣泡成長的表面積(Surface Area)和氣泡成長的形狀(Shape)。依據實驗結果可得知，氣泡體積係隨著氣泡氣體組成中氮成份比率的增加、氣腔體積減小和氣體流速降低等因素，為呈現縮減的現象。

為期能針對氣相與液相之間的質量移轉(Mass Transfer)做一合理的敘述，相關氣相、介面相(Interface)和液相等的質量移轉將做一深入的探討，以評估整體質量移轉阻抗(Overall Mass Transfer Resistance)。在本研究中利用非球形氣泡形成模式(Non-Spherical Bubble Formation Model)並結合整體質量移轉阻抗(Overall Mass Transfer Resistance)，將可有效的模擬實際氣泡的形狀、氣泡脫離噴嘴口位置的體積、氣泡成長速率和質量移轉速率。另外，改變氣泡組成成份濃度與氣泡成長時間，以及於氣泡形成過程中所導致部份吸收的情境，亦將予以模擬。

基礎理論介紹

(1) Mechanism of Mass Transfer

對於內含二種氣體組成(一種具極易溶解特性，另一種則為不互溶特性)的氣泡而言，當該氣泡由噴嘴口處形成產生並注入適當吸收劑中，則氣泡中具極易溶解特性的氣體成份，將於氣-液相介面之間迅速進行質量移轉。則相關氣-液相介面之間質量移轉的機制則參見圖 1 所示。

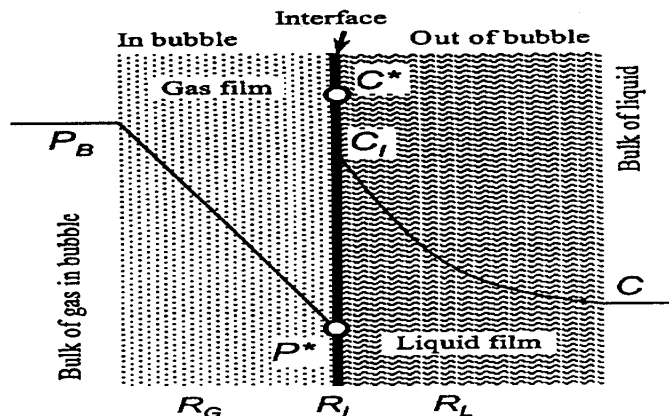


Fig. 1. Mass transfer through bubble surface.

圖 1、氣泡表面質量移轉機制的圖示。

(1-1) Mass Transfer in the Liquid Phase

對於具極易溶解特性氣體成份而言，在靜態液相中且氣-液相接觸時間為 t 條件下，相關其所顯現立即質量移轉係數(Instantaneous Mass Transfer Coefficient; k_L)係以 Higbie's Equation 來予以估計。

$$k_L = (D_L / \pi t)^{1/2}$$

其中， D_L 為在液相中的擴散性(Diffusivity)。當質量通量的消耗是藉由在液相中化學反應所導致，此時 k_L 將乘以一個增強係數(Enhancement Factor; β)而更改以 k_L' 來替代，亦即 $k_L' = \beta k_L$ 。

(1-2) Mass Transfer at the Gas-Liquid Interface

假若在氣-液相介面，雖然某一氣相組成成份其質量移轉速率非常大，唯由於氣體分子與液相表面的碰撞速率係受氣體分子本身動能的限制，因而氣相組成成份其質量移轉速率不可能為無限大。因此，相關氣相組成成份其穿越氣-液相介面的質量移轉係數(Mass Transfer Coefficient; K_I)，將可由下列數學式來予以表示。

$$K_I = 1006 \alpha / (2 \pi \Phi T)^{1/2}$$

其中， Φ 和 T 分別為氣體常數和溫度， α 則為蒸發係數(Evaporation Coefficient)。

(1-3) Mass Transfer in the Gas Phase

對於氣泡表面內側的氣流，通常係假設為層流(Laminar Flow)狀態；唯在本研究中則認為氣體流出噴嘴口之後，該氣體將沿著氣泡表面做旋轉流動。假設氣體流速係維持在流出噴嘴口之後的氣體流速 μ_0 ，則

$$k_G l / D_G = 0.664 (\rho_G \mu_0 l / \mu_G)^{1/2} (\mu_G / \rho_G D_G)^{1/3}$$

其中， k_G 和 D_G 分別為氣相中溶質成份的質量移轉係數和擴散性；至於接觸面積的大小(1)，則假定為氣泡周邊長度的一半。

(1-4) Overall Resistance of Mass Transfer over the Gas and Liquid Phases

對於氣泡至液相之間其質量移轉的阻力主要可區分為三部份，如圖 1 所示分別為氣相本體 (Bulk of the Gas) 至介面、介面本體、和介面至液相本體 (Bulk of the Liquid)；因此，相關液相的整體質量移轉係數 (K_L)，則可以下列數學式來予以表示。

$$1/K_L = H/K_G + H/K_I + 1/\beta K_L = \sum R$$

(1-5) Mass Balance of a Gas in a Bubble

對於氣泡至吸收液之間，相關立即質量移轉速率 (Instantaneous Mass Transfer Rate; N) 可由下述數學式來予以表示。

$$N = K_L a \Delta C$$

其中， N 和 a 分別代表質量移轉速率和氣泡表面積， ΔC 係表示飽和溶液和液體本體之間的溶質濃度差值。至於經某一作用時間 (t) 之後，被吸收溶質量的計算，則將為下述數學式所示。

$$v(t) = \int_0^t N dt$$

於質量平衡條件下，相關氣泡內可溶性成份的組成可由下述數學式來予以估計。

$$y = y_F G_B - v(t) / G_B - v(t)$$

其中， y_F 為進氣時可溶解性成份所占的莫耳比率組成， G_B 為進氣時氣體成份的總莫耳數 (包括：可溶解性和不可溶氣體成份)。

(2) Modeling of Non-Spherical Bubble Formation

圖 2 所示係利用非球型氣泡形成模式配合質量移轉，來進行模擬的示意圖。相關模式探討的參數內容，包括有氣腔內壓力的改變 (Pressure Change in a Gas Chamber)、氣泡脫離噴嘴口時壓力的減降 (Pressure Drop through an Orifice)、氣泡的等量半徑 (Equivalent Radii)、氣泡表面壓力的平衡 (Pressure Balance at Element j on a Bubble Surface)、上昇氣泡其作用力的平衡 (Force Balance of the Rising Motion of a Bubble)、氣泡增長的速率 (Moving Velocity of Elements on Bubble Surface)、數值計算的邊際條件和假設參數 (Boundary Conditions and Assumptions for Numerical Computation)。

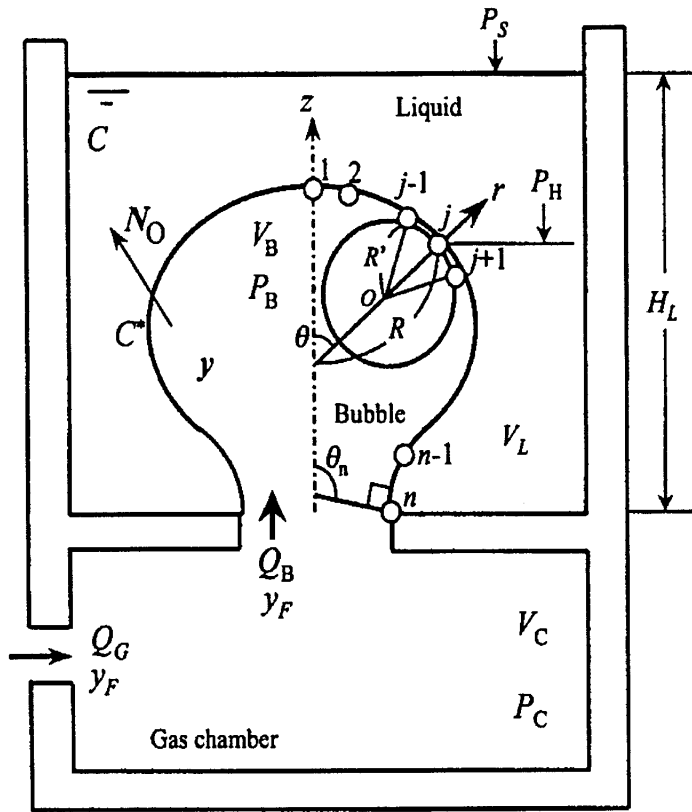
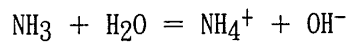


Fig. 2. Non-spherical model for bubble formation with mass transfer.

圖 2、非球型氣泡形成模式配合質量移轉的模擬示意圖。

實驗部份

在實驗進行過程中，所探討的進氣組成係以氨氣(NH₃)和氮氣(N₂)的混合氣體為主，至於吸收劑則採以蒸餾水來充當。當通入氨氣並為蒸餾水所吸收時，其溶解化學反應式則如下所示。



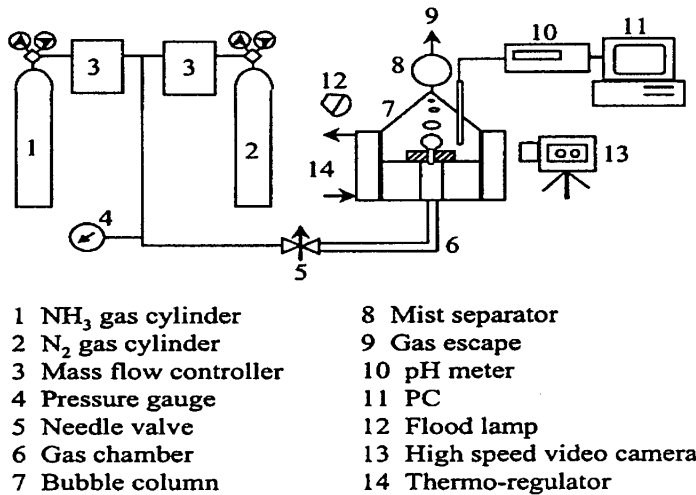
其在水中的解離反應速率常數為 $5 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ ，至於相關氨氣和氮氣混合氣體的物理化學性質則參見表 1 所示。

表 1、於 298K 條件下，氨氣和氮氣混合氣體的物理化學性質

氨氣在混合氣體中所占比率 (y, Mol fr)	氣體密度 (ρ_G, kgm^{-3})	氣體黏度 ($\mu_G, \text{Pa s}$)	水中飽和濃度 ($C^*, \text{Mol m}^{-3}$)
0	1.146	1.75×10^{-5}	0
0.08	1.110	1.69×10^{-5}	4.15×10^3
0.11	1.097	1.68×10^{-5}	5.58×10^3
0.17	1.070	1.65×10^{-5}	1.07×10^4
0.35	0.9884	1.54×10^{-5}	1.94×10^4

氨氣在水中的擴散性為 $DL = 1.6 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ；氮氣在氨氣中的擴散性則為 $DG = 2.48 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ 。

至於實驗進行時所建構的實驗設備，則參見圖 3 所示概要示意圖。整個曝氣反應管柱的水溫係維持在 298 K 條件下，曝氣反應管柱的直徑為 60 mm，至於液位高度則設定在 107 mm。



- | | |
|------------------------------|----------------------------|
| 1 NH_3 gas cylinder | 8 Mist separator |
| 2 N_2 gas cylinder | 9 Gas escape |
| 3 Mass flow controller | 10 pH meter |
| 4 Pressure gauge | 11 PC |
| 5 Needle valve | 12 Flood lamp |
| 6 Gas chamber | 13 High speed video camera |
| 7 Bubble column | 14 Thermo-regulator |

Fig. 3. Schematic diagram of experimental apparatus.

圖 3、實驗進行時所建構的實驗設備概要示意圖。

實驗結果

圖 4 所示係進行實驗所獲得實際氣泡的成長圖譜，以及利用 Tsuge 實驗室自行所建立非球型氣泡形成模式配合質量移轉機制的模擬氣泡成長圖譜。經由理論模擬和實際氣泡成長圖譜的比對，可明確得知在不同時間條件下，經由非球型氣泡形成模式所模擬的氣泡成長圖譜，都

可與實驗所獲得實際氣泡的成長圖譜相吻合。另以本研究所進行氬氣吸收的實驗結果，可得知進氣組成成份中的氬氣成份，約 80-90% 程度，於氣泡形成過程即已溶解於去離子水吸收劑中。

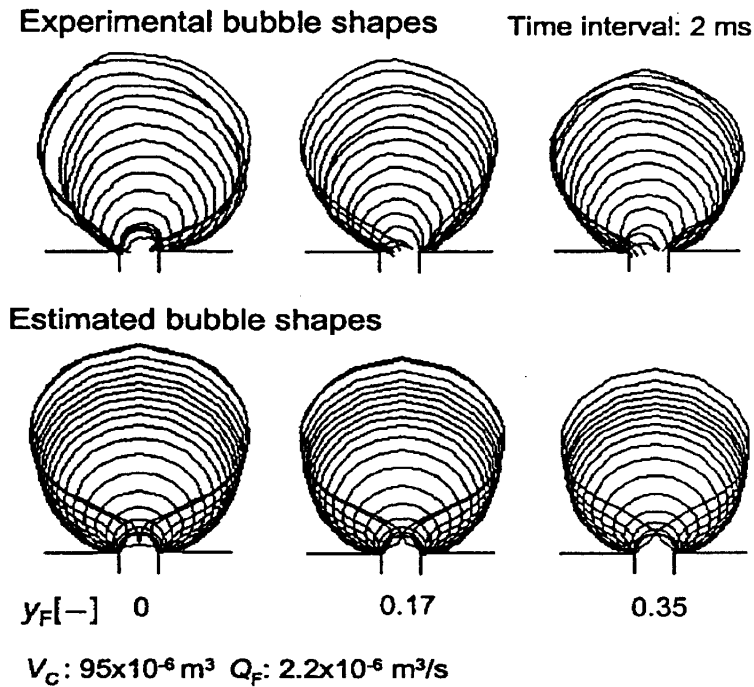


Fig. 6. Comparison between experimental and estimated bubble shapes.

圖 4、非球型氣泡形成模式配合質量移轉機制的模擬氣泡和實驗所獲得實際氣泡成長圖譜的比較。

(C) 「Formation of Magnesium Carbonate by Reactive Crystallization」; Hideki Tsuge, Takanobu Tanikawa and Masato Sakakibaba; Bull. Soc. Sea Water Sci. 1996(50)58-63.

摘要

配合鹼性碳酸鎂(Basic Magnesium Carbonate; BMC)和碳酸鎂水合物(Magnesium Carbonate Trihydrate; MCT)半批次反應結晶法的進行，以釐清經由氫氧化鎂與二氧化碳氣體沉澱作用，所製備得 BMC 和 MCT 反應結晶法的反應機制。依據實驗結果可得知，BMC 和 MCT 的形成係與反應溫度和氫氧化鎂的起始濃度有關；另並藉由 SEM 圖譜和 X-ray 繞射分析的結果，可據以確定經由反應結晶法所製備得 BMC 和 MCT 的組成成份。

實驗部份

圖 1 所示係進行反應結晶法製備碳酸鎂的實驗裝置概要圖，其主要組成成份包括有 pH 計、攪拌器、恆溫槽、氣腔、流量計等。首先將 1.2 L 的氫氧化鎂溶液(0.03-0.5mol/L)注入反應槽中，於攪拌器轉速 600 rpm 和反應溫度 50-70°C 條件下，將二氧化碳以 480 ml/min 的氣體流速注入，繼而以觀察 BMC 和 MCT 的製備條件及反應機制。

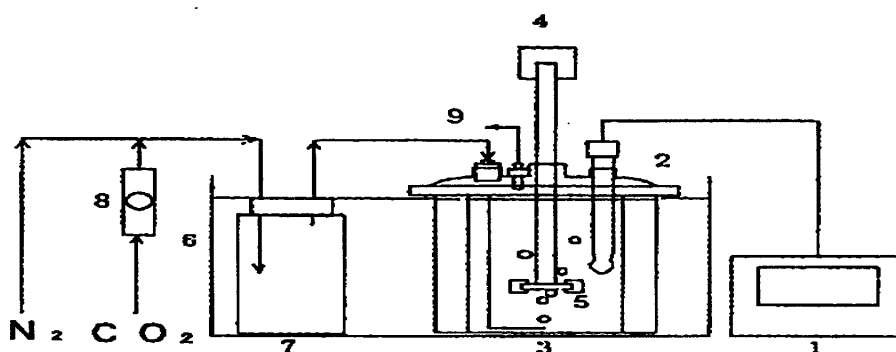


Fig.—1 Schematic diagram of experimental apparatus.

1. pH meter, 2. pH electrode, 3. crystallizer,
4. motor, 5. impeller, 6. constant-temperature bath,
7. gas chamber, 8. gas flow meter,
9. gas exit.

圖 1、反應結晶法製備碳酸鎂的實驗裝置概要圖。

實驗結果

圖 2 所示係於 0.03-0.5mol/L 起始濃度的氫氧化鎂溶液及反應溫度 30-70°C 條件下，將二氧化碳氣體注入所獲得不同組成成份碳酸鎂沉澱物的分佈圖。由該圖中可得知，BMC 和 MCT 的形成係與反應溫度和氫氧化鎂的起始濃度有關。例如當氫氧化鎂濃度大於 0.1mol/L 以上，反應溫度不超過 50°C 條件，此時所獲得的碳酸鎂沉澱物的組成成分為 $\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 。唯當反應溫度介於 50-60°C 條件下，則所獲得的碳酸鎂沉澱物的組成成分為 $\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 和 $4\text{MgCO}_3 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 的混合物所形成；至於當反應溫度高於 60°C 條件以上，則所獲得的碳酸鎂沉澱物的組成成分將為 $4\text{MgCO}_3 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 。

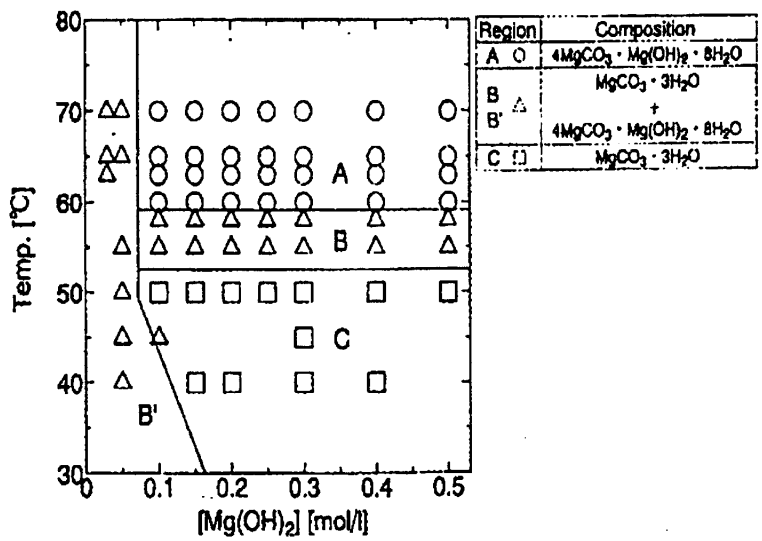


Fig.—2 Precipitation diagram of magnesium carbonate.

圖 2、不同碳酸鎂組成沉澱物形成的分佈一覽表。

圖 3 所示則為分別於 50°C 和 60°C 條件下，針對氫氧化鎂溶液通入二氧化碳進行曝氣實驗，所量得該溶液 pH 值變化的曲線圖。由該溶液 pH 值變化的實驗結果中，初步可得知利用反應結晶法所製備得的 BMC 和 MCT 沉澱物，二者溶液 pH 值的變化趨勢大致上是相一致的。

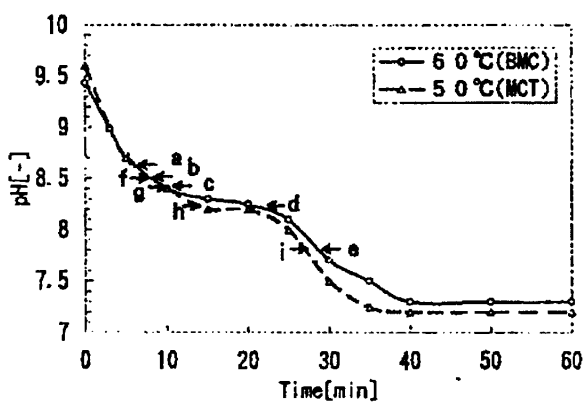


Fig.—3 Change in pH with reaction time.

圖 3、於 50°C 和 60°C 條件下，氫氧化鎂溶液通入二氧化碳所量得該溶液 pH 值變化的曲線圖。

圖 4-(A)所示則為於反應溫度 60°C 條件下，針對氫氧化鎂溶液通入二氧化碳進行曝氣實驗，於不同 pH 值條件下所獲得碳酸鎂沉澱物組成成分變化的 SEM 圖和 X-ray 繞射圖譜。圖 4-(B)則為於反應溫度 50°C 條件下，針對氫氧化鎂溶液通入二氧化碳進行曝氣實驗，於不同 pH 值條件下所獲得碳酸鎂沉澱物組成成分變化的 SEM 圖和 X-ray 繞射圖譜。藉由 SEM 圖譜和 X-ray 繞射分析的結果，可據以確定經由反應結晶法所製備得 BMC 和 MCT 的組成成份。

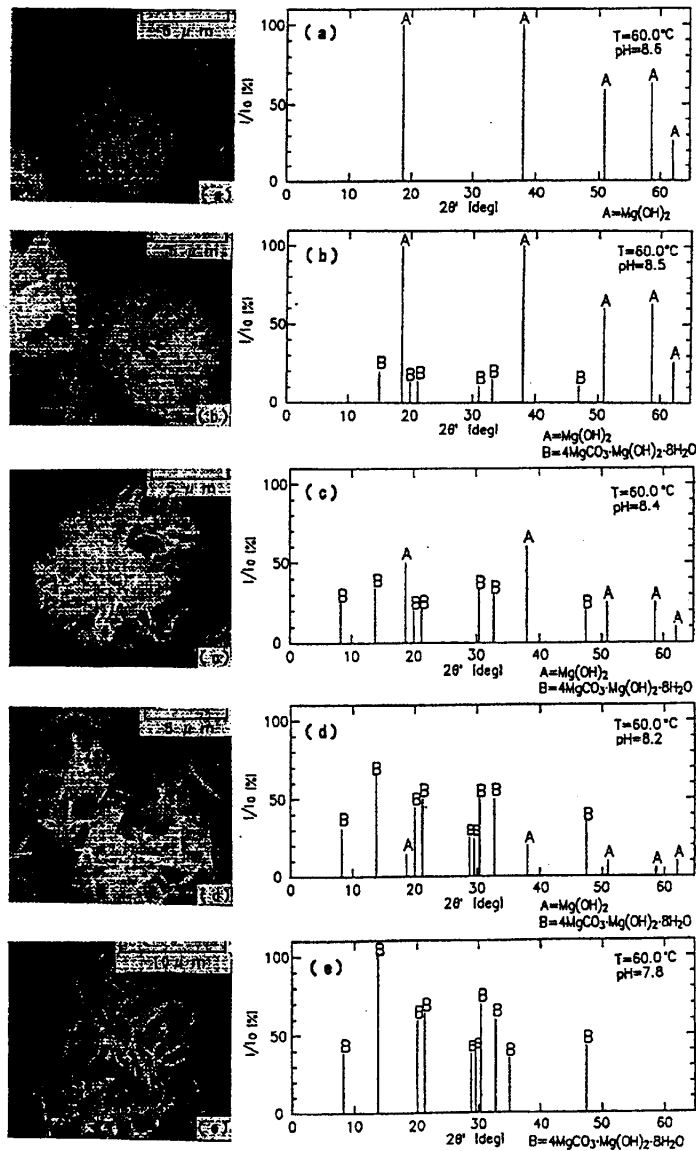


Fig.—4 SEM photograph and X-ray

圖 4-(A)、於反應溫度 60°C 條件下，針對氫氧化鎂溶液通入二氧化碳進行曝氣實驗，於不同 pH 值條件下所獲得碳酸鎂沉澱物組成成分變化的 SEM 圖和 X-ray 繞射圖譜。

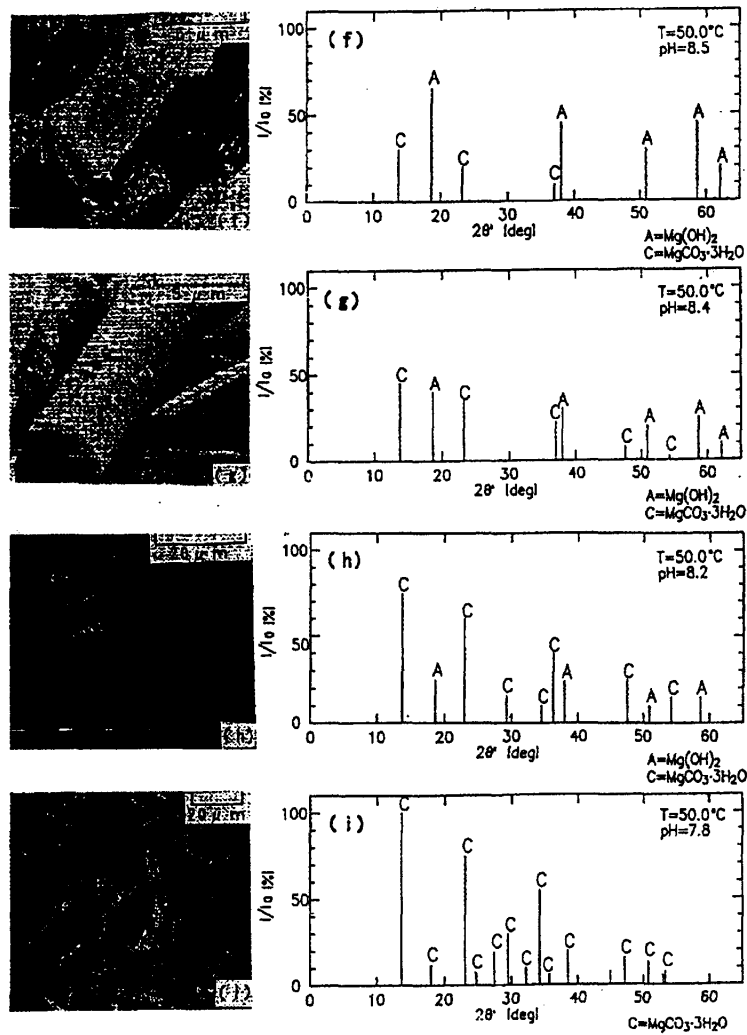
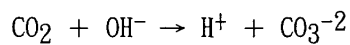
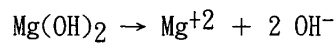


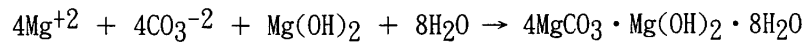
圖 4-(B)、於反應溫度 50°C 條件下，針對氫氧化鎂溶液通入二氧化碳進行曝氣實驗，於不同 pH 值條件下所獲得碳酸鎂沉澱物組成成分變化的 SEM 圖和 X-ray 繞射圖譜。

結語

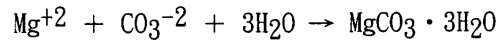
綜合上述實驗結果，初步可推測 BMC 和 MCT 沉澱物的形成機制如下：



於反應溫度 60°C 條件下，利用反應結晶法製備得 BMC 的推測機制則如下：



當反應溫度小於 55°C 條件下，利用反應結晶法製備得 MCT 的推測機制則如下：



最後在實際 BMC 和 MCT 沉澱物的製備，其相關操作程序則可簡化以反應溫度和溶液 pH 值變化的控制，來達到 BMC 或 MCT 沉澱物的製備。參見圖 5 所示係反應溫度和溶液 pH 值操作參數與 BMC 和 MCT 沉澱物製備的關係圖。圖 6 所示係實驗室在進行 BMC 和 MCT 沉澱物製備的設備裝置圖。

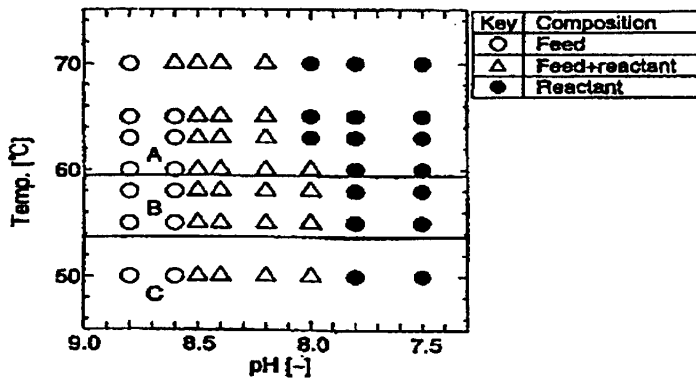


Fig.—5 Precipitation diagram of magnesium carbonate.

圖 5、反應溫度和溶液 pH 值操作參數與 BMC 和 MCT 沉澱物製備的關係圖。

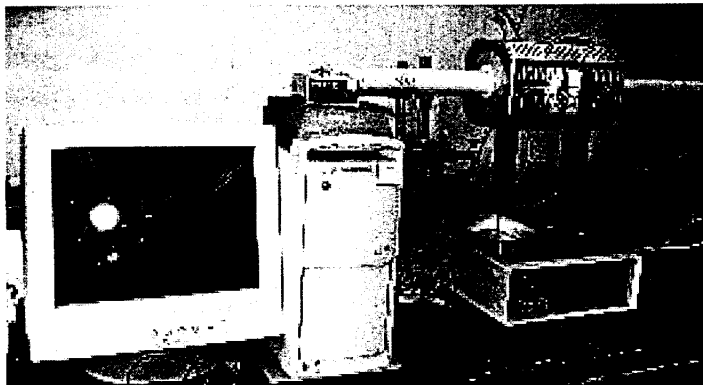


圖 6、實驗室在進行 BMC 和 MCT 沉澱物製備的設備裝置圖。

(D) 逆滲透分離技術(Reverse Osmosis Separations)

對於薄膜分離技術而言，該技術已被廣泛應用於生物產業其相關產品的分離與純化處理程序上，例如逆滲透(Reverse Osmosis)技術已商業化被應用以進行乳酪中蛋白質的萃取濃縮；唯在進行乳漿的逆滲透技術處理時，卻常遭遇有機質污物黏著於薄膜表面和阻塞於薄膜孔隙的問題，進而導致薄膜分離效率的明顯降低、減降流體可過濾通量和縮短薄膜的使用壽命。至今上述導致原因仍不十分明確，為釐清上述問題，Tsuge 實驗室乃擬進一步深入探討利用逆滲透技術處理乳酪中蛋白質的萃取濃縮時，其所衍生成機質污物黏著於薄膜表面和阻塞於薄膜孔隙的形成機制。圖 1 所示係實驗室自行組裝的逆滲透裝置設備。

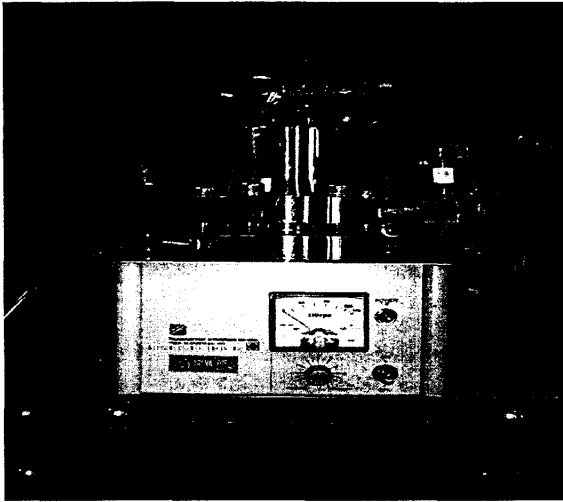


圖 1、實驗室自行組裝的逆滲透裝置設備。

近年來基於溫室效應日趨嚴重的問題，為減緩溫室效應的衝擊，二氧化碳減量技術的發展已成為一個重要的研究課題。由於過去 Tsuge 實驗室已針對利用氫氧化鎂進行二氧化碳固定處理的可行性探討，唯為期能獲得大量的鎂離子，現今該實驗室正擬以海洋中蘊藏豐富的鎂離子為主要來源。例如：將電廠所排釋的煙氣導入製鹽廠所排放具高濃度鎂離子和鈣離子的海水中，則煙氣中的二氧化碳將被轉變成碳酸鎂和碳酸鈣，繼而從氣相中被分離去除。依現行的海水淡化技術，將可輕易獲得含有高濃度鎂離子和鈣離子的海水；然而藉由二氧化碳與海水中的鎂和鈣陽離子進行反應作用而予以轉變成碳酸鹽，則涉及相關該反應結晶假說(Reactive Crystallization Phenomena)的釐清是有其必要性。基於上述因素的考量，因而 Tsuge 實驗室現正著手進行該主題的相關研究工作。另外，雖然所製備的碳酸鹽化合物，可成為一個具經濟價值的商品(例如可被應用做為建材或肥料)，然而適當結晶顆粒的大小和形狀仍是有其在實際應用的要求。目前 Tsuge 實驗室首要工作即在釐清二氧化碳與鎂離子和鈣離子作用轉變成碳酸鹽的結晶機制，進而提出適當的結晶操作條件，以期達化學法二氧化碳固定，及符合資源化再利用的目標。

肆、實習物理法固定二氧化碳相關技術

Dr. Takashi OHSUMI 大隅多加志 博士



現職：主席研究員(Chief Researcher)，貯留研究室(CO₂ Storage Laboratory)，財團法人地球環境產業技術研究機構(Research Institute of Innovative Technology for the Earth; RITE)。

學歷：畢業於東京大學，1983年獲得地球化學博士學位。

專長領域：質譜術(Mass Spectrometry)、同位素水文學(Isotope Hydrology)、火山氣體(Volcanic Gas)、二氧化碳地球化學(CO₂ Geochemistry)、地熱能量(Geothermal Energy)、二氧化碳減量技術(CO₂ Sequestration Technology)。

一、實習心得

大隅多加志博士係屬二氧化碳隔離研究群(CO₂ Sequestration Research Group)中的主席研究員，目前該研究群所進行相關二氧化碳減量處理的研究工作，主要係期能將二氧化碳分別儲置於海洋和地下儲層的方式(CO₂ Isolation into Ocean and Underground)，以達成二氧化碳隔離的目標。圖1所示為一相關物理法二氧化碳隔離的概要示意圖。對於海洋儲置二氧化碳主題而言，主要包括下列二個研究觀念：(1)溶解型式：快速將二氧化碳溶解於大量的海水中，一般又稱之為移動船式(Moving Ship Type)；(2)儲存型式：將液態二氧化碳以注入沉降的方式，儲存於深度達三千公尺深的海床，一般又稱之為湖型式(Lake Type)。至於利用地下儲層進行二氧化碳儲置的研究觀念，則包括有將二氧化碳注入地下煤礦層和地下含水層的方式來予以儲置。

Overview of CO₂ Sequestration Technology

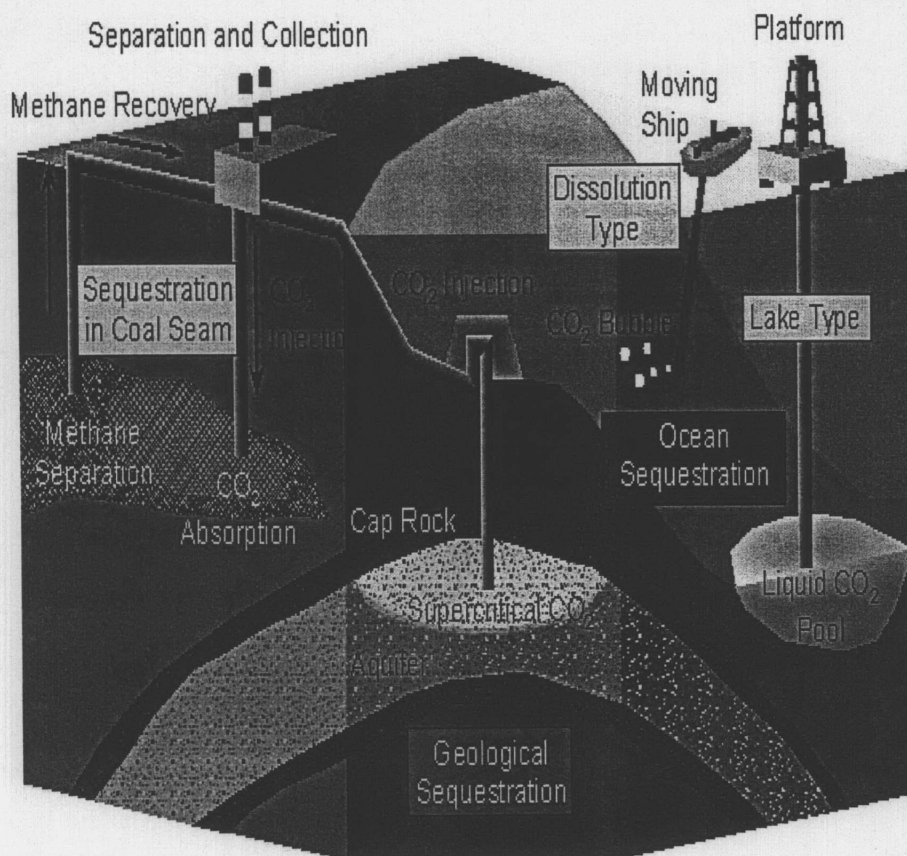


圖 1、相關物理法二氧化碳隔離的概要示意圖。

(A) 二氧化碳海洋儲置(CO₂ Ocean Storage)

「Study of Environmental Assessment for CO₂ Ocean Sequestration for Mitigation of Climate Change (SEA-COSMIC)」為現行地球環境產業技術研究機構(Research Institute of Innovative Technology for the Earth; RITE)所規劃長程研究計畫之一。

計畫目標

利用海洋進行二氧化碳減量研究計畫的目標，係期能建立一個具包容性的評估模式(Generic Assessment Model)，以準確敘述和預測二氧化碳從排放點至周遭開放海域的行為，以及可能的生物衝擊(Biological Impacts)。

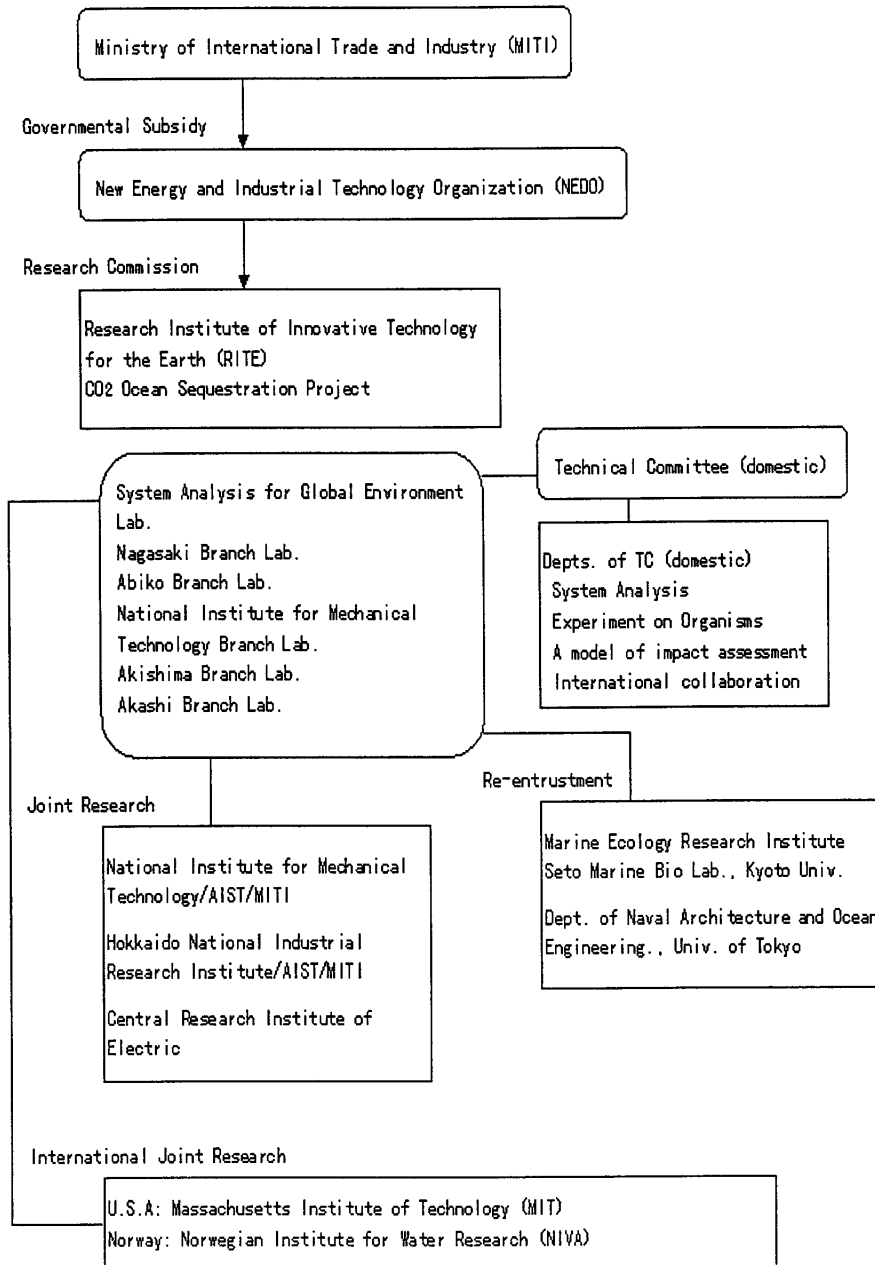
1、第一階段(Phase 1)計畫執行期限自 1997 年開始(為期五年)，利用海洋進行二氧化碳減量的相關研究計畫，則參見下表所示。

表 1、利用海洋進行二氧化碳減量相關研究計畫內容

R & D Items	FY-1 (97/11-98/3)	FY-2 (98/4-99/3)	FY-3 (99/4-00/3)	FY-4 (00/4-01/3)	FY-5 (01/4/02/3)
(1) Study of liquid CO ₂ -seawater at injection					
(2) Research on technologies of CO ₂ transport and dilution technology at intermediate depths of ocean					
(3) Laboratory experiment on CO ₂ impacts on marine organisms					
(4) Development of models to assess environmental impacts near the area of CO ₂ injection					
(5) International joint research on environmental assessment for CO ₂ ocean sequestration					
(6) Supporting Survey					

(1) 參與計畫單位(Organization)

下圖所示係整個計畫執行的概要流程圖，由該圖中可得知整個計畫的預算來源係由 MITI 所贊助，至於 RITE 則扮演計畫統籌規劃、執行和協調的角色；亦即整個計畫的執行係在 RITE 的主導之下，以組成團隊的方式來分工合作進行。整個執行團隊的成員包括有財團法人的研究單位、國家實驗室、大學學術研究單位，以及國外(跨國性)研究單位等的參與。



(2)研究計畫主題(R&D Subject)

第一階段利用海洋進行二氧化碳減量的相關研究計畫主題，如下列所示：

- (1) Clarification of behaviors of liquid CO₂-seawater at injection
- (2) Research on technologies of CO₂ transport to intermediate depths of the ocean and dilution
- (3) Laboratory experiment on CO₂ impacts on marine organisms
- (4) Development of models to assess environmental impacts near the area of CO₂ injection
- (5) International joint research of CO₂ injection at the open ocean site as one of the CTI activities
- (6) Supporting survey : (A) Study on the research trends concerning CO₂ ocean sequestration in Japan and abroad (B) Study on the optimization of the total system

綜合上述各研究計畫主題，可予以規劃出如圖 2 所示計畫執行的概要示意圖。

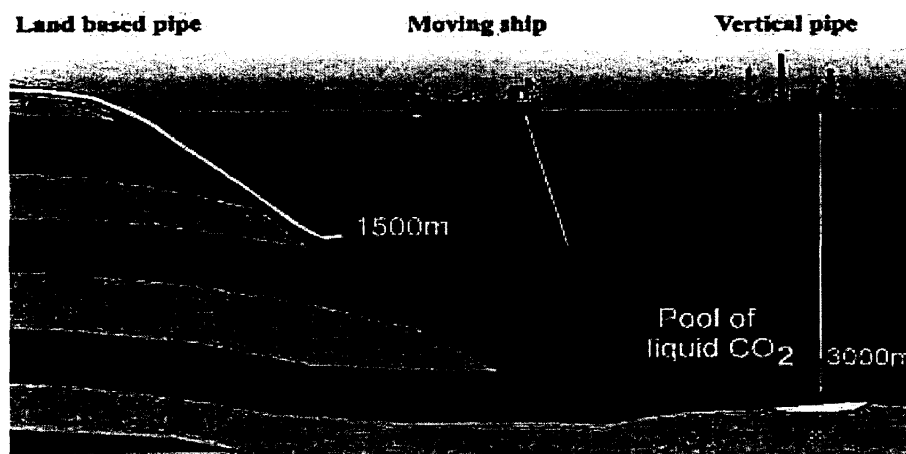


圖 2、第一階段擬執行計畫的概要示意圖。

(3)第一階段計畫已完成成果

(3-1) RITE 所完成成果

- (a) The Behavior of Liquid CO₂ Released into the Ocean
- (b) The CO₂ Transport and Dilution Technology
- (c) The Laboratory Experiments of CO₂ Impact on Marine Organisms

- (d) Environmental Impact Assessment Models in the Released Points
- (e) International Joint Research
- (f) The Support Survey

(3-2) KANSO (The Kansai Environmental Engineering Center Co. Ltd.)所完成成果

- (a) Studies on the Ocean Circulation
- (b) Distributions of Carbon Compounds and their Fluxes in the Ocean
- (c) Biological Standing Stocks and Effects of CO₂ on Biota
- (d) Development of Numerical Model for CO₂ Ocean Sequestration

2、第二階段(Phase 2)計畫執行期限自 2002 年開始(為期五年)，利用海洋進行二氧化碳減量的相關研究計畫。

(1)第二階段計畫內容概述：

圖 3 所示係整個第二階段擬執行計畫的概要示意圖。首先利用二氧化碳回收工廠(CO₂ Recovery Plants)，將電廠所排釋煙氣中的二氧化碳予以捕獲(Captured)和液化處理(Liquefied)；繼而利用液化二氧化碳運輸船(Liquid CO₂ Carrier)將液化二氧化碳運送至離岸約數百公里的海域，然後注入約 1000-2500 公尺的中深層(Mid-Deep)海水中。當液化二氧化碳由拖曳管(Towed Pipe)排釋出時，二氧化碳液滴的直徑大小約介於 5-10 mm 範圍，且基於與海水比重的差異會有湧昇(Go Up)的現象，進而溶解於海水中。以實際工程規模為例，即假設液化二氧化碳的排釋速率為 100 kg/sec，拖曳速度為 3 m/sec，拖曳管的航跡寬度為 2 m，則注射二氧化碳液滴湧升至 1000 公尺處完全溶解時，其起始稀釋比率(Initial Dilution Ratio)約為 1/60,000(參見圖 4 所示)。因此，當將 1 G ton CO₂ 均勻注入 1000 公尺深處的 100 Km × 100 Km 平方海域中，則該海水中二氧化碳濃度增加約為 1 ppm。對於中深層海水而言，其所含有二氧化碳濃度約為 2000-2500 ppm 範圍，因而當因液化二氧化碳的注入，所導致海水中二氧化碳濃度增加約為 1 ppm 的影響將不明顯。

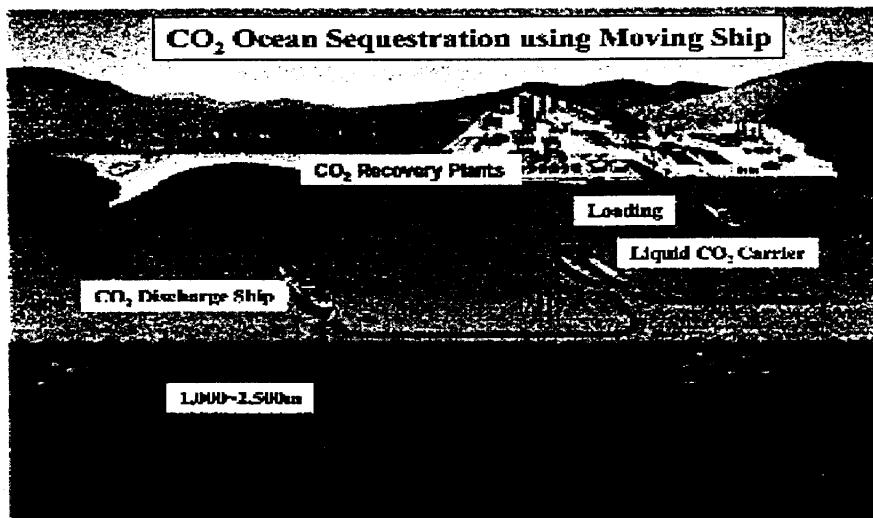


Fig. 1: Concept of the CO₂ Ocean Sequestration by Moving Ship

圖 3、第二階段擬執行計畫的概要示意圖。

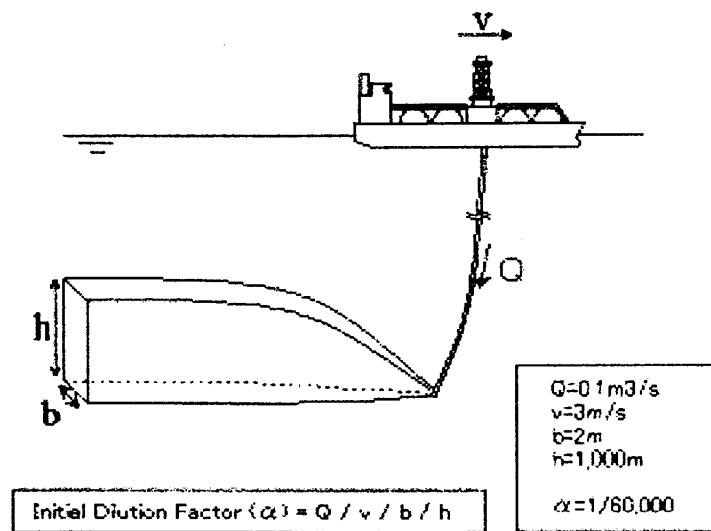


Fig.2 The initial dilution factor of CO₂ injected by the Moving Ship

圖 4、利用移動船式進行二氧化碳注入海洋，相關其稀釋係數的示意圖。

(2)參與計畫單位：RITE、MHI and KANSO supported by the Ministry of Economy Trade and Industry (METI)。

(3)研究計畫主題(R&D Subject)：

(a) The Development of CO₂ Injection System by Using Moving Ship.

(b) The Field Experiment in the Pacific Ocean near Japan.

(c) Development of Environmental Impact Assessment.

(d) International Cooperation and Public Outreach in Japan.

(4)計畫的執行：

第二階段計畫的推行，基於需要二氧化碳注入稀釋技術和海洋環境影響評估等科學專業和工程技術的參與支援；因此，整個計畫的執行係以組合大學、國立研究單位和私人企業研究單位等成為團隊的方式，來共同合作推動進行。另為提昇加速第二階段計畫的順利推行，該計畫正尋求國外利用海洋進行二氧化碳減量研究主題相關研究單位的合作。至於RITE單位所負責的研究主題，則包括有：(1) Impacts on Ecological Important Species (2) Field Observation (3) Assessment of Ecological Impacts。

(5)待克服問題：

對於領土狹小且地層結構破碎複雜的日本而言，尋找一個地層封閉性完整的地下儲層，來進行大量二氧化碳的儲置實屬不易；基於日本四週環繞海洋，且當利用海洋來進行二氧化碳的儲置，並不會受限於儲置場址的尋找，因而利用海洋來進行二氧化碳的儲置，為目前日本所規劃主要的二氧化碳減量對策。唯擬將二氧化碳注入海洋予以儲置，其所面臨待克服問題係屬環境保護的問題，即二氧化碳注入海洋時，大量二氧化碳溶解於海水中，其對於海洋生態的衝擊效應，假若無法釐清，則將二氧化碳注入海洋予以儲置的政策將無法實現；例如過去曾規劃擬於美國夏威夷和挪威海域，進行二氧化碳注入海洋的實驗，即係受限於環境保護因素的考量而無法執行。現行日本政府的構想，則規劃擬於日本海域進行二氧化碳注入海洋的實驗，唯為緩和國際環保組織的抗議和符合廢棄物海拋相關國際性法規的要求規定，現行正積極進行二氧化碳注入海洋時，其所可能導致對於海洋生態系的可能衝擊監測和評估。

(B)二氧化碳地下儲層儲置(CO₂ Underground Storage)

1、計畫內容概述

探討利用地下儲層來進行二氧化碳的儲置，亦為RITE單位現行所負責一個為期五年(2000—2004年)的研究計畫。該計畫的目標係期能建立一個穩定、安全和可長期儲置二氧化碳的技術，以針對日本國內所排釋的二氧化碳予以進行儲置。整個研究計畫並與日本工程促進協會

(Engineering Advancement Association of Japan; ENAA)進行合作。圖 5 所示係將二氧化碳注入地下儲層的概要示意圖。首先利用二氧化碳回收工廠(CO₂ Recovery Plants)，將電廠所排釋煙氣中的二氧化碳予以捕獲(Captured)和液化處理(Liquefied);利用液化二氧化碳運輸船(Liquid CO₂ Carrier)將液化二氧化碳運送至離岸的二氧化碳注射工作平台，繼而可將二氧化碳注入海床下約 800 公尺的地下含水層來進行儲置(自 1997 年，挪威注入量 100 萬噸二氧化碳/年)。RITE 單位則自今年夏天開始，於 Teikoku Oil 場址位置(Niigata Prefecture)進行二氧化碳注入地下儲層的現場實驗(參見圖 6 所示)，實驗規模為每日二氧化碳注入量為 20 噸，預計注入期限為 500 天，總計二氧化碳注入量為 10,000 噸。

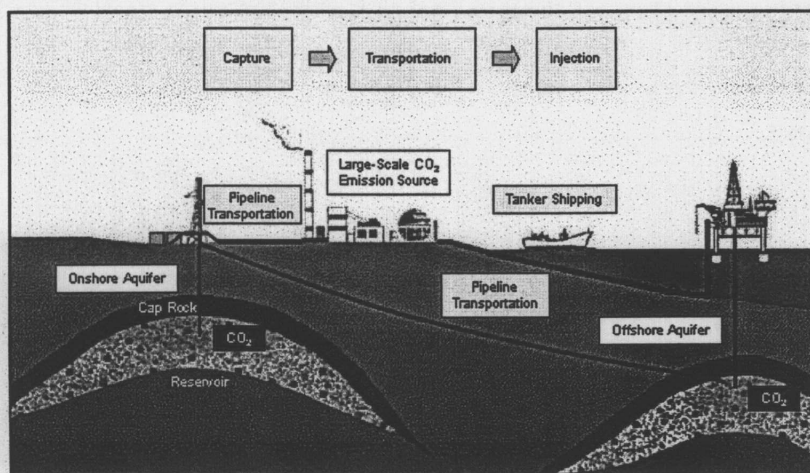


圖 5、將二氧化碳注入地下儲層的概要示意圖。

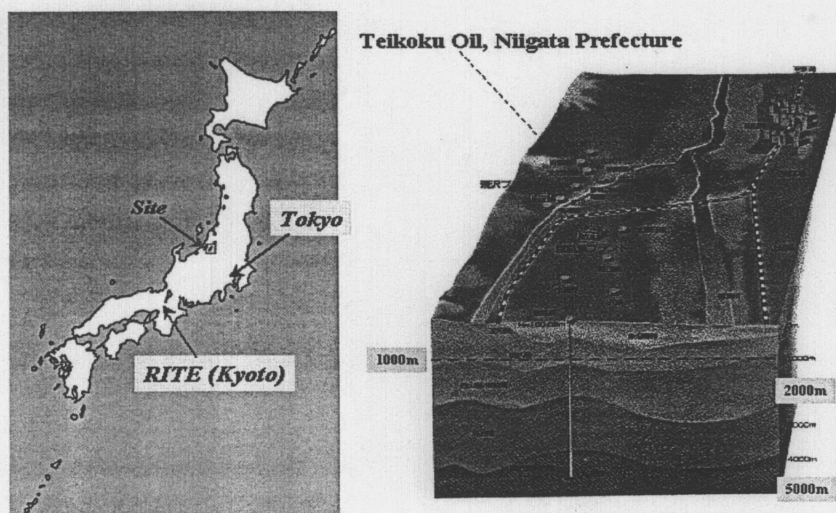


圖 6、於 Teikoku Oil 場址位置(Niigata Prefecture)及進行二氧化碳注入地下儲層的示意圖。

RITE 單位所負責的研究主題，則包括有：(1) What's really going to happen after injecting CO₂ into rock mass: Pore pressure buildup, CO₂-water-rock reactions (induced seismicity, mineral dissolution, CO₂-water displacement) (2) How quickly the injected CO₂ migrates in rock mass: Permeability (supercritical CO₂), Fractured porous media (3) CO₂ monitoring: Seismic wave monitoring.

圖 7 所示係 RITE 單位所建立相關二氧化碳注入地下儲層的觀測實驗示意圖，其主要目標為(1) Map the movement of CO₂ and the CO₂ is being safely contained within the reservoir (2) Injection of CO₂ caused wave velocity to decrease and the pore pressure to increase (3) Laboratory experiments are required to convert field results of wave velocity and attenuation to CO₂ saturation.

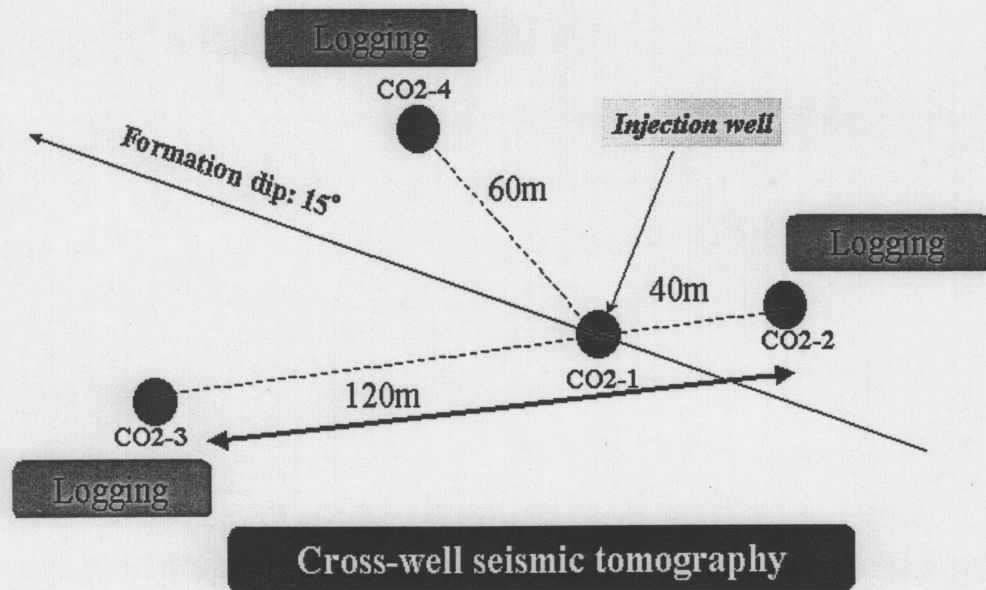
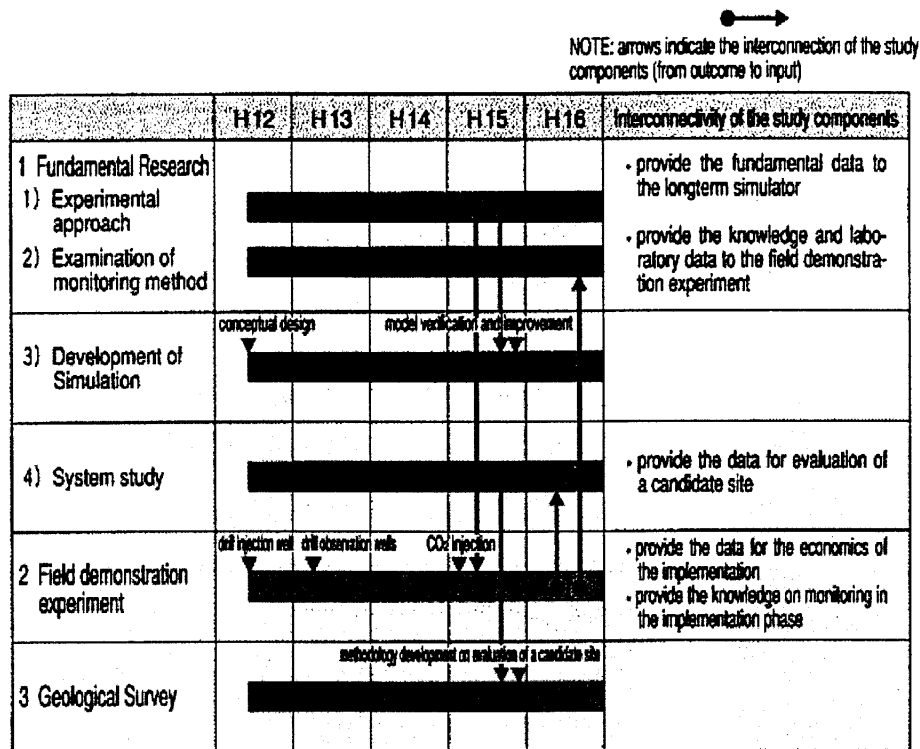


圖 7、二氧化碳注入地下儲層的觀測實驗示意圖

2、研究計畫自 2000 年開始(為期五年)，利用地下儲層進行二氧化碳減量的相關研究主題，則參見下表所示。



3、現行 RITE 單位對於相關地下儲層技術的研究主題，則包括有(1) 二氧化碳注入對於地震波速(Seismic Wave Velocity)的影響探討，以充當現場進行截面井地震斷層攝影術(Seismic Tomography)試驗結果的解釋依據。(2)進行相關儲置層岩石無機成分溶離的量測，以評估在二氧化碳-水-無機鹽成分系統條件下，對於地質化學假說(Geochemical Phenomena)的長期可能影響效應。(3)觀察儲置層組層間隙水(Pore Water)中二氧化碳氣泡的形成，以評估二氧化碳儲置的安全性。

4、未來擬進行的研究工作：

- (1) Mechanism of the formation water displaced by the injected CO₂ (Pore structure, injection pressure and flow rate, etc.).
- (2) Estimating the volume of the injected CO₂ from seismic data, by relating wave velocity changes to the CO₂ saturation or irreducible water saturation.

(3) Feasibility study on separating effects of the pore pressure buildup from wave velocity changes, by measuring S-wave velocity together (Velocities of P- and S-wave, the ratio of V_p/V_s).

(4) Experimental study on CO₂ injection to coal samples.

(a) Measurements on volumetric changes when injection CO₂ into dry coal samples

(CH₄/CO₂ displacement mechanism).

(b) Strain, P-wave velocity and permeability.

(c) Gas, liquid and super critical CO₂.

(d) Water saturation.

5、地下層儲置二氧化碳實習後記

對於日本而言，利用地下層來進行二氧化碳的儲置，係屬現正進行中的計畫，預計明年底較完整的實驗結果將可出爐。在整個計畫的執行過程中，RITE 單位擬利用震波的量測方式，來建立一套適用於現場監測二氧化碳儲置的快速檢測技術。目前我國交通大學與中油公司對於此領域主題有興趣，RITE 單位表示可將此方面經驗技術提供分享。

伍、心得與建議

下列意見為職此次赴日本實習所獲得的心得與建議。

(1) Tsuge 教授利用化學法固定二氧化碳，主要係以基礎研究為重點，假若可將其研究成果與職所規劃研究工作做一結合，相信對於職所規劃研究工作的進展會有極大的俾益和提供改進空間。

(2) 利用海洋進行二氧化碳的儲存，已為日本擬推行的策略，然而對於環境衝擊因素的釐清，以及克服國際法規的限制要求，為未來努力的方向。

(3) 相關二氧化碳減量技術的研究工作，基本上係需以團隊的方式來進行，目前國內尚未有任何研究團隊的成型，殊為可惜!!