



(21)申請案號：100124334

(22)申請日：中華民國 100 (2011) 年 07 月 08 日

(51)Int. Cl. : **B01D53/14 (2006.01)**  
**B01D53/73 (2006.01)**

**B01D53/62 (2006.01)**

(30)優先權：2010/07/08	美國	61/362,607
2010/08/02	美國	61/370,030
2010/10/25	美國	61/406,536
2011/03/09	美國	61/451,078

(71)申請人：斯凱歐尼公司 (美國) SKYONIC CORPORATION (US)  
美國

(72)發明人：瓊斯 喬依 大衛 JONES, JOE DAVID (US)；雅柏隆斯基 艾爾 YABLONSKY, AL (US)

(74)代理人：陳長文

申請實體審查：無 申請專利範圍項數：74 項 圖式數：34 共 216 頁

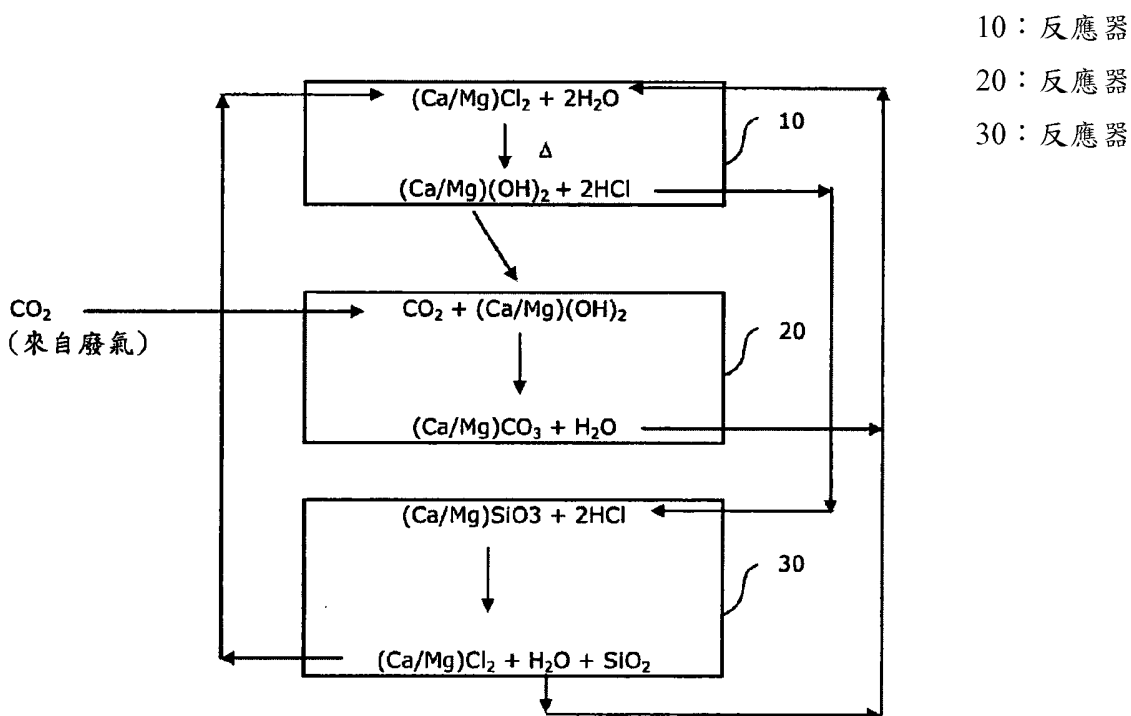
(54)名稱

涉及基於二鹽之熱解方法的二氧化碳捕捉方法

CARBON DIOXIDE SEQUESTRATION INVOLVING TWO-SALT-BASED THERMOLYTIC PROCESSES

(57)摘要

本發明係關於一種高能效二氧化碳捕捉方法，藉此使用允許熱及化學物質自一個步驟循環至另一步驟之二鹽熱解方法使第 2 族矽酸鹽礦物質及 CO<sub>2</sub> 轉化成石灰石及砂。





(21)申請案號：100124334

(22)申請日：中華民國 100 (2011) 年 07 月 08 日

(51)Int. Cl. : **B01D53/14 (2006.01)**  
**B01D53/73 (2006.01)**

**B01D53/62 (2006.01)**

(30)優先權：2010/07/08	美國	61/362,607
2010/08/02	美國	61/370,030
2010/10/25	美國	61/406,536
2011/03/09	美國	61/451,078

(71)申請人：斯凱歐尼公司 (美國) SKYONIC CORPORATION (US)  
美國

(72)發明人：瓊斯 喬依 大衛 JONES, JOE DAVID (US)；雅柏隆斯基 艾爾 YABLONSKY, AL (US)

(74)代理人：陳長文

申請實體審查：無 申請專利範圍項數：74 項 圖式數：34 共 216 頁

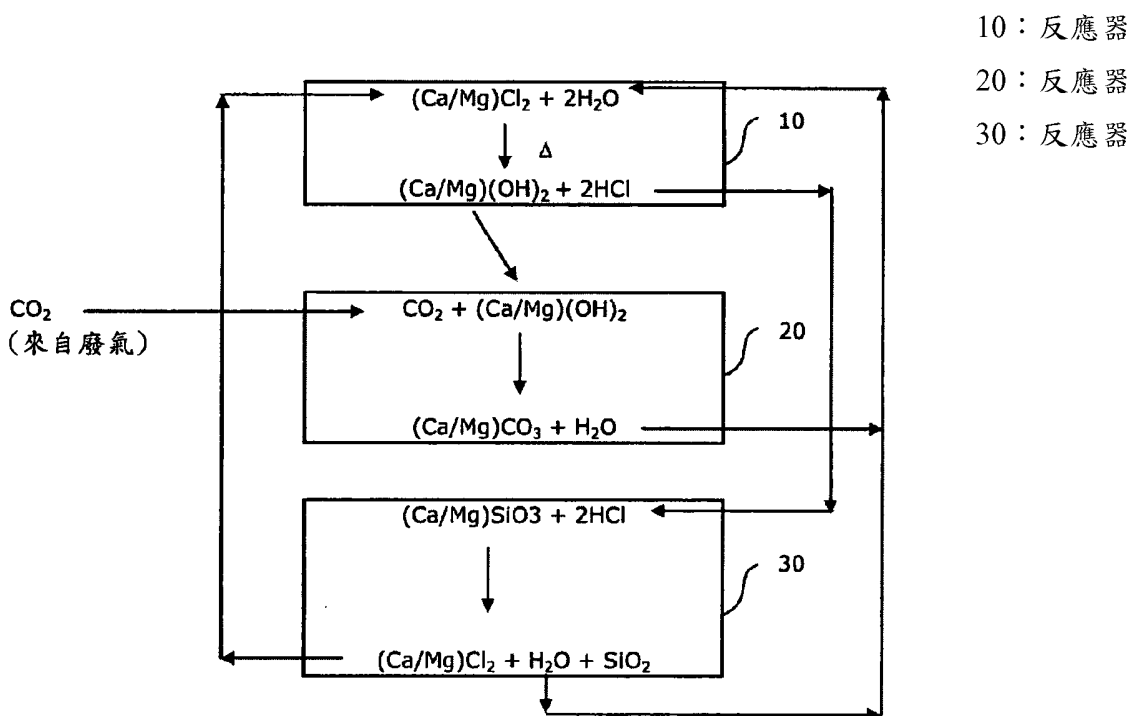
(54)名稱

涉及基於二鹽之熱解方法的二氧化碳捕捉方法

CARBON DIOXIDE SEQUESTRATION INVOLVING TWO-SALT-BASED THERMOLYTIC PROCESSES

(57)摘要

本發明係關於一種高能效二氧化碳捕捉方法，藉此使用允許熱及化學物質自一個步驟循環至另一步驟之二鹽熱解方法使第 2 族矽酸鹽礦物質及 CO<sub>2</sub> 轉化成石灰石及砂。



## 六、發明說明：

### 【發明所屬之技術領域】

本發明大體而言係關於以下領域：自某一來源，諸如發電廠之廢流(例如廢氣)中移除二氧化碳，藉此第2族矽酸鹽礦物質轉化成第2族氯化物鹽及SiO<sub>2</sub>，第2族氯化物鹽轉化成第2族氫氧化物及/或第2族羥基氯化物鹽。此等物質繼而可視情況在催化劑存在下與二氧化碳反應形成第2族碳酸鹽。此等步驟可組合形成循環，其中二氧化碳以碳酸鹽形式捕捉且來自一或多個步驟之副產物(諸如熱及化學物質)在一或多個其他步驟中再使用或再循環。

本申請案主張2010年7月8日申請之美國臨時申請案第61/362,607號、2010年8月2日申請之美國臨時申請案第61/370,030號、2010年10月25日申請之美國臨時申請案第61/406,536號及2011年3月9日申請之美國臨時申請案第61/451,078號之優先權，各案之全部內容以全文引用的方式併入本文中。

### 【先前技術】

CO<sub>2</sub>向空氣中之排放已日益引起國內及國際上之大量關注。詳言之，已集中注意此氣體對太陽熱滯留於大氣中，從而產生「溫室效應」的影響。儘管關於該影響之大小存有一些爭論，但所有人士皆贊成自點排放源移除CO<sub>2</sub>(及其他化學物質)為有益的，尤其當此舉之成本足夠小時。

溫室氣體主要由二氧化碳構成且由都市發電廠及大規模工業現場發電廠產生，不過其亦於任何正常碳燃燒(諸如

汽車、雨林清理、簡單灼燒等)中產生。然而，全球溫室氣體最為集中之點排放在發電廠中發生，使得自彼等固定場所進行降低或移除對施行移除技術而言頗具吸引力。因為能量產生為溫室氣體排放之主要原因，所以在過去30年中已密集地探討及研究諸如降低碳強度、改良效率及藉由各種手段自發電廠廢氣中捕捉碳之方法。

捕捉碳(呈氣態CO<sub>2</sub>之初始形式)之嘗試已產生許多不同技術，其一般可分為地質、陸地或海洋系統。此等技術之概述提供於*Proceedings of First National Conference on Carbon Sequestration*, (2001)中。迄今，許多(若非所有)此等技術之能量過於密集且因此在經濟上不可行，在許多情況下所消耗之能量多於藉由產生二氧化碳而獲得之能量。克服一或多個此等缺點之替代性方法將為有利的。

所提及之缺陷不欲為詳盡的，而實際上尤其傾向於損害先前已知用於自廢流中移除二氧化碳之技術的有效性；然而，此處所提及之缺陷足以證實此項技術中出現之方法尚未完全令人滿意且對本發明中描述及主張之技術存在顯著需要。

### 【發明內容】

本文揭示用於二氧化碳捕捉，包括自廢流中移除二氧化碳之方法及裝置。在一個態樣中，提供捕捉由某一來源產生之二氧化碳之方法，其包含：

- (a)使第一陽離子基鹵化物、硫酸鹽或硝酸鹽或其水合物與水以第一摻合物形式在適於形成第一產物混合物之條件

下反應，該第一產物混合物包含有包含第一陽離子基氫氧化物鹽、第一陽離子基氧化物鹽及/或第一陽離子基羥基氯化物鹽之第一步驟(a)產物及包含HCl、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>或HNO<sub>3</sub>之第二步驟(a)產物；

(b)使一些或所有第一步驟(a)產物與第二陽離子基鹵化物、硫酸鹽或硝酸鹽或其水合物及由該來源產生之二氧化碳以第二摻合物形式在適於形成第二產物混合物之條件下摻合，該第二產物混合物包含有包含第一陽離子基鹵化物、硫酸鹽及/或硝酸鹽或其水合物之第一步驟(b)產物、包含第二陽離子基碳酸鹽之第二步驟(b)產物及包含水之第三步驟(b)產物；及

(c)自該第二產物混合物中分離一些或所有該第二陽離子基碳酸鹽，

藉此以礦物質產物形式捕捉該二氧化碳。

在一些實施例中，步驟(a)之第一陽離子基鹵化物、硫酸鹽或硝酸鹽或其水合物為第一陽離子基氯化物鹽或其水合物，且第二步驟(a)產物為HCl。在一些實施例中，步驟(b)之第一陽離子基鹵化物、硫酸鹽或硝酸鹽或其水合物為第一陽離子基氯化物鹽或其水合物。

在一些實施例中，步驟(a)之第一陽離子基氯化物鹽或其水合物為MgCl<sub>2</sub>。在一些實施例中，步驟(a)之第一陽離子基氯化物鹽或其水合物為水合形式之MgCl<sub>2</sub>。在一些實施例中，步驟(a)之第一陽離子基氯化物鹽或其水合物為MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O。在一些實施例中，步驟(a)之第一陽離子基

氫氧化物鹽為 $Mg(OH)_2$ 。在一些實施例中，步驟(a)之第一陽離子基羥基氯化物鹽為 $Mg(OH)Cl$ 。在一些實施例中，第一步驟(a)產物主要包含 $Mg(OH)Cl$ 。在一些實施例中，第一步驟(a)產物包含大於90重量%之 $Mg(OH)Cl$ 。在一些實施例中，第一步驟(a)產物為 $Mg(OH)Cl$ 。在一些實施例中，步驟(a)之第一陽離子基氧化物鹽為 $MgO$ 。

在一些實施例中，步驟(b)之第二陽離子基鹵化物、硫酸鹽或硝酸鹽或其水合物為第二陽離子基氯化物鹽或其水合物，例如 $CaCl_2$ 。在一些實施例中，步驟(b)之第一陽離子基氯化物鹽為 $MgCl_2$ 。在一些實施例中，步驟(b)之第一陽離子基氯化物鹽為水合形式之 $MgCl_2$ 。在一些實施例中，步驟(b)之第一陽離子基氯化物鹽為 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 。

在一些實施例中，步驟(a)中之一些或所有水以蒸汽或超臨界水之形式存在。在一些實施例中，步驟(a)之一些或所有水係自步驟(b)之水獲得。在一些實施例中，步驟(b)進一步包含使氫氧化鈉鹽摻合於第二摻合物中。

在一些實施例中，方法進一步包含：

(d)使第2族矽酸鹽礦物質與 $HCl$ 在適於形成包含第2族氯化物鹽、水及二氧化矽之第三產物混合物之條件下摻合。

在一些實施例中，步驟(d)中之一些或所有 $HCl$ 係自步驟(a)獲得。在一些實施例中，步驟(d)之方法進一步包含攪動第2族矽酸鹽礦物質與 $HCl$ 。在一些實施例中，回收步驟(d)中產生之一些或所有熱。在一些實施例中，步驟(b)之

一些或所有第二陽離子基氯化物鹽為步驟(d)之第2族氯化物鹽。在一些實施例中，方法進一步包含分離步驟，在該分離步驟中，自步驟(d)中形成之第2族氯化物鹽移除二氧化矽。在一些實施例中，步驟(a)之一些或所有水係自步驟(d)之水獲得。

在一些實施例中，步驟(d)之第2族矽酸鹽礦物質包含第2族鏈狀矽酸鹽。在一些實施例中，步驟(d)之第2族矽酸鹽礦物質包含 $\text{CaSiO}_3$ 。在一些實施例中，步驟(d)之第2族矽酸鹽礦物質包含 $\text{MgSiO}_3$ 。在一些實施例中，步驟(d)之第2族矽酸鹽礦物質包含橄欖石(olivine)( $\text{Mg}_2[\text{SiO}_4]$ )。在一些實施例中，步驟(d)之第2族矽酸鹽礦物質包含蛇紋石(serpentine)( $\text{Mg}_6[\text{OH}]_8[\text{Si}_4\text{O}_{10}]$ )。在一些實施例中，步驟(d)之第2族矽酸鹽礦物質包含海泡石(sepiolite)( $\text{Mg}_4[(\text{OH})_2\text{Si}_6\text{O}_{15}] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )、頑火輝石(enstatite)( $\text{Mg}_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$ )、透輝石(diopside)( $\text{CaMg}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ )及/或透閃石(tremolite) $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\{[\text{OH}]\text{Si}_4\text{O}_{11}\}_2$ 。在一些實施例中，第2族矽酸鹽另外包含矽酸鐵及/或矽酸錳。在一些實施例中，矽酸鐵為鐵橄欖石(fayalite)( $\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]$ )。

在一些實施例中，步驟(b)中形成之一些或所有第一陽離子基氯化物鹽為步驟(a)中所用之第一陽離子基氯化物鹽。

在一些實施例中，二氧化碳呈廢氣形式，其中該廢氣另外包含 $\text{N}_2$ 及 $\text{H}_2\text{O}$ 。

在一些實施例中，步驟(a)之適合反應條件包含約 $200^\circ\text{C}$

至約500°C之溫度。在一些實施例中，溫度為約230°C至約260°C。在一些實施例中，溫度為約250°C。在一些實施例中，溫度為約200°C至約250°C。在一些實施例中，溫度為約240°C。

在一些實施例中，步驟(a)之適合反應條件包含約50°C至約200°C之溫度。在一些實施例中，溫度為約90°C至約260°C。在一些實施例中，溫度為約90°C至約230°C。在一些實施例中，溫度為約130°C。

在一些實施例中，步驟(a)之適合反應條件包含約400°C至約550°C之溫度。在一些實施例中，溫度為約450°C至約500°C。

在一些實施例中，步驟(a)之適合反應條件包含約20°C至約100°C之溫度。在一些實施例中，溫度為約25°C至約95°C。

在一些實施例中，步驟(a)之適合反應條件包含約50°C至約200°C之溫度。在一些實施例中，溫度為約90°C至約150°C。

在另一態樣中，本發明提供捕捉由某一來源產生之二氧化碳之方法，其包含：

(a)使氯化鎂鹽與水以第一摻合物形式在適於形成(i)氫氧化鎂、氧化鎂及/或 $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$ 及(ii)氯化氫之條件下摻合；

(b)使(i)氫氧化鎂、氧化鎂及/或 $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$ 、(ii) $\text{CaCl}_2$ 及(iii)由該來源產生之二氧化碳以第二摻合物形式在適

於形成(iv)碳酸鈣、(v)氯化鎂鹽及(vi)水之條件下摻合；及

(c)自該第二摻合物中分離該碳酸鈣，藉此以礦物質產物形式捕捉該二氧化碳。

在一些實施例中，步驟(a)之一些或所有氯化氫與水摻合以形成鹽酸。在一些實施例中，步驟(b)(i)之一些或所有氫氧化鎂、氧化鎂及/或 $Mg(OH)Cl$ 係自步驟(a)(i)獲得。在一些實施例中，步驟(a)中之所有水中之一些以氯化鎂鹽之水合物形式存在。在一些實施例中，步驟(a)在1個、2個或3個反應器中進行。在一些實施例中，步驟(a)在1個反應器中進行。在一些實施例中，步驟(a)(i)之氫氧化鎂、氧化鎂及/或 $Mg(OH)Cl$ 為大於90重量%之 $Mg(OH)Cl$ 。在一些實施例中，氯化鎂鹽為大於90重量%之 $MgCl_2 \cdot 6(H_2O)$ 。

在一些實施例中，方法進一步包含：

(d)使第2族矽酸鹽礦物質與氯化氫在適於形成第2族氯化物鹽、水及二氧化矽之條件下摻合。

在一些實施例中，步驟(d)中之一些或所有氯化氫係自步驟(a)獲得。在一些實施例中，步驟(d)進一步包含攪動第2族矽酸鹽礦物質與鹽酸。在一些實施例中，步驟(a)中之一些或所有氯化鎂鹽係自步驟(d)獲得。在一些實施例中，方法進一步包含分離步驟，在該分離步驟中，自步驟(d)中形成之第2族氯化物鹽移除二氧化矽。在一些實施例中，步驟(a)中之一些或所有水係自步驟(d)之水獲得。在一些實施例中，步驟(d)之第2族矽酸鹽礦物質包含第2族鏈

狀矽酸鹽。

在一些實施例中，步驟(d)之第2族矽酸鹽礦物質包含 $\text{CaSiO}_3$ 。在一些實施例中，步驟(d)之第2族矽酸鹽礦物質包含 $\text{MgSiO}_3$ 。在一些實施例中，步驟(d)之第2族矽酸鹽礦物質包含橄欖石。在一些實施例中，步驟(d)之第2族矽酸鹽礦物質包含蛇紋石。在一些實施例中，步驟(d)之第2族矽酸鹽礦物質包含海泡石、頑火輝石、透輝石及/或透閃石。在一些實施例中，第2族矽酸鹽另外包含礦化鐵及/或錳。

在一些實施例中，步驟(b)進一步包含使 $\text{CaCl}_2$ 及水摻合於第二摻合物中。

本發明之其他目的、特徵及優點自以下[實施方式]將變得顯而易知。然而，應瞭解，儘管[實施方式]及特定實例指示本發明之特定實施例，但其僅以說明方式提供，此係因為在本發明精神及範疇內的各種變化及修改自此[實施方式]將為熟習此項技術者顯而易知。

### 【實施方式】

以下圖式構成本說明書之一部分且納入在內以進一步說明本發明之某些態樣。本發明可藉由參考此等圖式之一結合本文呈現之特定實施例之詳細描述來更好地理解。

本發明係關於二氧化碳捕捉方法，包括高能效方法，其中第2族氯化物轉化成第2族氫氧化物及氯化氫，其接著用於自廢流中移除二氧化碳。在一些實施例中，氯化氫可進一步與第2族矽酸鹽反應以產生其他第2族氯化物起始物質

及砂石。

在一些實施例中，本發明之方法及裝置包含一或多個以下通用組成部分：(1)第2族矽酸鹽礦物質與氯化氫轉化成第2族氯化物及二氧化矽；(2)第2族氯化物轉化成第2族氫氧化物及氯化氫；(3)水性脫除二氧化碳，藉此使氣態CO<sub>2</sub>吸收至包含第2族氫氧化物之水性苛性鹼混合物中以形成第2族碳酸鹽及/或碳酸氫鹽產物及水；(4)分離過程，藉此自液體混合物中分離該等碳酸鹽及/或碳酸氫鹽產物；(5)包括能量之副產物自一或多個步驟或過程流再使用或循環至另外一或多個步驟或過程流中。以下更詳細地說明此等通用組成部分中之每一者。

儘管本發明之許多實施例消耗一些能量以達成來自廢氣流之CO<sub>2</sub>及其他化學物質的吸收且達成如本文所述之本發明實施例之其他目的，但本發明之某些實施例之一個優點在於其提供優於先前技術之生態效率，同時吸收自既定來源(諸如發電廠)排放之大多數或所有CO<sub>2</sub>。

本發明之某些實施例有別於其他CO<sub>2</sub>移除方法的另一額外益處在於，在一些市場條件下，產物比所需反應物或淨動力或工廠折舊成本顯著更具價值。換言之，某些實施例為以可獲利方式產生氯氫碳酸鹽(chloro-hydro-carbonate)產物，同時達成大量移除CO<sub>2</sub>及有關伴隨污染物之工業方法。

## I. 定義

如本文所用之術語「碳酸鹽」或「碳酸鹽產物」一般定

義為含有碳酸根基團 $[\text{CO}_3]^{2-}$ 之礦物質組分。因此，該等術語涵蓋碳酸鹽/碳酸氫鹽混合物與僅含有碳酸根離子之物質兩者。術語「碳酸氫鹽」及「碳酸氫鹽產物」一般定義為含有碳酸氫根基團 $[\text{HCO}_3]^{1-}$ 之礦物質組分。因此，該等術語涵蓋碳酸鹽/碳酸氫鹽混合物與僅含有碳酸氫根離子之物質兩者。

如本文所用之「Ca/Mg」表示單獨Ca、單獨Mg或Ca與Mg之混合物。Ca與Mg之比率可在0:100至100:0之範圍內，包括例如1:99、5:95、10:90、20:80、30:70、40:60、50:50、60:40、70:30、80:20、90:10、95:5及99:1。符號「Ca/Mg」、「 $\text{Mg}_x\text{Ca}_{(1-x)}$ 」及「 $\text{Ca}_x\text{Mg}_{(1-x)}$ 」同義。相比之下，「CaMg」或「MgCa」係指此兩種離子之比率為1:1。

如本文所用之術語「生態效率」與術語「熱力效率」同義使用，且定義為每消耗一份能量所對應的由本發明之某些實施例捕捉之 $\text{CO}_2$ 量(由公式「 $\partial\text{CO}_2/\partial E$ 」表示)，此值之適當單位為千瓦時/公噸 $\text{CO}_2$ ( $\text{kWh/ton CO}_2$ )。 $\text{CO}_2$ 捕捉以總工廠 $\text{CO}_2$ 之百分比表示；能量消耗類似地以總工廠動力消耗表示。

術語「第II族」與「第2族」可互換使用。

「六水合物」係指 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 。

在使用本發明之一些實施例形成碳酸氫鹽及碳酸鹽時，術語「離子比率」係指產物中之陽離子除以彼產物中存在之碳數目的比率。因此，由碳酸氫鈣( $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ )形成之產物流可稱為具有 $0.5(\text{Ca}/\text{C})$ 之「離子比率」，而由純碳酸

鈣( $\text{CaCO}_3$ )形成之產物流可稱為具有1.0(Ca/C)之「離子比率」。延伸而言，單價、二價及三價陽離子之碳酸鹽及碳酸氫鹽的無窮數目之連續混合物可稱為具有在0.5與3.0之間變化的離子比率。

基於上下文，縮寫「MW」意謂分子量或百萬瓦。

縮寫「PFD」為方法流程圖。

縮寫「Q」為熱(或熱負荷)，且熱為一種能量類型。此不包括任何其他能量類型。

如本文所用之術語「捕捉」用於一般指代部分或全部作用在於自點排放源移除 $\text{CO}_2$ 且以某種形式儲存彼 $\text{CO}_2$ 以防止其返回至大氣中的技術或實踐。此術語之使用不會自所研究之「捕捉」技術中排除任何形式之所述實施例。

在化學式之情形下，縮寫「W」係指 $\text{H}_2\text{O}$ 。

輝石(pyroxene)為一組見於許多火成岩及變質岩中之矽酸鹽礦物質。輝石共有由矽石四面體之單鏈組成之共同結構且其以單斜晶系及斜方晶系結晶。輝石具有通式 $\text{XY}(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_6$ ，其中X表示鈣、鈉、鐵(II)及鎂及較少之鋅、錳及鋰，且Y表示尺寸較小之離子，諸如鉻、鋁、鐵(III)、鎂、錳、鈷、鈦、鈳及甚至鐵(II)。

另外，構成本發明化合物之原子欲包括此等原子之所有同位素形式。如本文所用之同位素包括具有相同原子序數但不同質量數之彼等原子。列舉一般實例且不加限制，氫之同位素包括氕及氘，且碳之同位素包括 $^{13}\text{C}$ 及 $^{14}\text{C}$ 。

當在申請專利範圍及/或本說明書中與術語「包含」結

合使用時，用詞「一」之使用可意謂「一個」，但其亦與「一或多個」、「至少一個」及「一個或一個以上」之含義一致。

在本申請案通篇，術語「約」用於指示某一值包括器件、用於測定該值之方法、或在研究對象間存在之變化的固有誤差變化。

術語「包含」、「具有」及「包括」為開放式連接動詞。一或多個此等動詞之任何形式或時態，諸如「包含 (comprises/comprising)」、「具有 (has/having)」、「包括 (includes/including)」，亦為開放式的。舉例而言，「包含」、「具有」或「包括」一或多個步驟之任何方法不限於僅具有彼一或多個步驟且亦涵蓋其他未列步驟。

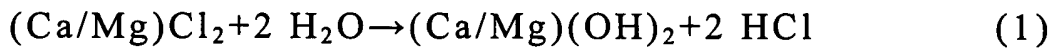
當術語「有效」用於本說明書及/或申請專利範圍中時，彼術語意謂足以達成所要、預期或預定結果。

上述定義取代了以引用的方式併入本文中之任何參考文獻中之任何相衝突之定義。然而，定義某些術語之事實不應視為指示未定義之任何術語為不明確的。實際上，咸信所用之所有術語皆明確地描述本發明以使一般技術者可瞭解範疇且實施本發明。

## II. 使用第II族金屬捕捉二氧化碳

圖1描述說明本發明之裝置及方法之一般例示性實施例的簡化方法流程圖。此圖僅出於說明之目的而提供，且因此其僅描述本發明之特定實施例且不欲以任何方式限制申請專利範圍之範疇。

在圖1中所示之實施例中，反應器10(例如道路用鹽鍋爐(road salt boiler))使用動力，諸如外部動力及/或再捕獲動力(例如來自熱廢氣或外部熱源(諸如太陽能聚集或燃燒)之熱)以驅動由反應式1表示之反應。



此反應中所用之水可呈液體、蒸汽、結晶水合物(例如 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )形式，或其可為超臨界水。在一些實施例中，反應使用 $\text{MgCl}_2$ 以形成 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 及/或 $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$ (參見例如圖2)。在一些實施例中，反應使用 $\text{CaCl}_2$ 以形成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。來自反應式1之一些或所有第2族氫氧化物或羥基氯化物(未展示)可傳遞至反應器20中。在一些實施例中，一些或所有第2族氫氧化物及/或第2族羥基氯化物以水溶液形式傳遞至反應器20中。在一些實施例中，一些或所有第2族氫氧化物以水性懸浮液形式傳遞至反應器20中。在一些實施例中，一些或所有第2族氫氧化物以固體形式傳遞至反應器20中。在一些實施例中，一些或所有氯化氫(例如呈蒸氣形式或呈鹽酸形式)可傳遞至反應器30(例如岩石熔化器)中。在一些實施例中，所得第2族氫氧化物經進一步加熱以移除水且形成相應第2族氧化物。在一些變化形式中，一些或所有此等第2族氧化物可接著傳遞至反應器20中。

來自某一來源(例如廢氣)之二氧化碳在反應器20(例如流體化床反應器、噴霧塔脫除二氧化碳器或脫除二氧化碳鼓泡器)處進入過程中，此有可能在初始與廢熱/DC產生系統

交換廢熱之後發生。在一些實施例中，廢氣溫度為至少 125°C。一些或所有可自反應器 10 獲得之第 2 族氫氧化物根據由反應式 2 表示之反應在反應器 20 中與二氧化碳反應。



由此反應產生之水可回傳至反應器 10 中。第 2 族碳酸鹽通常自反應混合物中分離。第 2 族碳酸鹽具有極低  $K_{sp}$  (溶度積常數)。因此，第 2 族碳酸鹽以固體形式與可保持在溶液中之其他較高溶解性化合物分離。在一些實施例中，反應行經第 2 族碳酸氫鹽。在一些實施例中，產生第 2 族碳酸氫鹽且視情況接著自反應混合物中分離。在一些實施例中，第 2 族氧化物視情況連同第 2 族氫氧化物一起或獨立於第 2 族氫氧化物與二氧化碳反應以亦形成第 2 族碳酸鹽。在一些實施例中，已移除  $\text{CO}_2$  及/或其他污染物之廢氣釋放至空氣中。

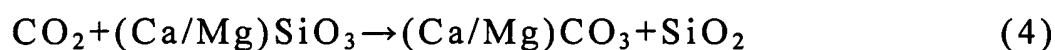
第 2 族矽酸鹽(例如  $\text{CaSiO}_3$ 、 $\text{MgSiO}_3$ 、 $\text{MgO} \cdot \text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$  等)在反應器 30(例如岩石熔化器或礦物質解離反應器)處進入過程中。在一些實施例中，此等第 2 族矽酸鹽在前一步驟中經研磨。在一些實施例中，第 2 族矽酸鹽為鏈狀矽酸鹽。此等礦物質可與一些或所有可自反應器 10 獲得之呈氣體形式或呈鹽酸形式之鹽酸反應，以形成相應第 2 族金屬氯化物( $\text{CaCl}_2$  及/或  $\text{MgCl}_2$ )、水及矽( $\text{SiO}_2$ )。反應可由反應式 3 表示。



由此反應產生之一些或所有水可傳遞至反應器 10 中。來自

反應式3之一些或所有第2族氯化物可傳遞至反應器20中。在一些實施例中，一些或所有第2族氯化物以水溶液形式傳遞至反應器20中。在一些實施例中，一些或所有第2族氯化物以水性懸浮液形式傳遞至反應器20中。在一些實施例中，一些或所有第2族氯化物以固體形式傳遞至反應器20中。

匯合反應式1-3之總和之淨反應以反應式4展示於此：



在另一實施例中，所得 $\text{Mg}_x\text{Ca}_{(1-x)}\text{CO}_3$ 捕捉物(sequestant)與HCl以某種方式反應以再生及濃縮 $\text{CO}_2$ 。由此形成之 $\text{Ca/MgCl}_2$ 返回至分解反應器中以產生吸收 $\text{CO}_2$ 之氫氧化物或羥基鹵化物。

經由圖1中所示及本文所述之過程，第2族碳酸鹽係作為終點捕捉物質自捕獲之 $\text{CO}_2$ 產生。一些或所有水、氯化氫及/或反應能量可經循環。在一些實施例中，此等者中僅一些或無一者經循環。在一些實施例中，所產生之水、氯化氫及反應能量可用於其他目的。

此等方法及器件可使用如熟習此項技術者應用之化學、化學工程及/或材料科學之原理及技術來進一步改進(例如使用模組組件)、最佳化及按比例放大。此等原理及技術教示於例如以下文獻中：美國專利7,727,374、美國專利申請公開案2006/0185985及2009/0127127、2005年9月22日申請之美國專利申請案第11/233,509號、2005年9月20日申請之美國臨時專利申請案第60/718,906號、2005年1月10日申

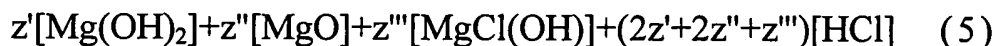
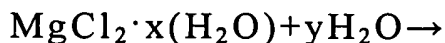
請之美國臨時專利申請案第60/642,698號、2004年9月23日申請之美國臨時專利申請案第60/612,355號、2008年9月22日申請之美國專利申請案第12/235,482號、2007年9月20日申請之美國臨時申請案第60/973,948號、2008年2月29日申請之美國臨時申請案第61/032,802號、2008年3月3日申請之美國臨時申請案第61/033,298號、2010年1月20日申請之美國臨時申請案第61/288,242號、2010年7月8日申請之美國臨時申請案第61/362,607號及2008年9月19日申請之國際申請案第PCT/US08/77122號。以上提及之各揭示案之全部文字(包括任何附錄)不加刪減地以引用的方式明確併入本文中。

納入以上實例以說明本發明之特定實施例。然而，熟習此項技術者根據本發明應瞭解，在不脫離本發明精神及範疇之情況下在所揭示之特定實施例中可作出許多變化且仍獲得相同或類似結果。

### III. 使用 $Mg^{2+}$ 作為催化劑捕捉二氧化碳

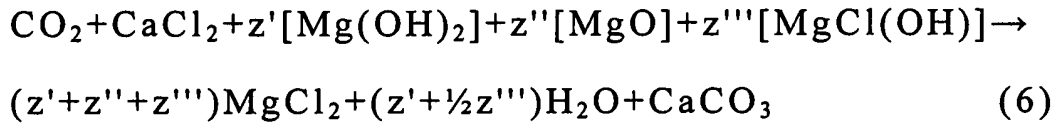
圖2描述說明本發明之裝置及方法之一般例示性實施例的簡化方法流程圖。此圖僅出於說明之目的而提供，且因此僅描述本發明之特定實施例且不欲以任何方式限制申請專利範圍之範疇。

在圖2中所示之實施例中，反應器100使用動力，諸如外部動力及/或再捕獲動力(例如來自熱廢氣之熱)以驅動由反應式5表示之分解型反應。



此反應中所用之水可呈氯化鎂之水合物、液體、蒸汽形式，及/或其可為超臨界水。在一些實施例中，反應可在1個、2個、3個或3個以上反應器中進行。在一些實施例中，反應可以分批、半分批或連續過程進行。在一些實施例中，一些或所有鎂鹽產物可傳遞至反應器200中。在一些實施例中，一些或所有鎂鹽產物以水溶液形式傳遞至反應器200中。在一些實施例中，一些或所有鎂鹽產物以水性懸浮液形式傳遞至反應器200中。在一些實施例中，一些或所有鎂鹽產物以固體形式傳遞至反應器200中。在一些實施例中，一些或所有氯化氫(例如呈蒸氣形式或呈鹽酸形式)可傳遞至反應器300(例如岩石熔化器)中。在一些實施例中， $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 經進一步加熱以移除水且形成 $\text{MgO}$ 。在一些實施例中， $\text{MgCl}(\text{OH})$ 經進一步加熱以移除 $\text{HCl}$ 且形成 $\text{MgO}$ 。在一些變化形式中， $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 $\text{MgCl}(\text{OH})$ 及 $\text{MgO}$ 中之一或多者可接著傳遞至反應器200中。

來自某一來源(例如廢氣)之二氧化碳在反應器200(例如流體化床反應器、噴霧塔脫除二氧化碳器或脫除二氧化碳鼓泡器)處進入過程中，此有可能在初始與廢熱/DC產生系統交換廢熱之後發生。在一些實施例中，廢氣溫度為至少 $125^\circ\text{C}$ 。來自反應器100之鎂鹽產物、及 $\text{CaCl}_2$ (例如岩鹽)與二氧化碳摻合。二氧化碳根據由反應式6表示之反應在反應器200中與鎂鹽產物及 $\text{CaCl}_2$ 反應。



在一些實施例中，由此反應產生之水可回傳至反應器100中。碳酸鈣產物(例如石灰石(limestone)、方解石(calcite))通常自反應混合物中分離(例如經沈澱)。在一些實施例中，反應行經碳酸鎂及碳酸氫鎂鹽。在一些實施例中，反應行經碳酸氫鈣鹽。在一些實施例中，產生各種第2族碳酸氫鹽且視情況接著自反應混合物中分離。在一些實施例中，已移除CO<sub>2</sub>及/或其他污染物之廢氣視情況在一或多個進一步純化及/或處理步驟之後釋放至空氣中。在一些實施例中，視情況經水合之MgCl<sub>2</sub>產物返回至反應器100中。在一些實施例中，MgCl<sub>2</sub>產物在返回至反應器100中之前經歷一或多個分離、純化及/或水合步驟。

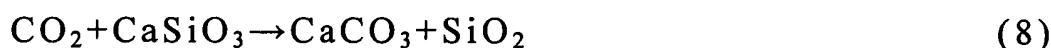
矽酸鈣(例如3CaO·SiO<sub>2</sub>、Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>；2CaO·SiO<sub>2</sub>、Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>；3CaO·2SiO<sub>2</sub>、Ca<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>及CaO·SiO<sub>2</sub>、CaSiO<sub>3</sub>)在反應器300(例如岩石熔化器)處進入過程中。在一些實施例中，此等第2族矽酸鹽在前一步驟中經研磨。在一些實施例中，第2族矽酸鹽為鏈狀矽酸鹽。在圖2之實施例中，鏈狀矽酸鹽為CaSiO<sub>3</sub>(例如矽灰石(wollastonite))，在一些實施例中，其自身可能含有少量鐵、替代鐵之鎂及/或錳)。CaSiO<sub>3</sub>與一些或所有可自反應器100獲得之氣體形式或呈鹽酸形式之氯化氫反應，以形成CaCl<sub>2</sub>、水及矽(SiO<sub>2</sub>)。反應可由反應式7表示。



反應	$\Delta H$ , kJ/mol**	反應溫度範圍
$2 \text{HCl}(\text{氣體}) + \text{CaSiO}_3 \rightarrow \text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2$	-254	90°C-150°C
$2 \text{HCl}(\text{氣體}) + \text{MgSiO}_3 \rightarrow \text{MgCl}_2(\text{水溶液}) + \text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2$	-288	90°C-150°C

\*\*焓係基於反應溫度及引入反應物及引出產物流之溫度。由此反應產生之一些或所有水可傳遞至反應器100中。來自反應式7之一些或所有CaCl<sub>2</sub>可傳遞至反應器200中。在一些實施例中，一些或所有CaCl<sub>2</sub>以水溶液形式傳遞至反應器200中。在一些實施例中，一些或所有CaCl<sub>2</sub>以水性懸浮液形式傳遞至反應器200中。在一些實施例中，一些或所有CaCl<sub>2</sub>以固體形式傳遞至反應器200中。

匯合反應式5-7之總和之淨反應以反應式8展示於此：



反應	$\Delta H$ , kJ/mol**	$\Delta G$ , kJ/mol**
$\text{CO}_2 + \text{CaSiO}_3 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2$	-89	-39

\*\*在標準溫度及壓力(STP)下量測。經由圖2中所示及本文所述之過程，碳酸鈣係作為終點捕捉物質自CO<sub>2</sub>及鏈狀矽酸鈣產生。各種鎂鹽、水、氯化氫及反應能量中之一些或所有可經循環。在一些實施例中，此等者中僅一些或無一者經循環。在一些實施例中，所產生之水、氯化氫及/或反應能量可用於其他目的。

此等方法及器件可使用如熟習此項技術者應用之化學、化學工程及/或材料科學之原理及技術來進一步改進、最佳化及按比例放大。此等原理及技術教示於例如以下文獻中：美國專利7,727,374、美國專利申請公開案

2006/0185985及2009/0127127、2005年9月22日申請之美國專利申請案第11/233,509號、2005年9月20日申請之美國臨時專利申請案第60/718,906號、2005年1月10日申請之美國臨時專利申請案第60/642,698號、2004年9月23日申請之美國臨時專利申請案第60/612,355號、2008年9月22日申請之美國專利申請案第12/235,482號、2007年9月20日申請之美國臨時申請案第60/973,948號、2008年2月29日申請之美國臨時申請案第61/032,802號、2008年3月3日申請之美國臨時申請案第61/033,298號、2010年1月20日申請之美國臨時申請案第61/288,242號、2010年7月8日申請之美國臨時申請案第61/362,607號及2008年9月19日申請之國際申請案第PCT/US08/77122號。以上提及之各揭示案之全部文字(包括任何附錄)不加刪減地以引用的方式明確併入本文中。

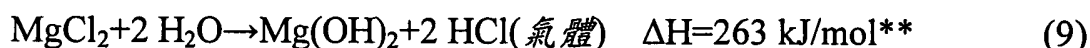
納入以上實例以說明本發明之特定實施例。然而，熟習此項技術者根據本發明應瞭解，在不脫離本發明精神及範疇之情況下在所揭示之特定實施例中可作出許多變化且仍獲得相同或類似結果。

#### IV. 第2族氯化物轉化成第2族氫氧化物

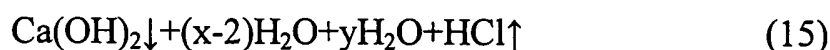
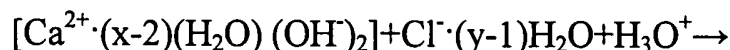
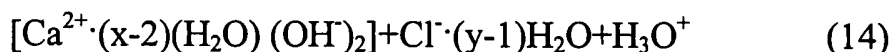
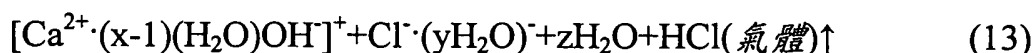
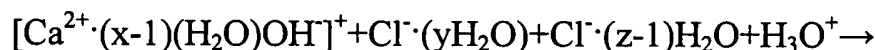
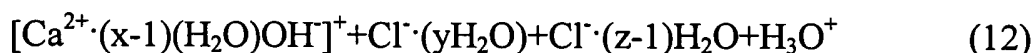
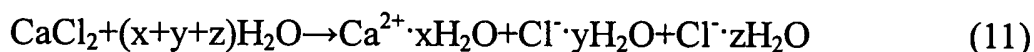
本文揭示使第2族氯化物(例如 $\text{CaCl}_2$ 或 $\text{MgCl}_2$ )與水反應以形成第2族氫氧化物、第2族氧化物及/或複鹽(諸如第2族氫氧化物氯化物)之方法。此等反應通常稱為分解。在一些實施例中，水可呈液體、蒸汽形式，來自第2族氯化物之水合物，及/或其可為超臨界水。蒸汽可來自極可燃反應物(亦即天然氣及氧氣或氫氣及氯氣)之熱藉此加熱水流

之熱交換器。在一些實施例中，蒸汽亦可經由使用工廠廢熱而產生。在一些實施例中，亦加熱無水或水合氯化物鹽。

在  $Mg^{2+}$  及  $Ca^{2+}$  之情況下，反應可分別由反應式 9 及 10 表示：



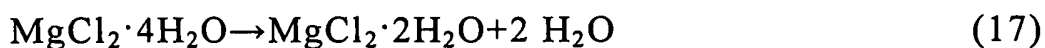
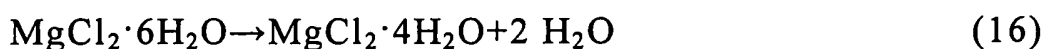
\*\*在 100°C 下量測。反應為吸熱的，意謂必須施加能量(例如熱)以使此等反應發生。此能量可自本文揭示之一或多個放熱過程步驟所產生之廢熱獲得。以上反應可根據一或多個以下步驟進行：



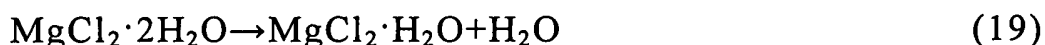
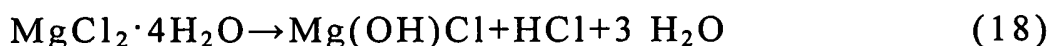
在 100°C 下， $CaCl_2 + 2 H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + 2 HCl(\text{氣體})$  之反應焓 ( $\Delta H$ ) 為 284 kJ/mol。在一些變化形式中，使用六水合鎂鹽  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 。因為水併入鹽之分子結構中，所以無任何額外蒸汽或水之直接加熱可用於引發分解。以下反應之典型

反應溫度展示於此：

95-110°C：



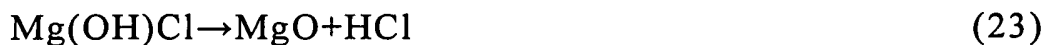
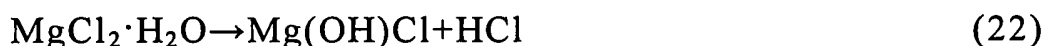
135-180°C：



185-230°C：



>230°C：



反應	參考溫度 範圍	$\Delta H$ ， kJ/mol**	反應溫度
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + 2 \text{H}_2\text{O}$ (氣體)	95°C-110°C	115.7	100°C
$\text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MgCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 2 \text{H}_2\text{O}$ (氣體)	95°C-110°C	134.4	100°C
$\text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})\text{Cl} + \text{HCl}(\text{氣體}) + 3$ $\text{H}_2\text{O}(\text{氣體})$	135°C-180°C	275	160°C
$\text{MgCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}(\text{氣體})$	135°C-180°C	70.1	160°C
$\text{MgCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})\text{Cl} + \text{HCl}(\text{氣體})$ $+ \text{H}_2\text{O}(\text{氣體})$	185°C-230°C	141	210°C
$\text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MgCl}_2 + \text{H}_2\text{O}(\text{氣體})$	>230°C	76.6	240°C

$\text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg(OH)Cl} + \text{HCl}(\text{氣體})$	>230°C	70.9	240°C
$\text{Mg(OH)Cl} \rightarrow \text{MgO} + \text{HCl}(\text{氣體})$	>230°C	99.2	450°C

\*\* $\Delta H$ 值係在反應溫度(「反應溫度」一欄)下計算。參見化學參考文獻Kirk Othmer, 第4版, 第15卷, 第343頁, 1998 John Wiley and Sons, 其以引用的方式併入本文中。參見以下實例1, 其提供證實能夠使用便宜原料 $\text{CaCl}_2$ 自廢氣中捕獲 $\text{CO}_2$ 以形成 $\text{CaCO}_3$ 之模擬的結果。

#### V. 第2族氫氧化物與 $\text{CO}_2$ 反應以形成第2族碳酸鹽

在本發明之另一態樣中, 提供使用第2族氫氧化物、第2族氧化物及/或第2族氫氧化物氯化物作為 $\text{CO}_2$ 吸附劑來脫除二氧化碳來源之二氧化碳的裝置及方法。在一些實施例中, 使 $\text{CO}_2$ 吸收至水性苛性鹼混合物及/或溶液中, 在其中 $\text{CO}_2$ 與氫氧化物及/或氧化物鹽反應以形成碳酸鹽及碳酸氫鹽產物。已知各種濃度之氫氧化鈉、氫氧化鈣及氫氧化鎂易吸收 $\text{CO}_2$ 。因此, 在本發明之實施例中, 第2族氫氧化物、第2族氧化物(諸如 $\text{CaO}$ 及/或 $\text{MgO}$ )及/或其他氫氧化物及氧化物(例如氫氧化鈉)可用作吸收試劑。

舉例而言, 自例如第2族氯化物獲得之第2族氫氧化物可用於吸附塔中以基於以下一或兩個反應與 $\text{CO}_2$ 反應且藉此捕獲 $\text{CO}_2$ :



$$\Delta H = -117.92 \text{ kJ/mol}^{**}$$

$$\Delta G = -79.91 \text{ kJ/mol}^{**}$$



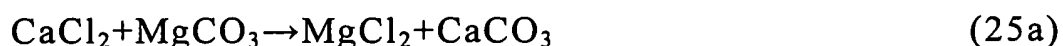
$$\Delta H = -58.85 \text{ kJ/mol}^{**}$$

$$\Delta G = -16.57 \text{ kJ/mol}^{**}$$

\*\*在STP下計算。

在本發明之一些實施例中，大多數或幾乎所有二氧化碳以此方式反應。在一些實施例中，可例如經由以連續過程或不連續過程移除水及/或藉助於碳酸氫鹽、碳酸鹽或兩種類型鹽之混合物沈澱來驅動反應完成。參見以下實例1，其提供證實能夠使用得自CaCl<sub>2</sub>之便宜原料Ca(CO)<sub>2</sub>自廢氣中捕獲CO<sub>2</sub>以形成CaCO<sub>3</sub>之模擬。

在一些實施例中，初始形成之第2族可經歷與第二第2族氫氧化物之鹽交換反應以轉移碳酸根陰離子。舉例而言：



此等方法及器件可使用如熟習此項技術者應用之化學、化學工程及/或材料科學之原理及技術進一步改進、最佳化及按比例放大。此等原理及技術教示於例如以下文獻中：美國專利7,727,374、2005年9月22日申請之美國專利申請案第11/233,509號、2005年9月20日申請之美國臨時專利申請案第60/718,906號、2005年1月10日申請之美國臨時專利申請案第60/642,698號、2004年9月23日申請之美國臨時專利申請案第60/612,355號、2008年9月22日申請之美國專利申請案第12/235,482號、2007年9月20日申請之美國臨時申請案第60/973,948號、2008年2月29日申請之美國臨時申請案第61/032,802號、2008年3月3日申請之美國臨時申請案第61/033,298號、2010年1月20日申請之美國臨時申請

案第 61/288,242 號、2010 年 7 月 8 日申請之美國臨時申請案第 61/362,607 號及 2008 年 9 月 19 日申請之國際申請案第 PCT/US08/77122 號。以上提及之各揭示案之全部文字(包括任何附錄)不加刪減地以引用的方式明確併入本文中。

## VI. 捕捉二氧化碳之矽酸鹽礦物質

在本發明之態樣中，提供使用矽酸鹽礦物質捕捉二氧化碳之方法。矽酸鹽礦物質構成最大且最重要之成岩礦物質種類之一，佔地殼之約 90%。矽酸鹽礦物質基於其矽酸根基團之結構加以分類。矽酸鹽礦物質皆含有矽及氧。在本發明之一些態樣中，第 2 族矽酸鹽可用於達成以高能效方式捕捉二氧化碳。

在一些實施例中，可使用包含第 2 族鏈狀矽酸鹽之組合物。鏈狀矽酸鹽或鏈矽酸鹽具有矽酸鹽四面體之連鎖鏈，對於單鏈，該四面體具有  $\text{SiO}_3$ (1:3 比率)，或對於雙鏈，該四面體具有  $\text{Si}_4\text{O}_{11}$ (4:11 比率)。

在一些實施例中，本文揭示之方法使用包含來自輝石群組之第 2 族鏈狀矽酸鹽之組合物。舉例而言，可使用頑火輝石 ( $\text{MgSiO}_3$ )。

在一些實施例中，使用包含來自準輝石 (pyroxenoid) 群組之第 2 族鏈狀矽酸鹽之組合物。舉例而言，可使用矽灰石 ( $\text{CaSiO}_3$ )。在一些實施例中，可採用包含第 2 族鏈狀矽酸鹽之混合物(例如頑火輝石與矽灰石之混合物)的組合物。在一些實施例中，可使用包含混合金屬第 2 族鏈狀矽酸鹽(例如透輝石 ( $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ ))之組合物。

矽灰石通常作為熱變質不純石灰石之共有組分存在。通常，矽灰石由方解石與矽石之間的以下反應(反應式26)產生，伴有二氧化碳損失：



在一些實施例中，本發明具有有效逆轉此天然過程之效果。矽灰石亦可在矽卡岩(skarn)中以擴散反應產生。其在岩脈(dyke)使砂岩內之石灰石變質時產生，該變質會由於鈣離子向外遷移而在砂岩中形成矽灰石。

在一些實施例中，第2族鏈狀矽酸鹽組合物之純度可不同。舉例而言，預期用於所揭示方法中之第2族鏈狀矽酸鹽組合物可含有不同量之其他化合物或礦物質，包括非第2族金屬離子。舉例而言，矽灰石自身可含有少量替代鈣之鐵、鎂及錳。

在一些實施例中，可使用包含橄欖石及/或蛇紋石之組合物。已嘗試利用此等礦物質之CO<sub>2</sub>礦物質捕捉方法。Goldberg等人(2001)之技術以引用的方式併入本文中。

礦物質橄欖石為具有式(Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>之鎂鐵矽酸鹽。當其為寶石品質時，稱為貴橄欖石(peridot)。橄欖石存在於鎂鐵質與超鎂鐵質火成岩中且為某些變質岩中之主要礦物質。已知富含Mg之橄欖石會自富含鎂且含較少矽石之岩漿中結晶。結晶時，岩漿形成鎂鐵質岩石，諸如輝長岩(gabbro)及玄武岩(basalt)。諸如橄欖岩(peridotite)及純橄欖岩(dunite)之超鎂鐵質岩石可為在提取岩漿之後留下之殘餘物，且通常在提取部分熔體之後更富集於橄欖石中。

橄欖石及高壓結構變體佔地球上地幔之50%以上，且以體積計，橄欖石為地球最常見之礦物質之一。鎂含量較高且矽石含量較低之不純白雲石(dolomite)或其他沈積岩之變質亦產生富含Mg之橄欖石或鎂橄欖石(forsterite)。

#### VII. 自第2族矽酸鹽產生第2族氯化物

第2族矽酸鹽，例如 $\text{CaSiO}_3$ 、 $\text{MgSiO}_3$ 及/或本文揭示之其他矽酸鹽，可與呈氣體形式或呈鹽酸水溶液形式之鹽酸反應，以形成相應第2族金屬氯化物( $\text{CaCl}_2$ 及/或 $\text{MgCl}_2$ )、水及砂。在一些實施例中，反應式1中產生之HCl用於再生反應式3中之 $\text{MgCl}_2$ 及/或 $\text{CaCl}_2$ 。藉此產生過程迴路。下表1描述一些可單獨或組合使用之常見含鈣/鎂之矽酸鹽礦物質。藉由使橄欖石及蛇紋石與HCl反應進行之初始測試已獲得成功。觀測到 $\text{SiO}_2$ 沈澱出且收集 $\text{MgCl}_2$ 及 $\text{CaCl}_2$ 。

表 1：鈣/鎂礦物質

礦物質	化學式(標準表示法)	化學式(氧化物表示法)	第2族:SiO <sub>2</sub> 之比率	第2族:總體之比率
橄欖石	(Mg,Fe) <sub>2</sub> [SiO <sub>4</sub> ]	(MgO,FeO) <sub>2</sub> ·SiO <sub>2</sub>	1:1	1:2
蛇紋石	Mg <sub>6</sub> [OH] <sub>8</sub> [Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ]	6MgO·4SiO <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	3:2	未定
海泡石	Mg <sub>4</sub> [(OH) <sub>2</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>15</sub> ] <sub>6</sub> ·6H <sub>2</sub> O	3MgO·Mg(OH) <sub>2</sub> ·6SiO <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	2:3	未定
頑火輝石	Mg <sub>2</sub> [Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ]	2MgO·2SiO <sub>2</sub>	1:1	未定
透輝石	CaMg[Si <sub>2</sub> O <sub>6</sub> ]	CaO·MgO·2SiO <sub>2</sub>	1:1	未定
透閃石	Ca <sub>2</sub> Mg <sub>5</sub> {[OH]Si <sub>4</sub> O <sub>11</sub> } <sub>2</sub>	2CaO·5MgO·8SiO <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	7:8	未定
矽灰石	CaSiO <sub>3</sub>	CaO·SiO <sub>2</sub>	1:1	未定

參見「Handbook of Rocks, Minerals & Gemstones, Walter Schumann, 1993年出版, Houghton Mifflin Co., Boston, New York」, 其以引用的方式併入本文中。

## VIII. 其他實施例

在一些實施例中，可由兩種鹽說明二氧化碳向礦物質碳酸鹽之轉化。第一鹽為可加熱分解直至其轉化成鹼(氫氧化物及/或氧化物)且放出例如呈氣體形式之酸的鹽。此上述鹼與二氧化碳反應以形成碳酸鹽、碳酸氫鹽或鹼性碳酸鹽。

舉例而言，在一些實施例中，本發明提供使下表A-C之一或多種鹽與水反應以形成氫氧化物、氧化物及/或混合氫氧化物鹵化物之方法。此等反應通常稱為分解。在一些實施例中，水可呈液體、蒸汽形式及/或來自所選鹽之水合物。蒸汽可來自極可燃反應物(亦即天然氣及氧氣或氫氣及氯氣)之熱藉此加熱水流之熱交換器。在一些實施例中，蒸汽亦可經由使用工廠廢熱而產生。在一些實施例中，亦加熱無水或水合鹵化物鹽。

表 A：分解鹽

	Li <sup>+</sup>		Na <sup>+</sup>		K <sup>+</sup>		Rb <sup>+</sup>		Cs <sup>+</sup>	
F <sup>-</sup>	NC	N	4747	N	NC	N	10906	N	7490	N
Cl <sup>-</sup>	3876	N	19497	N	8295	N	13616	N	7785	N
Br <sup>-</sup>	3006	N	4336	N	9428	N	13814	N	8196	N
I <sup>-</sup>	6110	N	6044	N	11859	N	9806	N	8196	N

表 B：分解鹽(續)

	Mg <sup>+2</sup>		Ca <sup>+2</sup>		Sr <sup>+2</sup>		Ba <sup>+2</sup>	
F <sup>-</sup>	4698	N	3433	N	10346	N	6143	N
Cl <sup>-</sup>	4500*	6W*	5847	2W	9855	6W	8098	2W
Br <sup>-</sup>	5010	6W	2743	N	10346	6W	8114	2W
I <sup>-</sup>	2020	N	4960	N	9855	6W	10890	2W

\*後續測試已證明反應熱係在使用經加熱樣品及溫度勻變設置之TGA(熱解重量分析)以熱力學方式獲得之值的1.5-4%以內。

表 C：分解鹽(續)

	Mn <sup>+2</sup>		Fe <sup>+2</sup>		Co <sup>+2</sup>		Ni <sup>+2</sup>		Zn <sup>+2</sup>	
F <sup>-</sup>	3318	N	2101	N	5847	N	5847	N	3285	N
Cl <sup>-</sup>	5043	6W	3860	4W	3860	6W	4550	6W	8098	4W
Br <sup>-</sup>	5256	6W	11925	4W	9855	6W	5010	6W	4418	4W
I <sup>-</sup>	5043	6W	3055	4W	4123	6W	5831	6W	4271	4W
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	NC	4W	13485	4W	3351	4W	8985	6W	8344	7W

表 D：分解鹽(續)

	Ag <sup>+</sup>		La <sup>+3</sup>	
F <sup>-</sup>	2168	N	13255	7W
Cl <sup>-</sup>	5486	N	7490	7W
Br <sup>-</sup>	6242	N	5029	7W
I <sup>-</sup>	6110	N	4813	7W
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	6159	N	10561	6W

對於表 A-D，數值資料對應於每捕捉一份CO<sub>2</sub>量所對應之能量(千瓦時/公噸)，NC=不收斂，且NA=資料不可用。

第一鹽之此上述碳酸鹽、碳酸氫鹽或鹼性碳酸鹽與第二鹽反應以進行碳酸根/碳酸氫根交換，使得第二鹽之陰離子與第一鹽之陽離子組合且第二鹽之陽離子與第一鹽之碳酸根/碳酸氫根離子組合，此形成最終碳酸鹽/碳酸氫鹽。

在一些情況下，得自第一鹽之氫氧化物直接與二氧化碳及第二鹽反應以形成得自第二鹽(與第二鹽之陽離子組合)之碳酸鹽/碳酸氫鹽。在其他情況下，將得自第一鹽(與第

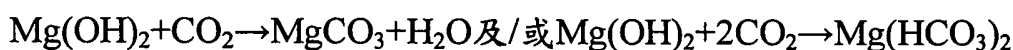
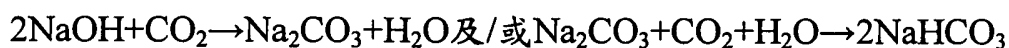
一鹽之陽離子組合)之碳酸鹽/碳酸氫鹽/鹼性碳酸鹽自反應器腔室中移除且置放於第二腔室中以與第二鹽反應。圖27展示此二鹽方法之實施例。

此反應在以下情況下製備碳酸鹽/碳酸氫鹽時可為有益的：當需要第二金屬之鹽，且此第二金屬不能分解形成吸收CO<sub>2</sub>之氫氧化物時，且若第二鹽之碳酸鹽/碳酸氫鹽化合物不可溶，亦即其自溶液中沈澱。以下為可單獨或組合(包括與本文論述之一或多個任一反應組合)使用之此等反應之實例的非詳盡清單。

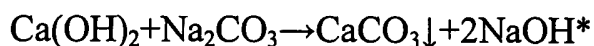
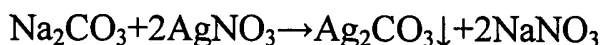
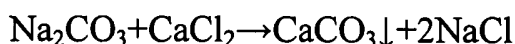
鹽-1分解之實例：



脫除二氧化碳之實例：



與鹽-2進行碳酸根交換之實例：



\*在此情況下，碳酸鹽Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>為鹽-2，且分解形成Ca(OH)<sub>2</sub>之鹽，亦即CaCl<sub>2</sub>為鹽-1。此為一些先前實例之逆轉，因為碳酸根離子與鹽-1保持在一起。

已知碳酸鹽化合物包括H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、Rb<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、BeCO<sub>3</sub>、MgCO<sub>3</sub>、CaCO<sub>3</sub>、

MgCO<sub>3</sub>、SrCO<sub>3</sub>、BaCO<sub>3</sub>、MnCO<sub>3</sub>、FeCO<sub>3</sub>、CoCO<sub>3</sub>、CuCO<sub>3</sub>、ZnCO<sub>3</sub>、Ag<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、CdCO<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>、Tl<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、PbCO<sub>3</sub>及La<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>。第IA族元素已知為穩定碳酸氫鹽，例如LiHCO<sub>3</sub>、NaHCO<sub>3</sub>、RbHCO<sub>3</sub>及CsHCO<sub>3</sub>。第IIA族及一些其他元素亦可形成碳酸氫鹽，但在一些情況下，其僅可在溶液中穩定。通常，成岩元素為H、C、O、F、Na、Mg、Al、Si、P、S、Cl、K、Ca、Ti、Mg及Fe。因此，以每莫耳吸收CO<sub>2</sub>之氫氧化物所對應的最少量之能量可熱分解成相應氫氧化物之此等元素的鹽可視為潛在鹽-1候選物。

基於表A-D中計算之能量，若干鹽具有低於MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O之能量。下表E概述此等鹽及經由其使用而引起的相對於MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O之損失(penalty)降低百分比。

表E：部分較低能量替代性鹽

化合物	千瓦時/公噸	降低%
MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	4500	0%
LiCl	3876	16%
LiBr	3006	50%
NaBr	4336	4%
MgI <sub>2</sub>	2020	123%
CaF <sub>2</sub>	3433	31%
CaBr <sub>2</sub>	2743	64%
MnF <sub>2</sub>	3318	36%
FeF <sub>2</sub>	2102	114%
FeCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	3860	17%
FeI <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	3055	47%
CoCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	3860	17%
CoI <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	4123	9%
CoSO <sub>4</sub> ·4H <sub>2</sub> O	3351	34%

ZnF <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	3285	37%
ZnBr <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	4418	2%
ZnI <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	4271	5%
CdF <sub>2</sub>	3137	43%
AgF	2168	108%

以下鹽經由其各別可用 MSDS 資訊來詳細說明分解反應。

表 F

化合物	分解能量	註解
MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	4500	
MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	5043	僅Mn <sup>+2</sup> 形成穩定碳酸鹽
NaI·2H <sub>2</sub> O	1023	過少
CoI <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	4123	過少
FeCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	3860	可氧化成氧化鐵，此將不會形成穩定碳酸鹽
LiBr	3006	過少
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	1606	留下Nox
CoSO <sub>4</sub> ·4H <sub>2</sub> O	3351	稍少，留下SO <sub>3</sub>
CdCl <sub>2</sub> ·2.5H <sub>2</sub> O	不可用	毒性副產物
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	2331	留下NO <sub>2</sub>

化合物	參考文獻
MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	
MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	<a href="http://avogadro.chem.iastate.edu/MSDS/MnCl2.htm">http://avogadro.chem.iastate.edu/MSDS/MnCl2.htm</a>
NaI <sub>2</sub> ·H <sub>2</sub> O	<a href="http://www.chemicalbook.com/ProductMSDSDetailCB6170714_EN.htm">http://www.chemicalbook.com/ProductMSDSDetailCB6170714_EN.htm</a>
CoI <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	<a href="http://www.espimetals.com/index.php/msds/527-cobalt-iodide">http://www.espimetals.com/index.php/msds/527-cobalt-iodide</a>
FeCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	
LiBr	<a href="http://www.chemcas.com/material/cas/archive/7550-35-8_v1.asp">http://www.chemcas.com/material/cas/archive/7550-35-8_v1.asp</a>
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	<a href="http://avogadro.chem.iastate.edu/MSDS/MgNO3-6H2O.htm">http://avogadro.chem.iastate.edu/MSDS/MgNO3-6H2O.htm</a>
CoSO <sub>4</sub> ·4H <sub>2</sub> O	<a href="http://www.chemicalbook.com/ProductMSDSDetailCB0323842_EN.htm">http://www.chemicalbook.com/ProductMSDSDetailCB0323842_EN.htm</a>
CdCl <sub>2</sub> ·2.5H <sub>2</sub> O	<a href="http://www.espimetals.com/index.php/msds/460-cadmium-chloride">http://www.espimetals.com/index.php/msds/460-cadmium-chloride</a>
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	<a href="http://avogadro.chem.iastate.edu/MSDS/Ca%28NO3%292-4H2O.htm">http://avogadro.chem.iastate.edu/MSDS/Ca%28NO3%292-4H2O.htm</a>

## IX. 石灰石產生與用途

在本發明之態樣中，提供捕捉呈石灰石形式之二氧化碳之方法。石灰石為主要由礦物質方解石(碳酸鈣： $\text{CaCO}_3$ )構成之沈積岩。此礦物質具有許多用途，以下鑑別其中一些用途。

如在本發明之一些實施例中形成之呈粉末或粉碎形式的石灰石可用作土壤調節劑(農用石灰)以中和酸性土壤條件，藉此例如中和生態系統中之酸雨效應。上游應用包括使用石灰石作為脫硫試劑。

石灰石為用於砌築及建築之重要石料。其優點之一在於其相對容易切割成塊狀物或進行更精細雕刻。其亦耐用且充分經得起暴露。石灰石為生石灰、灰泥、水泥及混凝土之關鍵成分。

碳酸鈣亦用作紙張、塑膠、油漆、瓷磚及其他材料之添加劑，呈白色顏料與便宜填料兩種形式。純化形式之碳酸鈣可用於牙膏中，且作為鈣源添加至麵包及穀類食品中。 $\text{CaCO}_3$ 亦通常在醫藥上用作抗酸劑。

當前，工業上使用之大多數碳酸鈣係藉由採礦或採石來提取。藉由作為一些實施例中二氧化碳捕捉之一部分來共同產生此礦物質，本發明提供此重要產品之一種非提取性來源。

## X. 碳酸鎂產生與用途

在本發明之態樣中，提供捕捉呈碳酸鎂形式之二氧化碳之方法。碳酸鎂 $\text{MgCO}_3$ 為一種在自然界中以礦物質形式存

在之白色固體。最常見之碳酸鎂形式為稱為菱鎂礦(magnesite)( $\text{MgCO}_3$ )之無水鹽及分別稱為水碳鎂石(barringtonite)( $\text{MgCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )、碳酸鎂石(nesquehonite)( $\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )及五水碳鎂石(lansfordite)( $\text{MgCO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )之二水合物、三水合物及五水合物。碳酸鎂具有多種用途；以下簡要論述一些此等用途。

碳酸鎂可用於產生鎂金屬及鹼性耐火磚。 $\text{MgCO}_3$ 亦用於地板用組合物、防火組合物、滅火組合物、化妝品、粉劑及牙膏中。其他應用為作為填充材料、塑膠中之防煙劑、氯丁橡膠中之增強劑、乾燥劑、輕瀉劑(laxative)及在食品中用於顏色保持。另外，高純度碳酸鎂用作抗酸劑及用作食鹽中之添加劑以保持其自由流動性。

當前，碳酸鎂通常係藉由開採礦物質菱鎂礦而獲得。藉由作為一些實施例中二氧化碳捕捉之一部分來共同產生此礦物質，本發明提供此重要產品之一種非提取性來源。

## XI. 二氧化矽產生與用途

在本發明之態樣中，提供捕捉二氧化碳且以副產物形式產生二氧化矽之方法。二氧化矽(亦稱為矽石)為具有化學式 $\text{SiO}_2$ 之矽氧化物且因其硬度而眾所周知。矽石在自然界中最常以砂或石英形式存在，且見於矽藻之細胞壁中。矽石為地殼中最豐富之礦物質。此化合物具有許多用途；以下簡要論述一些此等用途。

矽石主要用於生產窗玻璃、飲用玻璃杯及瓶裝飲料。大多數電信用光纖亦由矽石製成。矽石為許多白陶陶瓷(諸

如陶器、缸器及瓷器)以及工業波特蘭水泥(Portland cement)之主要原料。

矽石為食品生產中之常用添加劑，在此其主要作為助流劑用於粉狀食品中，或在吸濕應用中用於吸收水。呈水合形式之矽石作為硬研磨劑用於牙膏中以移除牙斑。矽石為矽藻土之主要組分，矽藻土具有許多用途，範圍自過濾延伸至昆蟲防治。矽石亦為例如在過濾及水泥製造中使用之稻殼灰之主要組分。

經由熱氧化方法在矽晶圓上產生之矽石薄膜在微電子學中可極其有益，在此其充當化學穩定性較高之電絕緣體。在電學應用中，其可保護矽，儲存電荷，阻斷電流，且甚至充當用以限制電流之受控路徑。

矽石通常係以包括玻璃、晶體、凝膠、氣凝膠、煙霧狀矽石及膠態矽石之若干形式製造。藉由作為一些實施例中二氧化碳捕捉之一部分來共同產生此礦物質，本發明提供此重要產品之另一來源。

## XII. 分離產物

可採用分離過程以自液體溶液及/或反應混合物中分離碳酸鹽及碳酸氫鹽產物。藉由操作基本濃度、溫度、壓力、反應器尺寸、流體深度及碳酸化程度，可使一或多種碳酸鹽及/或碳酸氫鹽之沈澱物出現。或者，可藉由與引入之廢氣進行熱能交換而自溶液中分離碳酸鹽/碳酸氫鹽產物。

視反應器設計而定，退出液體流可包括水、 $\text{CaCO}_3$ 、

$\text{MgCO}_3$ 、 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 、 $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{NaOH}$ 、 $\text{NaHCO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 及處於各種平衡狀態之其他溶解氣體。亦可發現溶解之痕量放出組分，諸如 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{HNO}_3$ 及 $\text{Hg}$ 。在一個實施例中，自碳酸鹽產物中移除/分離水涉及例如使用再沸器增添熱能，以自混合物中蒸發水。或者，在分離腔室中保留部分鹼性溶液且隨後加熱該溶液可用於使相對純淨之碳酸鹽沈澱至儲料槽中且使剩餘氫氧化物鹽再循環回反應器中。在一些實施例中，可接著將處於平衡濃度中及/或呈漿料或濃縮形式之純碳酸鹽、純碳酸氫鹽及兩者之混合物定期輸送至卡車/槽車中。在一些實施例中，可將液體流移置至蒸發槽/蒸發場中，在此諸如水之液體可藉由蒸發而帶走。

氣態產物之釋放包括氫氧化物或氧化物鹽是否將安全釋放，亦即排放「鹼雨」之顧慮。在一些實施例中，可藉由使用簡單且便宜之冷凝器/回流單元來防止此等氣霧化苛性鹽之排放。

在一些實施例中，可使用單獨或連同水移除方法一起使用之方法使碳酸鹽沈澱。各種碳酸鹽平衡具有特徵範圍，在該等範圍內，當升高溫度時，既定碳酸鹽(例如 $\text{CaCO}_3$ )將自然地沈澱並聚集，使其可以漿料形式被取出，該漿料中伴有一些少量排出之 $\text{NaOH}$ 。

### XIII. 回收廢熱

因為本發明之某些實施例係在以來自燃燒過程(諸如在發電廠中發生之燃燒過程)之廢氣或其他熱氣體形式大量

排放 CO<sub>2</sub> 之情形下採用，所以有充分的機會來利用此『廢』熱，例如用於使第2族氯化物鹽轉化成第2族氫氧化物。舉例而言，典型引入廢氣溫度(例如在靜電沈澱處理之後)為約 300°C。熱交換器可使彼廢氣降至低於 300°C 之點，同時對水及/或第2族氯化物鹽加溫以促進此轉化。

一般而言，因為可在發電廠中獲得之廢氣係以介於 100°C(通常經洗滌)、300°C(在沈澱處理之後)與 900°C(沈澱入口)之間的溫度或其他此類溫度退出，所以大量廢熱處理可藉由與動力回收循環(例如氨-水循環(例如「卡琳娜(Kalina)」循環)、蒸汽循環或達成相同熱力學意義之任何此類循環)進行熱交換使引入廢氣冷卻來獲取。因為本發明之一些實施例依賴於直流電力(DC power)來達成試劑/吸收劑之製造，所以可藉由在不存在與彼直流電力轉換成交流電力(AC power)以達成其他用途相關之正常變壓器損耗之情況下達成的廢熱回收來直接對過程部分或完全提供動力。另外，經由使用廢熱-功轉換引擎(waste-heat-to-work engine)，可在完全不採用電產生步驟之情況下達成顯著效率。在一些條件下，可發現此等廢熱回收能量之量可完全對本發明之實施例提供動力。

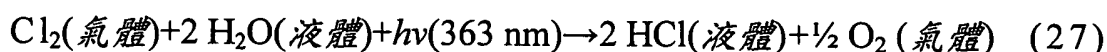
#### XIV. 替代性方法

如上所述，本發明之裝置及方法之一些實施例經各種反應步驟產生許多有用中間物、副產物及最終產物，包括氯化氫、第2族碳酸鹽、第2族氫氧化物鹽等。在一些實施例中，此等者中之一些或所有可用於下文所述之一或多種方

法中。在一些實施例中，用於一或多個上述步驟中之一些或所有起始物質或中間物之一係使用下文概述之一或多種方法獲得。

#### A. 使用氯氣對第2族矽酸鹽進行氯化

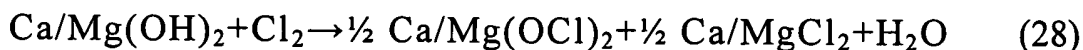
在一些實施例中，氯氣可液化成鹽酸，其接著用於氯化第2族矽酸鹽礦物質。氯氣之液化及鹽酸之後續使用尤其在氯氣市場飽和之情況下特別具有吸引力。氯氣之液化可根據反應式27達成：



在一些實施例中，由此產生之氧氣可返回至發電廠自身之空氣入口，在此已證實，在整個電力工業研究過程中，具有富含氧氣入口之工廠：(a)卡諾效率(Carnot-efficiency)較高，(b)CO<sub>2</sub>退出流較濃縮，(c)用以加溫入口空氣之熱交換較少，及(d)具有優於非氧氣增強型工廠之其他優點。在一些實施例中，氧氣可用於氫氣/氧氣燃料電池中。在一些實施例中，氧氣可在經設計用於例如使用氫氣與天然氣之混合物產生天然氣動力之渦輪機中充當氧化劑之一部分。

#### B. 使用氯氣對第2族氫氧化物進行氯化

在一些實施例中，氯氣可與第2族氫氧化物鹽反應以產生氯化物與次氯酸鹽之混合物(反應式28)。舉例而言，HCl可作為產品出售且第2族氫氧化物鹽可用於移除過量氯氣。



- ✓ (←可接著使用鈷或鎳催化劑使第2族次氯酸鹽分解以形成氧氣及相應氯化物(反應式29)。



- ✓ (←可接著回收氯化鈣及/或氯化鎂。

## XV. 自來源移除其他污染物

除自來源移除CO<sub>2</sub>以外，在本發明之一些實施例中，脫除二氧化碳條件亦將移除SO<sub>x</sub>及NO<sub>x</sub>，且在較小程度上移除汞。在本發明之一些實施例中，NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>及汞化合物之伴隨洗滌可設想具有較大經濟重要性；亦即，藉由採用本發明之實施例，含有大量此等化合物之煤可在發電廠中燃燒，且在一些實施例中，所產生之污染小於未利用CO<sub>2</sub>吸收方法處理之較高等級煤。

## XVI. 實例

納入以下實例以說明本發明之一些實施例。熟習此項技術者應瞭解，以下實例中揭示之技術代表發明者所發現的在本發明實施中充分發揮功能之技術，且因此可視為構成本發明實施之較佳模式。然而，熟習此項技術者根據本發明應瞭解，在不脫離本發明精神及範疇之情況下在所揭示之特定實施例中可作出許多變化且仍獲得相同或類似結果。

### 實例1-使用CaCl<sub>2</sub>自廢氣中捕獲CO<sub>2</sub>以形成CaCO<sub>3</sub>之過程 模擬

使用利用已知反應焓、反應自由能及規定參數之Aspen Plus 7.1版軟體模擬本發明之一個實施例，以確定質量及

能量平衡以及適於利用  $\text{CaCl}_2$  及熱自廢氣流中捕獲  $\text{CO}_2$  以形成  $\text{CaCO}_3$  產物之條件。此等結果顯示有可能使用便宜原料  $\text{CaCl}_2$  及水自廢氣中捕獲  $\text{CO}_2$  以形成  $\text{CaCO}_3$ 。

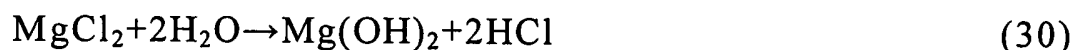
規定參數之一部分包括圖 5 中所示之方法流程圖。模擬之結果表明使  $\text{MgCl}_2$  流再循環以與  $\text{H}_2\text{O}$  及熱反應而形成  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  為高效的。此  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  接著與飽和  $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$  溶液及來自廢氣之  $\text{CO}_2$  反應以形成  $\text{CaCO}_3$ ，將  $\text{CaCO}_3$  自物流中濾出。由此形成之  $\text{MgCl}_2$  再循環至第一反應器中以再次開始過程。此過程不限於  $\text{CaCl}_2$  之任何特定來源。舉例而言，其可由矽酸鈣與  $\text{HCl}$  反應以產生  $\text{CaCl}_2$  而獲得。

特定針對此模擬之約束及參數包括：

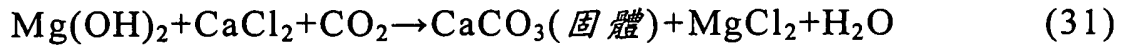
- 反應在無損耗之情況下以 100% 效率進行。當試操作 (pilot run) 確定反應效率時，可修改模擬。
- 模擬不考慮  $\text{CaCl}_2$  饋入原料中或因系統損耗而需要之任何補給  $\text{MgCl}_2$  中之雜質。

此模擬之結果指示初步淨能量消耗量為約 130 MM Btu/h。表 2a 及表 2b 提供說明模擬過程之各種物流(表中欄目)之質量及能量。各物流對應於圖 5 之物流。

該過程由 2 個主要反應區段及 1 個固體過濾區段組成。第一反應器加熱  $\text{MgCl}_2$ /水溶液，使其分解成  $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}$  蒸氣流及  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  液體流。 $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}$  蒸氣流傳送至  $\text{HCl}$  吸收柱中。 $\text{Mg}(\text{OH})_2$  溶液傳送至反應器 2 中以供進一步處理。此反應器之化學反應可由以下反應式表示：



將CaCl<sub>2</sub>溶液及廢氣流添加至反應器2中之MgCl<sub>2</sub>中。此反應形成CaCO<sub>3</sub>、MgCl<sub>2</sub>及水。CaCO<sub>3</sub>沈澱且在過濾器或傾析器中移除。剩餘MgCl<sub>2</sub>及水再循環至第一反應器中。添加額外之水以達成第一反應器所需之水平衡。此反應器之化學反應可由以下反應式表示：



此過程之主要饋料為CaCl<sub>2</sub>、廢氣(CO<sub>2</sub>)及水。系統中之MgCl<sub>2</sub>經使用、再形成及再循環。唯一所需之MgCl<sub>2</sub>補給欲補充與CaCO<sub>3</sub>產物一起離開系統之少量MgCl<sub>2</sub>及與HCl/水產物一起離開之少量MgCl<sub>2</sub>。

此過程使用淨能量。存在用以回收高溫物流中之熱以預熱饋料流之交叉熱交換。可藉由使由此形成之濃HCl與矽酸鹽礦物質反應來獲得大量熱回收。

表 2a：說明使用 CaCl<sub>2</sub> 自廢氣中捕獲 CO<sub>2</sub> 以形成 CaCO<sub>3</sub> 之模擬的質量及能量

過程物流名稱→	1	2	3	底部殘留物	CaCl <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	FG-入	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O-MgOH
溫度, F	485.8	151.6	250	95	77	95	104	77	536
壓力, psia	15	15	15	15	15	15	15	15	15
蒸氣分率	0	0	0.025	0	0		1	0	0
莫耳流量, lbmol/h	1594.401	7655.248	7653.691	3568.272	139.697	139.502	611.154	2220.337	1594.401
質量流量, lb/h	53195.71	162514.8	162514.8	115530.1	15504	13962.37	19206	40000	53195.71
體積流量, gal/min	38.289	238.669	12389.12	114.43	14.159		30680.73	80.111	40.178
焓, MMBtu/h	-214.568	-918.028	-909.155	-574.405	-47.795		-27.903	-273.013	-205.695
H <sub>2</sub> O	1473.175	105624.1	105603	33281.39			750.535	40000	1473.172
H <sub>2</sub>									
Cl <sub>2</sub>									
HCl	痕量	痕量	0.001	痕量					痕量
CO <sub>2</sub>		<0.001	0.091	0.005			6158.236		
CO									
O <sub>2</sub>		0.055	0.055	0.055			2116.894		
N <sub>2</sub>		0.137	0.137	0.137			10180.34		
CaCl <sub>2</sub>					15504				
Ca(OH) <sub>2</sub>									
CaCO <sub>3</sub>									
Mg(OH) <sub>2</sub>									
Mg(OH)Cl									
MgCl <sub>2</sub>									
MgCO <sub>3</sub>									
Ca(O)Cl <sub>2</sub>									
CaCl <sub>2</sub> O <sub>2</sub>									
Ca <sup>2+</sup>		7.797	痕量	7.797					

過程物流名稱→	1	2	3	底部殘留物	CaCl <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	FG-入	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O-MgOH
Mg <sup>2+</sup>	11114.84	14507.52	14506.86	11942.37					11115.59
H <sup>+</sup>	<0.001	痕量	痕量	痕量				痕量	<0.001
CaOH <sup>+</sup>		<0.001	痕量	<0.001					
MgOH <sup>+</sup>	22.961	15.364	17.613	25.319					20.435
HClO									
MgCO <sub>3</sub> -3W									
MgCl <sub>2</sub> (固體)									
MgCl <sub>2</sub> -6W				21433.25					
MgCl <sub>2</sub> -4W									
CaCl <sub>2</sub> (固體)									
CaCO <sub>3</sub> (固體)				13962.37		13962.37			
MgCO <sub>3</sub> (固體)		0.174							
CaCl <sub>2</sub> -6W			42.623						
CaCl <sub>2</sub> -4W									
CaCl <sub>2</sub> -2W									
MgCl <sub>2</sub> -2W									
MgCl <sub>2</sub> -W									
Ca(OH) <sub>2</sub> (固體)									
Mg(OH) <sub>2</sub> (固體)	8137.518	7.043	5.576	0.08					8139.306
ClO <sup>-</sup>									
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		0.001	<0.001	0.119					
Cl <sup>-</sup>	32447.21	42352.6	42338.81	34877.24					32447.21
OH <sup>-</sup>	<0.001	0.001	0.001	<0.001				<0.001	<0.001
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>		痕量	痕量	0.001					
H <sub>2</sub> O	0.028	0.65	0.65	0.288			0.039	1	0.028
H <sub>2</sub>									
Cl <sub>2</sub>									
HCl	痕量	痕量	3 PPB	痕量					痕量

過程物流名稱→	1	2	3	底部殘留物	CaCl <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	FG-入	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O-MgOH
CO <sub>2</sub>		痕量	563 PPB	40 PPB			0.321		
CO									
O <sub>2</sub>		336 PPB	336 PPB	473 PPB			0.11		
N <sub>2</sub>		844 PPB	844 PPB	1 PPM			0.53		
CaCl <sub>2</sub>					1				
Ca(OH) <sub>2</sub>									
CaCO <sub>3</sub>									
Mg(OH) <sub>2</sub>									
Mg(OH)Cl									
MgCl <sub>2</sub>									
MgCO <sub>3</sub>									
Ca(O)Cl <sub>2</sub>									
CaCl <sub>2</sub> O <sub>2</sub>									
Ca <sup>2+</sup>		48 PPM	痕量	67 PPM					
Mg <sup>2+</sup>	0.209	0.089	0.089	0.103					0.209
H <sup>+</sup>	1 PPB	痕量	痕量	痕量				痕量	5 PPB
CAOH <sup>+</sup>		1 PPB	痕量	1 PPB					
MgOH <sup>+</sup>	432 PPM	95 PPM	108 PPM	219 PPM					384 PPM
HClO									
MgCO <sub>3</sub> -3W									
MgCl <sub>2</sub> (固體)									
MgCl <sub>2</sub> -6W				0.186					
MgCl <sub>2</sub> -4W									
CaCl <sub>2</sub> (固體)									
CaCO <sub>3</sub> (固體)				0.121					1
MgCO <sub>3</sub> (固體)		1 PPM							
CaCl <sub>2</sub> -6W			262 PPM						
CaCl <sub>2</sub> -4W									

過程物流名稱→	1	2	3	底部殘留物	CaCl <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	FG-入	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O-MgOH
CaCl <sub>2</sub> -2W									
MgCl <sub>2</sub> -2W									
MgCl <sub>2</sub> -W									
Ca(OH) <sub>2</sub> (固體)									
Mg(OH) <sub>2</sub> (固體)	0.153	43 PPM	34 PPM	691 PPB					0.153
ClO <sup>-</sup>									
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		5 PPB	痕量	1 PPM					
Cl <sup>-</sup>	0.61	0.261	0.261	0.302					0.61
OH <sup>-</sup>	痕量	6 PPB	6 PPB	痕量				2 PPB	痕量
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>		痕量	痕量	12 PPB					
H <sub>2</sub> O	81.774	5863.026	5861.857	1847.398			41.661	2220.337	81.773
H <sub>2</sub>									
Cl <sub>2</sub>									
HCl	痕量	痕量	<0.001	痕量					痕量
CO <sub>2</sub>		痕量	0.002	<0.001			139.929		
CO									
O <sub>2</sub>		0.002	0.002	0.002			66.155		
N <sub>2</sub>		0.005	0.005	0.005			363.408		
CaCl <sub>2</sub>					139.697				
Ca(OH) <sub>2</sub>									
CaCO <sub>3</sub>									
Mg(OH) <sub>2</sub>									
Mg(OH)Cl									
MgCl <sub>2</sub>									
MgCO <sub>3</sub>									
Ca(O)Cl <sub>2</sub>									
CaCl <sub>2</sub> O <sub>2</sub>									
Ca <sup>2+</sup>		0.195	痕量	0.195					
Mg <sup>2+</sup>	457.328	596.922	596.894	491.376					457.358

過程物流名稱→	1	2	3	底部殘留物	CaCl <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	FG-入	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O-MgOH
H <sup>+</sup>	<0.001	痕量	痕量	痕量				痕量	<0.001
CAOH <sup>+</sup>		痕量	痕量	痕量					
MgOH <sup>+</sup>	0.556	0.372	0.426	0.613					0.495
HClO									
MgCO <sub>3</sub> -3W									
MgCl <sub>2</sub> (固體)									
MgCl <sub>2</sub> -6W				105.426					
MgCl <sub>2</sub> -4W									
CaCl <sub>2</sub> (固體)									
CaCO <sub>3</sub> (固體)				139.502		139.502			
MgCO <sub>3</sub> (固體)		0.002							
CaCl <sub>2</sub> -6W			0.195						
CaCl <sub>2</sub> -4W									
CaCl <sub>2</sub> -2W									
MgCl <sub>2</sub> -2W									
MgCl <sub>2</sub> -W									
Ca(OH) <sub>2</sub> (固體)									
Mg(OH) <sub>2</sub> (固體)	139.533	0.121	0.096	0.001					139.564
ClO <sup>-</sup>									
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		<0.001	痕量	0.002					
Cl <sup>-</sup>	915.211	1194.604	1194.215	983.753					915.211
OH <sup>-</sup>	痕量	<0.001	<0.001	痕量				痕量	痕量
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>		痕量	痕量	<0.001					
H <sub>2</sub> O	0.051	0.766	0.766	0.518			0.068	1	0.051
H <sub>2</sub>									
Cl <sub>2</sub>									
HCl	痕量	痕量	2 PPB	痕量					痕量
CO <sub>2</sub>		痕量	271 PPB	29 PPB			0.229		

過程物流名稱→	1	2	3	底部殘留物	CaCl <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	FG-入	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O-MgOH
CO									
O <sub>2</sub>		223 PPB	223 PPB	478 PPB			0.108		
N <sub>2</sub>		640 PPB	640 PPB	1 PPM			0.595		
CaCl <sub>2</sub>					1				
Ca(OH) <sub>2</sub>									
CaCO <sub>3</sub>									
Mg(OH) <sub>2</sub>									
Mg(OH)Cl									
MgCl <sub>2</sub>									
MgCO <sub>3</sub>									
Ca(O)Cl <sub>2</sub>									
CaCl <sub>2</sub> O <sub>2</sub>									
Ca <sup>2+</sup>		25 PPM	痕量	55 PPM					
Mg <sup>2+</sup>	0.287	0.078	0.078	0.138					0.287
H <sup>+</sup>	49 PPB	痕量	痕量	痕量				2 PPB	156 PPB
CaOH <sup>+</sup>		痕量	痕量	痕量					
MgOH <sup>+</sup>	349 PPM	49 PPM	56 PPM	172 PPM					310 PPM
HClO									
MgCO <sub>3</sub> -3W									
MgCl <sub>2</sub> (固體)									
MgCl <sub>2</sub> -6W				0.03					
MgCl <sub>2</sub> -4W									
CaCl <sub>2</sub> (固體)									
CaCO <sub>3</sub> (固體)				0.039		1			
MgCO <sub>3</sub> (固體)		269 PPB							
CaCl <sub>2</sub> -6W			25 PPM						
CaCl <sub>2</sub> -4W									
CaCl <sub>2</sub> -2W									
MgCl <sub>2</sub> -2W									

過程物流名稱→	1	2	3	底部殘留物	CaCl <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	FG-入	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O-MgOH
MgCl <sub>2</sub> -W									
Ca(OH) <sub>2</sub> (固體)									
Mg(OH) <sub>2</sub> (固體)	0.088	16 PPM	12 PPM	383 PPB					0.088
ClO <sup>-</sup>									
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		2 PPB	痕量	547 PPB					
Cl <sup>-</sup>	0.574	0.156	0.156	0.276					0.574
OH <sup>-</sup>	1 PPB	8 PPB	7 PPB	痕量				2 PPB	1 PPB
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>		痕量	痕量	6 PPB					
PH	5.319	6.955	5.875	7.557				6.999	5.152

表 2b：說明使用 CaCl<sub>2</sub> 自廢氣中捕獲 CO<sub>2</sub> 以形成 CaCO<sub>3</sub> 之模擬的質量及能量

過程物流名稱→	H <sub>2</sub> O-入	HCl-H <sub>2</sub> O	Mg-CaCl <sub>2</sub>	MgOH-OI	返回	RX3-出
溫度, F	77	536	250	286.8	95	95
壓力, psia	15	15	15	15	15	15
蒸氣分率	0	1	0.025	0.021	0	1
莫耳流量, lbmol/h	3383.073	5781.846	7655.866	3814.738	3427.371	433.305
質量流量, lb/h	60947	109319.3	162515	93195.71	101567.8	12375.59
體積流量, gal/min	122.063	512251.6	12240.14	5364.891	104.123	21428.56
焓, MMBtu/h	-415.984	-561.862	-909.177	-487.581	-502.044	-0.364
H <sub>2</sub> O	60947	99124.11	105634.7	41473.17	33262.52	59.861
H <sub>2</sub>						
Cl <sub>2</sub>						
HCl		10195.18	0.087	0.009	痕量	痕量
CO <sub>2</sub>					痕量	18.689
CO						
O <sub>2</sub>					0.055	2116.839

過程物流名稱→	H <sub>2</sub> O-入	HCl-H <sub>2</sub> O	Mg-CaCl <sub>2</sub>	MgOH-OI	返回	RX3-出
N <sub>2</sub>					0.137	10180.2
CaCl <sub>2</sub>						
Ca(OH) <sub>2</sub>						
CaCO <sub>3</sub>						
Mg(OH) <sub>2</sub>						
Mg(OH)Cl						
MgCl <sub>2</sub>						
MgCO <sub>3</sub>						
Ca(O)Cl <sub>2</sub>						
CaCl <sub>2</sub> O <sub>2</sub>						
Ca <sup>2+</sup>					7.797	
Mg <sup>2+</sup>			14519.48	11116.3	11938.09	
H <sup>+</sup>	痕量		<0.001	痕量	痕量	
CaOH <sup>+</sup>					<0.001	
MgOH <sup>+</sup>			0.112	17.999	25.309	
HClO						
MgCO <sub>3</sub> -3W						
MgCl <sub>2</sub> (固體)						
MgCl <sub>2</sub> -6W					21468.81	
MgCl <sub>2</sub> -4W						
CaCl <sub>2</sub> (固體)						
CaCO <sub>3</sub> (固體)						
MgCO <sub>3</sub> (固體)					0.175	
CaCl <sub>2</sub> -6W						
CaCl <sub>2</sub> -4W						
CaCl <sub>2</sub> -2W						
MgCl <sub>2</sub> -2W						
MgCl <sub>2</sub> -W						
Ca(OH) <sub>2</sub> (固體)						

過程物流名稱→	H <sub>2</sub> O-入	HCl-H <sub>2</sub> O	Mg-CaCl <sub>2</sub>	MgOH-OI	返回	RX3-出
Mg(OH) <sub>2</sub> (固體)				8141.025	0.024	
ClO <sup>-</sup>						
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>					痕量	
Cl <sup>-</sup>			42360.62	32447.2	34864.84	
OH <sup>-</sup>	< 0.001		痕量	< 0.001	< 0.001	
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>					痕量	
質量分率						
H <sub>2</sub> O	1	0.907	0.65	0.445	0.327	0.005
H <sub>2</sub>						
Cl <sub>2</sub>						
HCl		0.093	534 PPB	92 PPB	痕量	痕量
CO <sub>2</sub>					痕量	0.002
CO						
O <sub>2</sub>					538 PPB	0.171
N <sub>2</sub>					1 PPM	0.823
CaCl <sub>2</sub>						
Ca(OH) <sub>2</sub>						
CaCO <sub>3</sub>						
Mg(OH) <sub>2</sub>						
Mg(OH)Cl						
MgCl <sub>2</sub>						
MgCO <sub>3</sub>						
Ca(O)Cl <sub>2</sub>						
CaCl <sub>2</sub> O <sub>2</sub>						
Ca <sup>2+</sup>					77 PPM	
Mg <sup>2+</sup>			0.089	0.119	0.118	
H <sup>+</sup>	痕量		2 PPB	痕量	痕量	
CaOH <sup>+</sup>					1 PPB	
MgOH <sup>+</sup>			689 PPB	193 PPM	249 PPM	

過程物流名稱→	H <sub>2</sub> O-入	HCl-H <sub>2</sub> O	Mg-CaCl <sub>2</sub>	MgOH-OI	返回	RX3-出
HClO						
MgCO <sub>3</sub> -3W						
MgCl <sub>2</sub> (固體)						
MgCl <sub>2</sub> -6W					0.211	
MgCl <sub>2</sub> -4W						
CaCl <sub>2</sub> (固體)						
CaCO <sub>3</sub> (固體)						
MgCO <sub>3</sub> (固體)					2 PPM	
CaCl <sub>2</sub> -6W						
CaCl <sub>2</sub> -4W						
CaCl <sub>2</sub> -2W						
MgCl <sub>2</sub> -2W						
MgCl <sub>2</sub> -W						
Ca(OH) <sub>2</sub> (固體)						
Mg(OH) <sub>2</sub> (固體)				0.087	240 PPB	
ClO <sup>-</sup>						
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>					痕量	
Cl <sup>-</sup>			0.261	0.348	0.343	
OH <sup>-</sup>	2 PPB		痕量	2 PPB	痕量	
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>					痕量	
H <sub>2</sub> O	3383.073	5502.224	5863.617	2302.111	1846.35	3.323
H <sub>2</sub>						
Cl <sub>2</sub>						
HCl		279.622	0.002	< 0.001	痕量	痕量
CO <sub>2</sub>					痕量	0.425
CO						
O <sub>2</sub>					0.002	66.154
N <sub>2</sub>					0.005	363.404

過程物流名稱→	H <sub>2</sub> O-入	HCl-H <sub>2</sub> O	Mg-CaCl <sub>2</sub>	MgOH-OI	返回	RX3-出
CaCl <sub>2</sub>						
Ca(OH) <sub>2</sub>						
CaCO <sub>3</sub>						
Mg(OH) <sub>2</sub>						
Mg(OH)Cl						
MgCl <sub>2</sub>						
MgCO <sub>3</sub>						
Ca(O)Cl <sub>2</sub>						
CaCl <sub>2</sub> O <sub>2</sub>						
Ca <sup>2+</sup>					0.195	
Mg <sup>2+</sup>			597.414	457.388	491.201	
H <sup>+</sup>	痕量		<0.001	痕量	痕量	
CaOH <sup>+</sup>					痕量	
MgOH <sup>+</sup>			0.003	0.436	0.613	
HClO						
MgCO <sub>3</sub> -3W						
MgCl <sub>2</sub> (固體)						
MgCl <sub>2</sub> -6W					105.601	
MgCl <sub>2</sub> -4W						
CaCl <sub>2</sub> (固體)						
CaCO <sub>3</sub> (固體)						
MgCO <sub>3</sub> (固體)					0.002	
CaCl <sub>2</sub> -6W						
CaCl <sub>2</sub> -4W						
CaCl <sub>2</sub> -2W						
MgCl <sub>2</sub> -2W						
MgCl <sub>2</sub> -W						
Ca(OH) <sub>2</sub> (固體)						
Mg(OH) <sub>2</sub> (固體)				139.593	<0.001	

過程物流名稱→	H <sub>2</sub> O-入	HCl-H <sub>2</sub> O	Mg-CaCl <sub>2</sub>	MgOH-O1	返回	RX3-出
ClO <sup>-</sup>						
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>					痕量	
Cl <sup>-</sup>			1194.83	915.211	983.403	
OH <sup>-</sup>	痕量		痕量	痕量	痕量	
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>					痕量	
H <sub>2</sub> O	1	0.952	0.766	0.603	0.539	0.008
H <sub>2</sub>						
Cl <sub>2</sub>						
HCl		0.048	311 PPB	62 PPB	痕量	痕量
CO <sub>2</sub>					痕量	980 PPM
CO						
O <sub>2</sub>					498 PPB	0.153
N <sub>2</sub>					1 PPM	0.839
CaCl <sub>2</sub>						
Ca(OH) <sub>2</sub>						
CaCO <sub>3</sub>						
Mg(OH) <sub>2</sub>						
Mg(OH)Cl						
MgCl <sub>2</sub>						
MgCO <sub>3</sub>						
Ca(O)Cl <sub>2</sub>						
CaCl <sub>2</sub> O <sub>2</sub>						
Ca <sup>2+</sup>					57 PPM	
Mg <sup>2+</sup>			0.078	0.12	0.143	
H <sup>+</sup>	2 PPB		43 PPB	痕量	痕量	
CaOH <sup>+</sup>					痕量	
MgOH <sup>+</sup>			354 PPB	114 PPM	179 PPM	
HClO						
MgCO <sub>3</sub> -3W						

過程物流名稱→	H <sub>2</sub> O-入	HCl-H <sub>2</sub> O	Mg-CaCl <sub>2</sub>	MgOH-OI	返回	RX3-出
MgCl <sub>2</sub> (固體)						
MgCl <sub>2</sub> -6W					0.031	
MgCl <sub>2</sub> -4W						
CaCl <sub>2</sub> (固體)						
CaCO <sub>3</sub> (固體)						
MgCO <sub>3</sub> (固體)					607 PPB	
CaCl <sub>2</sub> -6W						
CaCl <sub>2</sub> -4W						
CaCl <sub>2</sub> -2W						
MgCl <sub>2</sub> -2W						
MgCl <sub>2</sub> -W						
Ca(OH) <sub>2</sub> (固體)						
Mg(OH) <sub>2</sub> (固體)				0.037	122 PPB	
ClO <sup>-</sup>						
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>					痕量	
Cl <sup>-</sup>			0.156	0.24	0.287	
OH <sup>-</sup>	2 PPB		痕量	2 PPB	痕量	
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>					痕量	
PH	6.999		3.678	5.438	7.557	

實例2(事例1)-使用CaCl<sub>2</sub>自廢氣中以鎂離子催化捕獲  
CO<sub>2</sub>以形成CaCO<sub>3</sub>之過程模擬

模擬之結果表明在3個各自在其自身腔室中進行之各別脫水反應中加熱MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O流，隨後亦在其自身腔室中進行分解反應以形成Mg(OH)Cl及HCl(亦即總計4個腔室)為高效的。Mg(OH)Cl與H<sub>2</sub>O反應以形成MgCl<sub>2</sub>及Mg(OH)<sub>2</sub>，其接著與飽和CaCl<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O溶液及來自廢氣之CO<sub>2</sub>反應以形成CaCO<sub>3</sub>，將CaCO<sub>3</sub>自物流中濾出。由此形成之MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O連同較早產物一起再循環至第一反應器中以再次開始過程。

此過程不限於CaCl<sub>2</sub>之任何特定來源。舉例而言，其可由矽酸鈣與HCl反應以產生CaCl<sub>2</sub>而獲得。

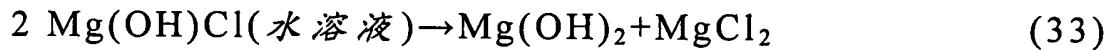
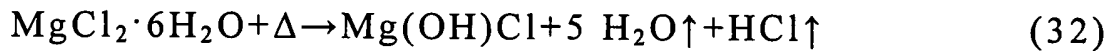
特定針對此模擬之約束及參數包括：

- 反應在無損耗之情況下以100%效率進行。當試操作確定反應效率時，可修改模擬。
- 模擬不考慮CaCl<sub>2</sub>饋入原料中或因系統損耗而需要之任何補給MgCl<sub>2</sub>中之雜質。
- 規定參數之一部分包括圖6中所示之方法流程圖。

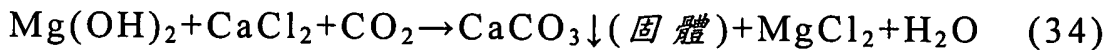
此模擬之結果指示初步淨能量消耗量為5946千瓦時/公噸CO<sub>2</sub>。表3提供說明模擬過程之各種物流之質量及能量。各物流對應於圖6之物流。

該過程由2個主要反應器及1個固體過濾區段組成。第一反應器加熱MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O，使其分解成HCl/H<sub>2</sub>O蒸氣流及Mg(OH)Cl固體流。HCl/H<sub>2</sub>O蒸氣流傳送至熱交換器中以回

收額外熱。自  $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$  形成之  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  傳送至反應器 2 中以供進一步處理。此反應器中發生之化學反應包括以下：



將  $\text{CaCl}_2$  溶液及廢氣流添加至反應器 2 中之  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  中。此反應形成  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{MgCl}_2$  及水。 $\text{CaCO}_3$  沈澱且在過濾器或傾析器中移除。剩餘  $\text{MgCl}_2$  及水再循環至第一反應器中。添加額外之水以達成第一反應器所需之水平衡。此反應器中發生之化學反應包括以下：



此過程之主要饋料為  $\text{CaCl}_2$ 、廢氣 ( $\text{CO}_2$ ) 及水。系統中之  $\text{MgCl}_2$  經使用、再形成及再循環。唯一所需之  $\text{MgCl}_2$  補給欲補充與  $\text{CaCO}_3$  產物一起離開系統之少量  $\text{MgCl}_2$  及與  $\text{HCl}$ /水產物一起離開之少量  $\text{MgCl}_2$ 。

此過程使用淨能量。能量之量處於研究及最佳化中。存在用以回收高溫物流中之熱以預熱饋料流之交叉熱交換。

以下概述此過程(事例1)之步驟：

事例1			
<b>3步脫水，接著分解</b>			
在3個各別腔室中使六水合物脫水。步驟1為六水合物脫水成四水合物，步驟2為四水合物脫水成二水合物，步驟3為二水合物脫水成單水合物。在第四腔室中使單水合物分解成80% $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$ 、20% $\text{MgCl}_2$ 。			
吸收之 $\text{CO}_2$	53333	MTPY	
$\text{CaCl}_2$	134574	MTPY	
無水 $\text{HCl}$	88368	MTPY	
$\text{CaCO}_3$	105989	MTPY	
再循環之六水合物	597447	MTPY	
六水合物脫水成四水合物(100°C)	1757	千瓦時/公噸 $\text{CO}_2$	
四水合物脫水成二水合物(125°C)	2135	千瓦時/公噸 $\text{CO}_2$	
二水合物脫水成單水合物(160°C及 $\text{HCl}$ PP)	1150	千瓦時/公噸 $\text{CO}_2$	

分解(130°C)	1051	千瓦時/公噸CO <sub>2</sub>
獲得80% Mg(OH)Cl、20% MgCl <sub>2</sub>		
產生90% HCl蒸氣		
	0.9	MW
自28% HCl蒸氣之熱回收	148	千瓦時/公噸CO <sub>2</sub>
總計	5946	千瓦時/公噸CO <sub>2</sub>

表 3a：說明事例 1 模擬之質量及能量

過程物流名稱→	CaCl <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	廢氣	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O-1	H <sub>2</sub> O-2	HCl-PP	HCl蒸氣
溫度，C	25	95	104	25	100	125	160	130
壓力，psia	14.7	14.7	15.78	14.7	16.166	16.166	16.166	14.696
蒸氣質量分率	0	0	1	0	1	1	1	1
固體質量分率	1	1	0	0	0	0	0	0
質量流量，公噸/年	134573.943	121369.558	166332.6	290318.99	105883.496	105890.399	17179.526	97647.172
體積流量，gal/min	30.929	22.514	76673.298	8099.644	82228.086	87740.919	10242.935	48861.42
焓，MW	-30.599	-46.174	-17.479	-146.075	-44.628	-44.47	-3.258	-10.757
密度，lb/cuft	136.522	169.146	0.068	1.125	0.04	0.038	0.053	0.063
H <sub>2</sub> O	0	0	6499.971	290318.99	105883.496	105885.779	5681.299	9278.695
H <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
HCl	0	0	0	0	0	4.62	11498.227	88368.477
CO <sub>2</sub>	0	0	53333.098	0	0	0	0	0
CO	0	0	0	0	0	0	0	0
O <sub>2</sub>	0	0	18333.252	0	0	0	0	0
N <sub>2</sub>	0	0	88166.278	0	0	0	0	0
CaCl <sub>2</sub>	134573.943	80.499	0	0	0	0	0	0
Ca(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0

過程物流名稱→	CaCl <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	廢氣	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O-1	H <sub>2</sub> O-2	HCl-PP	HCl蒸氣
CaCO <sub>3</sub>	0	121289.059	0	0	0	0	0	0
MgCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca(O)Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH)Cl	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0	0
MgHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0
H <sub>2</sub> O	0	0	0.039	1	1	1	0.331	0.095
H <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
HCl	0	0	0	0	0	0	0.669	0.905
CO <sub>2</sub>	0	0	0.321	0	0	0	0	0
CO	0	0	0	0	0	0	0	0
O <sub>2</sub>	0	0	0.11	0	0	0	0	0
N <sub>2</sub>	0	0	0.53	0	0	0	0	0

過程物流名稱→	CaCl <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	廢氣	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O-1	H <sub>2</sub> O-2	HCl-PP	HCl蒸氣
CaCl <sub>2</sub>	1	0.001	0	0	0	0	0	0
Ca(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
CaCO <sub>3</sub>	0	0.999	0	0	0	0	0	0
MgCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca(O)Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH)Cl	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0	0
MgHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0
H <sub>2</sub> O	0	0	11.441	511.008	186.372	186.376	10	16.332
H <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
HCl	0	0	0	0	0	0.004	10	76.854
CO <sub>2</sub>	0	0	38.427	0	0	0	0	0
CO	0	0	0	0	0	0	0	0

過程物流名稱→	CaCl <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	廢氣	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O-1	H <sub>2</sub> O-2	HCl-PP	HCl蒸氣
O <sub>2</sub>	0	0	18.168	0	0	0	0	0
N <sub>2</sub>	0	0	99.8	0	0	0	0	0
CaCl <sub>2</sub>	38.45	0.023	0	0	0	0	0	0
Ca(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
CaCO <sub>3</sub>	0	38.427	0	0	0	0	0	0
MgCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca(O)Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH)Cl	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0	0
MgHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0

表 3b：說明事例 1 模擬之質量及能量

過程物流名稱→	MgCl <sub>2</sub> -2W	MgCl <sub>2</sub> -4W	MgCl <sub>2</sub> -6W	再循環1	RX2-出	漿料	固體-1	固體-2	蒸氣
溫度， °C	125	100	104	95	95	95	160	130	160
壓力， psia	16.166	16.166	14.696	14.7	14.7	14.7	22.044	14.696	22.044
蒸氣質量分率	0	0	0	0	1	0	0	0	1
固體質量分率	1	1	1	0.998	0	0.999	1	1	0
質量流量，公噸/年	385672.688	491563.087	597446.583	598447.468	106499.178	719817.026	332737.843	235090.671	70114.371
體積流量， gal/min	39.902	39.902	116.892	147.062	56469.408	167.321	39.902	43.473	42506.729
焓， MW	-117.767	-175.272	-230.554	-231.312	0.241	-277.487	-88.626	-71.431	-25.379
密度， lb/cuft	303.274	386.542	160.371	127.684	0.059	134.984	261.649	169.678	0.052
H <sub>2</sub> O	0	0	0	1000	0	1000	0	0	58620.764
H <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCl	0	0	0	0	0	0	0	0	11493.607
CO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0.532	0	0	0	0
CO	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O <sub>2</sub>	0	0	0	0.165	18333.088	0.165	0	0	0
N <sub>2</sub>	0	0	0	0.72	88165.558	0.72	0	0	0
CaCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	80.499	0	0	0
Ca(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0

過程物流名稱→	MgCl <sub>2</sub> -2W	MgCl <sub>2</sub> -4W	MgCl <sub>2</sub> -6W	再循環1	RX2-出	藥料	固體-1	固體-2	蒸氣
CaCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	121289.059	0	0	0
MgCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca(O)Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	49037.72	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	332737.843	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	385662.96	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	491563.087	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	0	597446.583	597446.583	0	597446.583	0	0	0
Mg(OH)Cl	9.728	0	0	0	0	0	0	186052.951	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H <sub>2</sub> O	0	0	0	0.002	0	0.001	0	0	0.836
H <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCl	0	0	0	0	0	0	0	0	0.164
CO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O <sub>2</sub>	0	0	0	0	0.172	0	0	0	0
N <sub>2</sub>	0	0	0	0	0.828	0	0	0	0

過程物流名稱→	MgCl <sub>2</sub> -2W	MgCl <sub>2</sub> -4W	MgCl <sub>2</sub> -6W	再循環1	RX2-出	漿料	固體-1	固體-2	蒸氣
CaCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CaCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0.168	0	0	0
MgCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca(O)Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0.209	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	1	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	1	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	1	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	0	1	0.998	0	0.83	0	0	0
Mg(OH)Cl	0	0	0	0	0	0	0	0.791	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H <sub>2</sub> O	0	0	0	1.76	0	1.76	0	0	103.182
H <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCl	0	0	0	0	0	0	0	0	9.996
CO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	0	0	0	0	0	0	0	0	0

過程物流名稱→	MgCl <sub>2</sub> -2W	MgCl <sub>2</sub> -4W	MgCl <sub>2</sub> -6W	再循環1	RX2-出	漿料	固體-1	固體-2	蒸氣
O <sub>2</sub>	0	0	0	0	18.168	0	0	0	0
N <sub>2</sub>	0	0	0	0.001	99.799	0.001	0	0	0
CaCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0.023	0	0	0
Ca(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CaCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	38.427	0	0	0
MgCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca(O)Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	16.332	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	93.186	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	93.182	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	93.186	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	0	93.186	93.186	0	93.186	0	0	0
Mg(OH)Cl	0.004	0	0	0	0	0	0	76.854	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0

### 實例3-使用 $\text{CaCl}_2$ 自廢氣中以鎂離子催化捕獲 $\text{CO}_2$ 以形成 $\text{CaCO}_3$ 之過程模擬

規定參數之一部分包括圖7中所示之方法流程圖。模擬之結果表明在2個各自在其自身腔室中進行之各別脫水反應中加熱  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  流以形成  $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$ ，隨後亦在其自身腔室中進行分解反應以形成  $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$  及  $\text{HCl}$  (亦即總計3個腔室) 為高效的。 $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$  與  $\text{H}_2\text{O}$  反應以形成  $\text{MgCl}_2$  及  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ，其接著與飽和  $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$  溶液及來自廢氣之  $\text{CO}_2$  反應以形成  $\text{CaCO}_3$ ，將  $\text{CaCO}_3$  自物流中濾出。由此形成之  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  再循環至第一反應器中以再次開始過程。此過程不限於  $\text{CaCl}_2$  之任何特定來源。舉例而言，其可由矽酸鈣與  $\text{HCl}$  反應以產生  $\text{CaCl}_2$  而獲得。

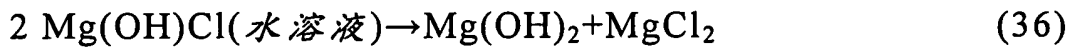
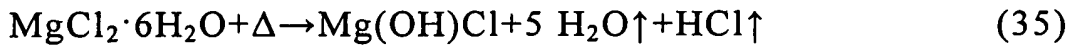
特定針對此模擬之約束及參數包括：

- 反應在無損耗之情況下以100%效率進行。當試操作確定反應效率時，可修改模擬。
- 模擬不考慮  $\text{CaCl}_2$  饋入原料中或因系統損耗而需要之任何補給  $\text{MgCl}_2$  中之雜質。

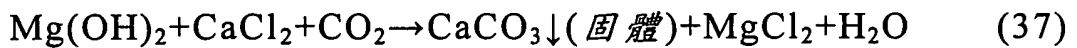
此模擬之結果指示初步淨能量消耗量為4862千瓦時/公噸  $\text{CO}_2$ 。表4提供說明模擬過程之各種物流之質量及能量。各物流對應於圖7中之物流。

該過程由2個主要反應器及1個固體過濾區段組成。第一反應器加熱  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ，使其分解成  $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}$  蒸氣流及  $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$  固體流。 $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}$  蒸氣流傳送至熱交換器中以回收額外熱。自  $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$  形成之  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  傳送至反應器2中

以供進一步處理。此反應器中發生之化學反應包括以下：



將  $\text{CaCl}_2$  溶液及廢氣流添加至反應器 2 中之  $\text{Mg(OH)}_2$  中。此反應形成  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{MgCl}_2$  及水。 $\text{CaCO}_3$  沈澱且在過濾器或傾析器中移除。剩餘  $\text{MgCl}_2$  及水再循環至第一反應器中。添加額外之水以達成第一反應器所需之水平衡。此反應器中發生之化學反應包括以下：



此過程之主要饋料為  $\text{CaCl}_2$ 、廢氣 ( $\text{CO}_2$ ) 及水。系統中之  $\text{MgCl}_2$  經使用、再形成及再循環。唯一所需之  $\text{MgCl}_2$  補給欲補充與  $\text{CaCO}_3$  產物一起離開系統之少量  $\text{MgCl}_2$  及與  $\text{HCl}$ /水產物一起離開之少量  $\text{MgCl}_2$ 。

此過程使用淨能量。能量之量處於研究及最佳化中。存在用以回收高溫物流中之熱以預熱饋料流之交叉熱交換。

以下概述此過程(事例2)之步驟：

#### 事例2

##### 2步脫水，接著分解

在2個各別腔室中使六水合物脫水。步驟1為六水合物脫水成四水合物，步驟2為四水合物脫水成二水合物。二水合物分解成100%  $\text{Mg(OH)Cl}$ 。

吸收之 $\text{CO}_2$	53333	MTPY
$\text{CaCl}_2$	134574	MTPY
無水 $\text{HCl}$	88368	MTPY
$\text{CaCO}_3$	105989	MTPY
再循環之六水合物	492737	MTPY
六水合物脫水成四水合物(100°C)	1445 千瓦時/公噸 $\text{CO}_2$	
四水合物脫水成二水合物(125°C)	1774 千瓦時/公噸 $\text{CO}_2$	

二水合物	
脫水及分解	1790 千瓦時/公噸CO <sub>2</sub>
獲得100% Mg(OH)Cl(130°C)	
產生66% HCl蒸氣	
無載劑MgCl <sub>2</sub> =較佳總效率	
不使用HCl PP	
	0.9
自28% HCl蒸氣之熱回收	148 千瓦時/公噸CO <sub>2</sub>
總計	4862 千瓦時/公噸CO <sub>2</sub>

表 4a：說明事例 2 模擬之質量及能量

過程物流名稱→	5	7	8	CaCl <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	廢氣	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O-1	H <sub>2</sub> O-2	HCl 蒸氣
溫度, °C	98	114.1	101	25	95	40	25	100	125	130
壓力, psia	14.696	14.696	14.696	14.7	14.7	15.78	14.7	14.696	22.044	14.696
蒸氣質量分率	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1
固體質量分率	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0
質量流量, 公噸/年	492736.693	405410.587	306683.742	134573.943	121369.558	166332.6	234646.82	87326.106	87329.947	132027.689
體積流量, gal/min	96.405	32.909	224394.519	30.929	22.514	63660.018	6546.44	74598.258	53065.241	80593.954
焓, MW	-190.292	-144.291	-98.931	-30.599	-46.174	-17.821	-118.063	-36.806	-36.675	-25.187
密度, lb/cuft	160.371	386.542	0.043	136.522	169.146	0.082	1.125	0.037	0.052	0.051
H <sub>2</sub> O	0	0	218315.265	0	0	6499.971	234646.82	87326.106	87326.106	43663.053
H <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCl	0	0	88368.477	0	0	53333.098	0	0	3.841	88364.636
CO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	18333.252	0	0	0	0
N <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	88166.278	0	0	0	0
CaCl <sub>2</sub>	0	0	0	134573.943	80.499	0	0	0	0	0
Ca(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CaCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	121289.059	0	0	0	0	0
MgCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca(O)Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	405410.587	0	0	0	0	0	0	0	0

過程物流名稱→	5	7	8	CaCl <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	廢氣	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O-1	H <sub>2</sub> O-2	HCl蒸氣
MgCl <sub>2</sub> *6W	492736.693	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH)Cl	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H <sub>2</sub> O	0	0	0.712	0	0	0.039	1	1	1	0.331
H <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCl	0	0	0.288	0	0	0	0	0	0	0.669
CO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0.321	0	0	0	0
CO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0.11	0	0	0	0
N <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0.53	0	0	0	0
CaCl <sub>2</sub>	0	0	0	1	0.001	0	0	0	0	0
Ca(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CaCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0.999	0	0	0	0	0
MgCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca(O)Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH)Cl	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H <sub>2</sub> O	0	0	384.27	0	0	11.441	413.016	153.708	153.708	76.854
H <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

過程物流名稱→	5	7	8	CaCl <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	廢氣	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O-1	H <sub>2</sub> O-2	HCl蒸氣
Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCl	0	0	76.854	0	0	0	0	0	0.003	76.851
CO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	38.427	0	0	0	0
CO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	18.168	0	0	0	0
N <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	99.8	0	0	0	0
CaCl <sub>2</sub>	0	0	0	38.45	0.023	0	0	0	0	0
Ca(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CaCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	38.427	0	0	0	0	0
MgCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca(O)Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	76.854	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	76.854	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH)Cl	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 4b：說明事例 2 模擬之質量及能量

過程物流名稱→	液體	MgCl <sub>2</sub> -4W	MgCl <sub>2</sub> -6W	再循環1	RX2-出	藥料	固體-1	固體-2	蒸氣
溫度，°C	94.9	100	75	95	95	95	125	130	118.1
壓力，psia	14.696	14.696	14.696	14.7	14.7	14.7	22.044	14.696	14.696
蒸氣質量分率	0.979	0	0	0	1	0	0	0	1
固體質量分率	0	1	1	0.998	0	0.998	1	1	0
質量流量，公噸/年	306683.742	405410.587	492736.693	493737.578	106499.178	615107.136	318080.64	186052.951	306683.742
體積流量，gal/min	215496.035	32.909	96.405	126.575	56469.408	146.834	32.909	32.909	234621.606
焓，MW	-99.487	-144.553	-190.849	-190.859	0.241	-237.034	-97.128	-61.083	-98.668
密度，lb/cuft	0.045	386.542	160.371	122.394	0.059	131.442	303.277	177.393	0.041
H <sub>2</sub> O	218315.265	0	0	1000	0	1000	0	0	218315.265
H <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCl	88368.477	0	0	0	0	0	0	0	88368.477
CO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0.532	0	0	0	0
CO	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O <sub>2</sub>	0	0	0	0.165	18333.088	0.165	0	0	0
N <sub>2</sub>	0	0	0	0.72	88165.558	0.72	0	0	0
CaCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	80.499	0	0	0
Ca(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0

過程物流名稱→	液體	MgCl <sub>2</sub> -4W	MgCl <sub>2</sub> -6W	再循環1	RX2-出	藥料	固體-1	固體-2	蒸氣
CaCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	121289.059	0	0	0
MgCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca(O)Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	0	318077.568	0	0
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	405410.587	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	0	492736.693	492736.693	0	492736.693	0	0	0
Mg(OH)Cl	0	0	0	0	0	0	0	186052.951	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	3.072	0	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
質量分率									
H <sub>2</sub> O	0.712	0	0	0.002	0	0.002	0	0	0.712
H <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCl	0.288	0	0	0	0	0	0	0	0.288
CO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O <sub>2</sub>	0	0	0	0	0.172	0	0	0	0

過程物流名稱→	液體	MgCl <sub>2</sub> -4W	MgCl <sub>2</sub> -6W	再循環1	RX2-出	漿料	固體-1	固體-2	蒸氣
N <sub>2</sub>	0	0	0	0	0.828	0	0	0	0
CaCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CaCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0.197	0	0	0
MgCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca(O)Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	0	1	0	0
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	1	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	0	1	0.998	0	0.801	0	0	0
Mg(OH)Cl	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H <sub>2</sub> O	384.27	0	0	1.76	0	1.76	0	0	384.27
H <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCl	76.854	0	0	0	0	0	0	0	76.854
CO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0

過程物流名稱→	液體	MgCl <sub>2</sub> -4W	MgCl <sub>2</sub> -6W	再循環1	RX2-出	漿料	固體-1	固體-2	蒸氣
CO	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O <sub>2</sub>	0	0	0	0	18.168	0	0	0	0
N <sub>2</sub>	0	0	0	0.001	99.799	0.001	0	0	0
CaCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0.023	0	0	0
Ca(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CaCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	38.427	0	0	0
MgCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca(O)Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	0	76.852	0	0
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	76.854	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	0	76.854	76.854	0	76.854	0	0	0
Mg(OH)Cl	0	0	0	0	0	0	0	76.854	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0.002	0	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0

實例 4-使用  $\text{CaCl}_2$  自廢氣中以鎂離子催化捕獲  $\text{CO}_2$  以形成  
 $\text{CaCO}_3$  之過程模擬

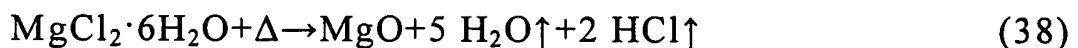
規定參數之一部分包括圖 8 中所示之方法流程圖。模擬之結果表明在單一腔室中加熱  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  流以形成  $\text{MgO}$  為高效的。 $\text{MgO}$  與  $\text{H}_2\text{O}$  反應以形成  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ，其接著與飽和  $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$  溶液及來自廢氣之  $\text{CO}_2$  反應以形成  $\text{CaCO}_3$ ，將  $\text{CaCO}_3$  自物流中濾出。由此形成之  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  再循環至第一反應器中以再次開始過程。此過程不限於  $\text{CaCl}_2$  之任何特定來源。舉例而言，其可由矽酸鈣與  $\text{HCl}$  反應以產生  $\text{CaCl}_2$  而獲得。

特定針對此模擬之約束及參數包括：

- 反應在無損耗之情況下以 100% 效率進行。當試操作確定反應效率時，可修改模擬。
- 模擬不考慮  $\text{CaCl}_2$  饋入原料中或因系統損耗而需要之任何補給  $\text{MgCl}_2$  中之雜質。

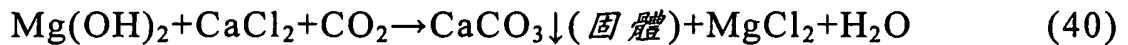
此模擬之結果指示初步淨能量消耗量為 3285 千瓦時/公噸  $\text{CO}_2$ 。表 5 提供說明模擬過程之各種物流之質量及能量。各物流對應於圖 8 之物流。

該過程由 2 個主要反應器及 1 個固體過濾區段組成。第一反應器加熱  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ，使其分解成  $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}$  蒸氣流及  $\text{MgO}$  固體流。 $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}$  蒸氣流傳送至熱交換器中以回收額外熱。自  $\text{MgO}$  形成之  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  傳送至反應器 2 中以供進一步處理。此反應器中發生之化學反應包括以下：





將  $\text{CaCl}_2$  溶液及廢氣流添加至反應器 2 中之  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  中。此反應形成  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{MgCl}_2$  及水。 $\text{CaCO}_3$  沈澱且在過濾器或傾析器中移除。剩餘  $\text{MgCl}_2$  及水再循環至第一反應器中。添加額外之水以達成第一反應器所需之水平衡。此反應器中發生之化學反應包括以下：



此過程之主要饋料為  $\text{CaCl}_2$ 、廢氣 ( $\text{CO}_2$ ) 及水。系統中之  $\text{MgCl}_2$  經使用、再形成及再循環。唯一所需之  $\text{MgCl}_2$  補給欲補充與  $\text{CaCO}_3$  產物一起離開系統之少量  $\text{MgCl}_2$  及與  $\text{HCl}$ /水產物一起離開之少量  $\text{MgCl}_2$ 。

此過程使用淨能量。能量之量處於研究及最佳化中。存在用以回收高溫物流中之熱以預熱饋料流之交叉熱交換。

以下概述此過程(事例3)之步驟：

### 事例3

#### 組合脫水/分解成 $\text{MgO}$

六水合物在  $450^\circ\text{C}$  下脫水且同時分解。反應器產生 100%  $\text{MgO}$ 。

吸收之 $\text{CO}_2$	53333	MTPY
$\text{CaCl}_2$	134574	MTPY
無水 $\text{HCl}$	88368	MTPY
$\text{CaCO}_3$	105989	MTPY
再循環之六水合物	246368	MTPY
六水合物		
脫水及分解	3778	千瓦時/公噸 $\text{CO}_2$

獲得 100%  $\text{MgO}$  ( $450^\circ\text{C}$ )

產生 44.7%  $\text{HCl}$  蒸氣

再循環多達一半六水合物

但需要高品質熱

201213002

自45% HCl蒸氣之熱回收	493 千瓦時/公噸CO <sub>2</sub>
總計	3285 千瓦時/公噸CO <sub>2</sub>

表 5a：說明事例 3 模擬之質量及能量

過程物流名稱→	CaCl <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	廢氣	H <sub>2</sub> O	HCl 蒸氣	MgCl <sub>2</sub>	MgCl <sub>2</sub> -6W
溫度，°C	25	95	104	25	120	353.8	104
壓力，psia	14.7	14.7	15.78	14.7	14.696	14.7	14.7
蒸氣質量分率	0	0	1	0	1	0	0
固體質量分率	1	1	0	0	0	1	1
質量流量，公噸/年	134573.943	121369.558	166332.6	125489.188	197526.11	246368.347	246368.347
體積流量，gal/min	30.929	22.514	76673.298	3501.038	137543.974	48.203	48.203
焓，MW	-30.599	-46.174	-17.479	-63.14	-52.762	-92.049	-95.073
密度，lb/cuft	136.522	169.146	0.068	1.125	0.045	160.371	160.371
H <sub>2</sub> O	0	0	6499.971	125489.188	109157.633	0	0
H <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0
Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0
HCl	0	0	0	0	88368.477	0	0
CO <sub>2</sub>	0	0	53333.098	0	0	0	0
CO	0	0	0	0	0	0	0
O <sub>2</sub>	0	0	18333.252	0	0	0	0
N <sub>2</sub>	0	0	88166.278	0	0	0	0
CaCl <sub>2</sub>	134573.943	80.499	0	0	0	0	0
Ca(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0

過程物流名稱→	CaCl <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	廢氣	H <sub>2</sub> O	HCl蒸氣	MgCl <sub>2</sub>	MgCl <sub>2</sub> -6W
CaCO <sub>3</sub>	0	121289.059	0	0	0	0	0
MgCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0
Ca(O)Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	0	0	0	0	246368.347	246368.347
Mg(OH)Cl	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0
H <sub>2</sub> O	0	0	0.039	1	0.553	0	0
H <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0
Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0
HCl	0	0	0	0	0.447	0	0
CO <sub>2</sub>	0	0	0.321	0	0	0	0
CO	0	0	0	0	0	0	0
O <sub>2</sub>	0	0	0.11	0	0	0	0
N <sub>2</sub>	0	0	0.53	0	0	0	0
CaCl <sub>2</sub>	1	0.001	0	0	0	0	0

過程物流名稱→	CaCl <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	廢氣	H <sub>2</sub> O	HCl蒸氣	MgCl <sub>2</sub>	MgCl <sub>2</sub> -6W
Ca(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0
CaCO <sub>3</sub>	0	0.999	0	0	0	0	0
MgCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0
Ca(O)Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	0	0	0	0	1	1
Mg(OH)Cl	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0
H <sub>2</sub> O	0	0	11.441	220.881	192.135	0	0
H <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0
Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0
HCl	0	0	0	0	76.854	0	0
CO <sub>2</sub>	0	0	38.427	0	0	0	0
CO	0	0	0	0	0	0	0
O <sub>2</sub>	0	0	18.168	0	0	0	0
N <sub>2</sub>	0	0	99.8	0	0	0	0

過程物流名稱→	CaCl <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	廢氣	H <sub>2</sub> O	HCl蒸氣	MgCl <sub>2</sub>	MgCl <sub>2</sub> -6W
CaCl <sub>2</sub>	38.45	0.023	0	0	0	0	0
Ca(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0
CaCO <sub>3</sub>	0	38.427	0	0	0	0	0
MgCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0
Ca(O)Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	0	0	0	0	38.427	38.427
Mg(OH)Cl	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0

表 5b：說明事例 3 模擬之質量及能量

過程物流名稱→	Mg(OH)Cl 1	Mg(OH)Cl 2	再循環 1	再循環 2	再循環 3	RX2-出	藥料	蒸氣	出
溫度，°C	450	100	95	140	140	95	95	450	140
壓力，psia	14.696	14.696	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.696	14.7
蒸氣質量分率	0	0	0	0.004	0	1	0	1	1
固體質量分率	1	1	0.996	0.996	1	0	0.997	0	0
質量流量，公噸/年	48842.237	48842.237	247369.231	247369.231	246368.347	106499.178	368738.79	197526.11	1000.885
體積流量，gal/min	6.851	6.851	78.372	994.232	48.203	56469.408	98.632	252994.849	946.03
焓，MW	-22.38	-23	-95.676	-95.057	-94.638	0.241	-141.851	-49.738	-0.419
密度，lb/cuft	223.695	223.695	99.036	7.807	160.371	0.059	117.304	0.024	0.033
H <sub>2</sub> O	0	0	1000	1000	0	0	1000	109157.633	1000
H <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCl	0	0	0	0	0	0	0	88368.477	0
CO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0.532	0	0	0
CO	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O <sub>2</sub>	0	0	0.165	0.165	0	18333.088	0.165	0	0.165
N <sub>2</sub>	0	0	0.72	0.72	0	88165.558	0.72	0	0.72
CaCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	80.499	0	0
Ca(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0

過程物流名稱→	Mg(OH)Cl1	Mg(OH)Cl2	再循環1	再循環2	再循環3	RX2-出	漿料	蒸氣	出
CaCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	121289.059	0	0
MgCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca(O)Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	0	246368.347	246368.347	246368.347	0	246368.347	0	0
Mg(OH)Cl	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO	48842.237	48842.237	0	0	0	0	0	0	0
H <sub>2</sub> O	0	0	0.004	0.004	0	0	0.003	0.553	0.999
H <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCl	0	0	0	0	0	0	0	0.447	0
CO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0.172	0	0	0
N <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0.828	0	0	0.001
CaCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0

過程物流名稱→	Mg(OH)Cl 1	Mg(OH)Cl 2	再循環1	再循環2	再循環3	RX2-出	漿料	蒸氣	出
Ca(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CaCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0.329	0	0
MgCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca(O)Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	0	0.996	0.996	1	0	0.668	0	0
Mg(OH)Cl	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO	1	1	0	0	0	0	0	0	0
H <sub>2</sub> O	0	0	1.76	1.76	0	0	1.76	192.135	1.76
H <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCl	0	0	0	0	0	0	0	76.854	0
CO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	18.168	0	0	0
N <sub>2</sub>	0	0	0.001	0.001	0	99.799	0.001	0	0.001

過程物流名稱→	Mg(OH)Cl1	Mg(OH)Cl2	再循環1	再循環2	再循環3	RX2-出	漿料	蒸氣	出
CaCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0.023	0	0
Ca(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CaCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	38.427	0	0
MgCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca(O)Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	0	38.427	38.427	38.427	0	38.427	0	0
Mg(OH)Cl	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO	38.427	38.427	0	0	0	0	0	0	0

實例5-使用CaCl<sub>2</sub>自廢氣中以鎂離子催化捕獲CO<sub>2</sub>以形成  
CaCO<sub>3</sub>之過程模擬

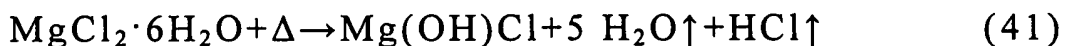
規定參數之一部分包括圖9中所示之方法流程圖。模擬之結果表明在單一腔室中加熱MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O流以形成Mg(OH)Cl為高效的。Mg(OH)Cl與H<sub>2</sub>O反應以形成MgCl<sub>2</sub>及Mg(OH)<sub>2</sub>，其接著與飽和CaCl<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O溶液及來自廢氣之CO<sub>2</sub>反應以形成CaCO<sub>3</sub>，將CaCO<sub>3</sub>自物流中濾出。由此形成之MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O再循環至第一反應器中以再次開始過程。此過程不限於CaCl<sub>2</sub>之任何特定來源。舉例而言，其可由矽酸鈣與HCl反應以產生CaCl<sub>2</sub>而獲得。

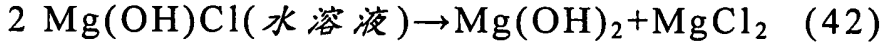
特定針對此模擬之約束及參數包括：

- 反應在無損耗之情況下以100%效率進行。嘗試操作確定反應效率時，可修改模擬。
- 模擬不考慮CaCl<sub>2</sub>饋入原料中或因系統損耗而需要之任何補給MgCl<sub>2</sub>中之雜質。

此模擬之結果指示初步淨能量消耗量為4681千瓦時/公噸CO<sub>2</sub>。表6提供說明模擬過程之各種物流之質量及能量。各物流對應於圖9之物流。

該過程由2個主要反應器及1個固體過濾區段組成。第一反應器加熱MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O，使其分解成HCl/H<sub>2</sub>O蒸氣流及Mg(OH)Cl固體流。HCl/H<sub>2</sub>O蒸氣流傳送至熱交換器中以回收額外熱。自Mg(OH)Cl形成之Mg(OH)<sub>2</sub>傳送至反應器2中以供進一步處理。此反應器中發生之化學反應包括以下：





將  $\text{CaCl}_2$  溶液及廢氣流添加至反應器 2 中之  $\text{Mg(OH)}_2$  中。此反應形成  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{MgCl}_2$  及水。 $\text{CaCO}_3$  沈澱且在過濾器或傾析器中移除。剩餘  $\text{MgCl}_2$  及水再循環至第一反應器中。添加額外之水以達成第一反應器所需之水平衡。此反應器中發生之化學反應包括以下：



此過程之主要饋料為  $\text{CaCl}_2$ 、廢氣 ( $\text{CO}_2$ ) 及水。系統中之  $\text{MgCl}_2$  經使用、再形成及再循環。唯一所需之  $\text{MgCl}_2$  補給欲補充與  $\text{CaCO}_3$  產物一起離開系統之少量  $\text{MgCl}_2$  及與  $\text{HCl}$ /水產物一起離開之少量  $\text{MgCl}_2$ 。

此過程使用淨能量。能量之量處於研究及最佳化中。存在用以回收高溫物流中之熱以預熱饋料流之交叉熱交換。

以下概述此過程(事例4)之步驟：

#### 事例4

##### 組合脫水/分解成 $\text{Mg(OH)Cl}$

六水合物在  $250^\circ\text{C}$  下脫水且同時分解。反應器產生 100%  $\text{Mg(OH)Cl}$ 。

吸收之 $\text{CO}_2$	53333	MTPY
$\text{CaCl}_2$	134574	MTPY
無水 $\text{HCl}$	88368	MTPY
$\text{CaCO}_3$	105989	MTPY
再循環之六水合物	492737	MTPY
脫水及分解	5043	千瓦時/公噸 $\text{CO}_2$
獲得 100% $\text{Mg(OH)Cl}(250^\circ\text{C})$		
產生 28.8% $\text{HCl}$ 蒸氣		
	2.2	MW
自 28% $\text{HCl}$ 蒸氣之熱回收	361	千瓦時/公噸 $\text{CO}_2$
總計	4681	千瓦時/公噸 $\text{CO}_2$

表 6a：說明事例 4 模擬之質量及能量

過程物流名稱→	CaCl <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	廢氣	H <sub>2</sub> O	HCl 蒸氣	MgCl <sub>2</sub>	MgCl <sub>2</sub> -6W	Mg(OH)Cl
溫度, °C	25	95	104	25	120	188	104	250
壓力, psia	14.7	14.7	15.78	14.7	14.696	14.7	14.7	14.696
蒸氣質量分率	0	0	1	0	1	0	0	0
固體質量分率	1	1	0	0	0	1	1	1
質量流量, 公噸/年	134573.943	121369.558	166332.6	234646.82	306683.742	492736.693	492736.693	186052.951
體積流量, gal/min	30.929	22.514	76673.298	6546.44	235789.67	96.405	96.405	32.909
焓, MW	-30.599	-46.174	-17.479	-118.063	-98.638	-188.114	-190.147	-60.661
密度, lb/cuft	136.522	169.146	0.068	1.125	0.041	160.371	160.371	177.393
H <sub>2</sub> O	0	0	6499.971	234646.82	218315.265	0	0	0
H <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
HCl	0	0	0	0	88368.477	0	0	0
CO <sub>2</sub>	0	0	53333.098	0	0	0	0	0
CO	0	0	0	0	0	0	0	0
O <sub>2</sub>	0	0	18333.252	0	0	0	0	0
N <sub>2</sub>	0	0	88166.278	0	0	0	0	0
CaCl <sub>2</sub>	134573.943	80.499	0	0	0	0	0	0
Ca(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0

過程物流名稱→	CaCl <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	廢氣	H <sub>2</sub> O	HCl蒸氣	MgCl <sub>2</sub>	MgCl <sub>2</sub> -6W	Mg(OH)Cl
CaCO <sub>3</sub>	0	121289.059	0	0	0	0	0	0
MgCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca(O)Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	0	0	0	0	492736.693	492736.693	0
Mg(OH)Cl	0	0	0	0	0	0	0	186052.951
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0	0
H <sub>2</sub> O	0	0	0.039	1	0.712	0	0	0
H <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
HCl	0	0	0	0	0.288	0	0	0
CO <sub>2</sub>	0	0	0.321	0	0	0	0	0
CO	0	0	0	0	0	0	0	0
O <sub>2</sub>	0	0	0.11	0	0	0	0	0
N <sub>2</sub>	0	0	0.53	0	0	0	0	0
CaCl <sub>2</sub>	1	0.001	0	0	0	0	0	0

過程物流名稱→	CaCl <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	廢氣	H <sub>2</sub> O	HCl蒸氣	MgCl <sub>2</sub>	MgCl <sub>2</sub> -6W	Mg(OH)Cl
Ca(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
CaCO <sub>3</sub>	0	0.999	0	0	0	0	0	0
MgCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca(O)Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	0	0	0	0	1	1	0
Mg(OH)Cl	0	0	0	0	0	0	0	1
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0	0
H <sub>2</sub> O	0	0	11.441	413.016	384.27	0	0	0
H <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
HCl	0	0	0	0	76.854	0	0	0
CO <sub>2</sub>	0	0	38.427	0	0	0	0	0
CO	0	0	0	0	0	0	0	0
O <sub>2</sub>	0	0	18.168	0	0	0	0	0
N <sub>2</sub>	0	0	99.8	0	0	0	0	0

過程物流名稱→	CaCl <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>	廢氣	H <sub>2</sub> O	HCl蒸氣	MgCl <sub>2</sub>	MgCl <sub>2</sub> -6W	Mg(OH)Cl
CaCl <sub>2</sub>	38.45	0.023	0	0	0	0	0	0
Ca(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
CaCO <sub>3</sub>	0	38.427	0	0	0	0	0	0
MgCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca(O)Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	0	0	0	0	76.854	76.854	0
Mg(OH)Cl	0	0	0	0	0	0	0	76.854
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0	0

表 6b：說明事例 4 模擬之質量及能量

過程物流名稱→	Mg(OH)Cl <sub>2</sub>	再循環1	再循環2	再循環3	RX2-出	燃料	蒸汽	出
溫度，°C	100	95	113.8	113.8	95	95	250	113.8
壓力，psia	14.696	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.696	14.7
蒸氣質量分率	0	0	0.002	0	1	0	1	1
固體質量分率	1	0.998	0.998	1	0	0.998	0	0
質量流量，公噸/年	186052.95	493737.58	493737.58	492736.69	106499.18	615107.14	306683.74	1000.89
體積流量，gal/min	32.909	126.575	982.405	96.405	56469.408	146.834	313756.5	886
焓，MW	-61.189	-190.859	-190.331	-189.91	0.241	-237.034	-96.605	-0.421
密度，lb/cuft	177.393	122.394	15.769	160.371	0.059	131.442	0.031	0.035
H <sub>2</sub> O	0	1000	1000	0	0	1000	218315.27	1000
H <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
HCl	0	0	0	0	0	0	88368.477	0
CO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0.532	0	0	0
CO	0	0	0	0	0	0	0	0
O <sub>2</sub>	0	0.165	0.165	0	18333.088	0.165	0	0.165
N <sub>2</sub>	0	0.72	0.72	0	88165.558	0.72	0	0.72
CaCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	80.499	0	0
Ca(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0

過程物流名稱→	Mg(OH)Cl <sub>2</sub>	再循環1	再循環2	再循環3	RX2-出	漿料	蒸汽	出
CaCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	121289.06	0	0
MgCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca(O)Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	492736.69	492736.69	492736.69	0	492736.69	0	0
Mg(OH)Cl	186052.95	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0	0
H <sub>2</sub> O	0	0.002	0.002	0	0	0.002	0.712	0.999
H <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
HCl	0	0	0	0	0	0	0.288	0
CO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	0	0	0	0	0	0	0	0
O <sub>2</sub>	0	0	0	0	0.172	0	0	0
N <sub>2</sub>	0	0	0	0	0.828	0	0	0.001
CaCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0

過程物流名稱→	Mg(OH)Cl <sub>2</sub>	再循環1	再循環2	再循環3	RX2-出	漿料	蒸汽	出
Ca(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
CaCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0.197	0	0
MgCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca(O)Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	0.998	0.998	1	0	0.801	0	0
Mg(OH)Cl	1	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0	0
H <sub>2</sub> O	0	1.76	1.76	0	0	1.76	384.27	1.76
H <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
HCl	0	0	0	0	0	0	76.854	0
CO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
CO	0	0	0	0	0	0	0	0
O <sub>2</sub>	0	0	0	0	18.168	0	0	0
N <sub>2</sub>	0	0.001	0.001	0	99.799	0.001	0	0.001

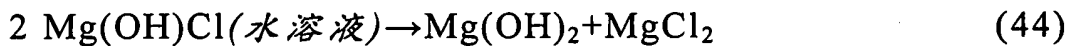
過程物流名稱→	Mg(OH)Cl <sub>2</sub>	再循環1	再循環2	再循環3	RX2-出	漿料	蒸汽	出
CaCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0.023	0	0
Ca(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
CaCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	38.427	0	0
MgCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca(O)Cl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	76.854	76.854	76.854	0	76.854	0	0
Mg(OH)Cl	76.854	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0	0

### 實例 6-道路用鹽鍋爐： $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 分解

圖 10 展示經加熱  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  樣品之質量百分比之圖。樣品之初始質量為約 70 mg 且設定為 100%。在實驗期間，在樣品熱分解的同時量測樣品質量。溫度快速勻升至  $150^\circ\text{C}$ ，接著以每分鐘  $0.5^\circ\text{C}$  緩慢增加。在約  $220^\circ\text{C}$  下，重量變得恆定，與形成  $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$  一致。不存在重量進一步減小指示幾乎所有水已經移除。2 個不同詳細分解質量分析展示於圖 28 及圖 29 中，同時展示不同最終物質之理論平穩狀態。圖 30 確認  $\text{MgO}$  可在高於產生  $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$  之溫度的溫度 (此處為  $500^\circ\text{C}$ ) 下產生。

### 實例 7- $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$ 於 $\text{H}_2\text{O}$ 中之溶解

將  $\text{MgO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  加熱分解所產生之  $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$  之樣品溶解於水中且攪拌一段時間。此後，乾燥、收集並分析剩餘沈澱物。根據分解式， $\text{Mg}(\text{OH})_2$  之量可與預期量進行比較且加以分析。化學反應可表示如下：



$\text{Mg}(\text{OH})_2$  及  $\text{MgCl}_2$  之溶解度資料如下：

$\text{MgCl}_2$       52.8 g/100 g  $\text{H}_2\text{O}$ (極易溶)

$\text{Mg}(\text{OH})_2$     0.0009 g/100 g  $\text{H}_2\text{O}$ (實際上不可溶)

經回收  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  之理論重量：

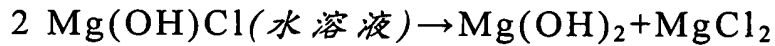
樣品之既定重量：3.0136 g。

MW  $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$  76.764

MW  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  58.32

每莫耳  $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$  形成之  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  莫耳數 =  $\frac{1}{2}$

Mg(OH)<sub>2</sub>之預期量



$$3.016 \text{ g} \times (\text{MW Mg(OH)}_2) \div (\text{MW Mg(OH)Cl}) \times \frac{1}{2} = 1.1447 \text{ g}$$

收集之沈澱物 = 1.1245 g

收集物之理論% =  $(1.1447 \div 1.1245) \times 100 = 98.24\%$

分析資料：

接著，遞送Mg(OH)<sub>2</sub>樣品以進行XRD(X射線繞射)及EDS分析。結果展示於圖11中。頂部列之峰為樣品峰，中間列中之尖峰為Mg(OH)<sub>2</sub>之特徵峰，而底部之尖峰為MgO之特徵峰。由此驗證，Mg(OH)Cl溶解所回收之沈澱物具有與Mg(OH)<sub>2</sub>之信號類似之信號。

元素 (計算值)	k比率 重量%	ZAF (1σ)	原子%	元素	重量%誤差
Mg-K	0.9472	1.014	96.88	96.02	+/- 0.23
Si-K	0.0073	2.737	1.74	1.99	+/- 0.17
Cl-K	0.0127	1.570	1.38	2.00	+/- 0.16
總計	100.00	100.00			

注意：結果不包括Z<11(Na)之元素。

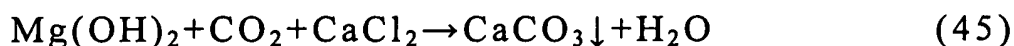
EDS分析揭示極少之氯[Cl]併入沈澱物中。注意，此分析無法偵測氧或氫。

**實例8-脫除二氧化碳鼓泡器實驗：藉由使CO<sub>2</sub>與**

**Mg(OH)<sub>2</sub> {或Mg(OH)Cl}及CaCl<sub>2</sub>反應而產生CaCO<sub>3</sub>**

將約20公克Mg(OH)<sub>2</sub>與2公升水一起置放於氣泡柱中，且使CO<sub>2</sub>鼓泡通過該氣泡柱持續x分鐘之時段。此後，收集一些液體，向其中添加CaCl<sub>2</sub>溶液。沈澱物即刻形成且遞

送以進行XRD及EDS。化學反應可表示如下：



XRD分析(圖12)與CaCO<sub>3</sub>特徵相符。

### EDS

元素 (計算值)	k比率 重量%	ZAF (1σ)	原子%	元素	重量%誤差
Mg-K	0.0070	2.211	2.52	1.55	+/- 0.10
Al-K	0.0013	1.750	0.33	0.22	+/- 0.04
Si-K	0.0006	1.382	0.12	0.09	+/- 0.03
Cl-K	0.0033	1.027	0.38	0.34	+/- 0.03
Ca-K	0.9731	1.005	96.64	97.80	+/- 0.30
總計	100.00	100.00			

注意：結果不包括Z<11(Na)之元素。

EDS分析指示CaCO<sub>3</sub>近乎純淨，僅含有1.55重量%鎂雜質且幾乎不含來自CaCl<sub>2</sub>之氯。

進行相同測試，但使用由MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O分解所得之Mg(OH)Cl替代Mg(OH)<sub>2</sub>。儘管Mg(OH)Cl具有Mg(OH)<sub>2</sub>一半之氫氧根[OH<sup>-</sup>]，但預期會吸收CO<sub>2</sub>且形成沈澱之CaCO<sub>3</sub>(PCC)。

XRD分析(圖13)與CaCO<sub>3</sub>特徵相符。

### EDS

卡方分佈(Chi-sqd)=5.83 壽命=300.0秒

無標分析(Standardless Analysis)

PROZA修正加速電壓=20 kV 掠出角=35.00度

迭代次數=3

元素 (計算值)	k比率 重量%	ZAF (1 $\sigma$ )	原子%	元素	重量%誤差
Mg-K	0.0041	2.224	1.48	0.90	+/- 0.09
S-K	0.0011	1.071	0.14	0.11	+/- 0.04
Ca-K	0.9874	1.003	98.38	98.98	+/- 0.34
總計	100.00	100.00			

注意：結果不包括  $Z < 11$  (Na) 之元素。

結果再次指示  $\text{CaCO}_3$  近乎純淨，幾乎不含 Mg 或 Cl 化合物。

**實例 9A-岩石熔化器實驗：橄欖石及蛇紋石與 HCl 之反應**  
 粉碎橄欖石  $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$  及蛇紋石  $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  之樣品，且歷經約 72 小時之時段與 6.1 莫耳濃度 HCl 反應。進行兩組測試，第一組在室溫下且第二組在  $70^\circ\text{C}$  下。此等礦物質具有可變化學式且常含有鐵。過濾樣品之後，在烘箱中乾燥所得濾渣 (filtrand) 及濾液隔夜。接著對樣品進行 XRD 及 EDS 分析。濾液中應存在  $\text{MgCl}_2$  且濾渣應主要為  $\text{SiO}_2$ 。

**在室溫下與 HCl 反應之橄欖石濾液**

元素 (計算值)	k比率 重量%	ZAF (1 $\sigma$ )	原子%	元素	重量%誤差
Mg-K	0.1960	1.451	37.06	28.45	+/- 0.18
Si-K	0.0103	1.512	1.75	1.56	+/- 0.11
Cl-K	0.5643	1.169	58.89	65.94	+/- 0.31
Fe-K	0.0350	1.161	2.30	4.06	+/- 0.22
總計	100.00	100.00			

## 在 70°C 下與 HCl 反應之橄欖石濾液

注意：結果不包括 Z&lt;11(Na) 之元素。

元素 (計算值)	k比率 重量%	ZAF (1σ)	原子%	元素	重量%誤差
Mg-K	0.1172	1.684	27.39	19.74	+/- 0.12
Si-K	0.0101	1.459	1.77	1.48	+/- 0.07
Cl-K	0.5864	1.142	63.70	66.94	+/- 0.24
Fe-K	0.0990	1.144	6.84	11.33	+/- 0.21
Ni-K	0.0045	1.128	0.29	0.51	+/- 0.09
總計	100.00	100.00			

## 在室溫下與 HCl 反應之蛇紋石濾液

注意：結果不包括 Z&lt;11(Na) 之元素。

元素 (計算值)	k比率 重量%	ZAF (1σ)	原子%	元素	重量%誤差
Mg-K	0.1674	1.466	32.47	24.53	+/- 0.15
Al-K	0.0025	1.863	0.55	0.46	+/- 0.06
Si-K	0.0033	1.456	0.55	0.48	+/- 0.04
Cl-K	0.6203	1.141	64.22	70.77	+/- 0.27
Ca-K	0.0016	1.334	0.17	0.21	+/- 0.05
Cr-K	0.0026	1.200	0.19	0.31	+/- 0.07
Mn-K	0.0011	1.200	0.08	0.14	+/- 0.08
Fe-K	0.0226	1.160	1.51	2.62	+/- 0.10
Ni-K	0.0042	1.128	0.26	0.48	+/- 0.10
總計	100.00	100.00			

## 在 70°C 下與 HCl 反應之蛇紋石濾液

注意：結果不包括 Z&lt;11(Na) 之元素。

元素 (計算值)	k比率 重量%	ZAF (1σ)	原子%	元素	重量%誤差
Mg-K	0.1759	1.455	33.67	25.59	+/- 0.14
Al-K	0.0017	1.886	0.39	0.33	+/- 0.06
Si-K	0.0087	1.468	1.46	1.28	+/- 0.04
Cl-K	0.6014	1.152	62.46	69.27	+/- 0.25

Cr-K	0.0016	1.199	0.12	0.19	+/- 0.06
Fe-K	0.0268	1.161	1.78	3.11	+/- 0.17
Ni-K	0.0020	1.130	0.12	0.22	+/- 0.08
總計	100.00	100.00			

注意：結果不包括  $Z < 11$  (Na) 之元素。

在環境條件及  $70^{\circ}\text{C}$  下，兩種礦物質蛇紋石與橄欖石之濾液均明確說明存在  $\text{MgCl}_2$  且在橄欖石之情況下存在少量  $\text{FeCl}_2$ 。

#### 在室溫下與 HCl 反應之橄欖石濾渣

元素 (計算值)	k比率 重量%	ZAF ( $1\sigma$ )	原子%	元素	重量%誤差
Mg-K	0.2239	1.431	37.68	32.04	+/- 0.14
Si-K	0.3269	1.622	53.96	53.02	+/- 0.19
Cl-K	0.0140	1.658	1.87	2.32	+/- 0.06
Cr-K	0.0090	1.160	0.58	1.05	+/- 0.08
Mn-K	0.0013	1.195	0.08	0.16	+/- 0.09
Fe-K	0.0933	1.167	5.57	10.89	+/- 0.26
Ni-K	0.0045	1.160	0.25	0.52	+/- 0.11
總計	100.00	100.00			

注意：結果不包括  $Z < 11$  (Na) 之元素。

#### 在 $70^{\circ}\text{C}$ 下與 HCl 反應之橄欖石濾渣

元素 (計算值)	k比率 重量%	ZAF ( $1\sigma$ )	原子%	元素	重量%誤差
Mg-K	0.2249	1.461	38.87	32.86	+/- 0.16
Si-K	0.3030	1.649	51.12	49.94	+/- 0.21
Cl-K	0.0223	1.638	2.96	3.65	+/- 0.14
Ca-K	0.0033	1.220	0.29	0.41	+/- 0.05
Cr-K	0.0066	1.158	0.42	0.76	+/- 0.08
Mn-K	0.0023	1.193	0.15	0.28	+/- 0.10
Fe-K	0.0937	1.163	5.61	10.89	+/- 0.29

Ni-K	0.0074	1.158	0.42	0.86	+/- 0.13
Cu-K	0.0029	1.211	0.16	0.35	+/- 0.16
總計	100.00	100.00			

注意：結果不包括  $Z < 11$  (Na) 之元素。

假定橄欖石之化學式為  $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ ，且此為富含鎂之橄欖石。原始化合物具有 2:1 之 Mg:Si 比率。然而，不通過過濾器之濾渣具有 (37+5.5:52) 或 0.817:1 (圖表上之原子%) 之 (Mg+Fe:Si) 比率，顯然超過 50% 之鎂通過過濾器。

#### 在室溫下與 HCl 反應之蛇紋石濾渣

元素 (計算值)	k比率 重量%	ZAF (1 $\sigma$ )	原子%	元素	重量%誤差
Mg-K	0.1930	1.595	37.32	30.78	+/- 0.15
Si-K	0.2965	1.670	51.94	49.50	+/- 0.20
Cl-K	0.0065	1.633	0.88	1.06	+/- 0.06
Cr-K	0.0056	1.130	0.36	0.63	+/- 0.08
Fe-K	0.1532	1.155	9.33	17.69	+/- 0.31
Ni-K	0.0029	1.159	0.17	0.34	+/- 0.12
總計	100.00	100.00			

注意：結果不包括  $Z < 11$  (Na) 之元素。

#### 在 70°C 下與 HCl 反應之蛇紋石濾渣

元素 (計算值)	k比率 重量%	ZAF (1 $\sigma$ )	原子%	元素	重量%誤差
Mg-K	0.1812	1.536	33.53	27.83	+/- 0.13
Si-K	0.3401	1.593	56.49	54.18	+/- 0.18
Cl-K	0.0106	1.651	1.45	1.75	+/- 0.11
Cr-K	0.0037	1.142	0.24	0.43	+/- 0.07
Mn-K	0.0009	1.188	0.05	0.10	+/- 0.08
Fe-K	0.1324	1.159	8.05	15.35	+/- 0.26
Ni-K	0.0032	1.160	0.18	0.37	+/- 0.11
總計	100.00	100.00			

注意：結果不包括 $Z < 11$ (Na)之元素。

假定蛇紋石之化學式為 $(Mg,Fe)_3Si_2O_5(OH)_4$ ，(Mg+Fe)與Si之初始1.5:1比率已削減至 $(37+9.3:56.5)=0.898:1$ 。

### 實例9B- $MgCl_2 \cdot 6(H_2O)$ 分解之溫度/壓力模擬

如以下(表7)及圖14中所示，改變壓力及溫度以確定此對 $MgCl_2 \cdot 6(H_2O)$ 分解之平衡的影響。輸入為：

- 1)  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$
- 2)  $CaCl_2$
- 3) 離開熱交換器(HX)之經標示 $Mg(OH)Cl$ 之熱流的溫度  
(參見圖7-8)
- 4) 在傾析器中分離之固體百分比
- 5) 經標示 $H_2O$ 所需之水
- 6) 廢氣。

表 7

變化1	變化2	輸入	$Mg(OH)Cl$	$MgO$	Q	
反應器1	反應器1					
參數	參數					
溫度	壓力					
°C	PSIA	MOL/SEC	MOL/SEC	MOL/SEC	MW	千瓦時/公噸 $CO_2$
400	5	51.08399	25.31399	25.77001	23.63765	3883
410	5	38.427	0	38.427	19.85614	3261
420	5	38.427	0	38.427	19.87482	3264
430	5	38.427	0	38.427	19.89354	3268
440	5	38.427	0	38.427	19.9123	3271
450	5	38.427	0	38.427	19.93111	3274
400	7	76.854	76.854	0	31.37484	5153
410	7	53.24627	29.63854	23.60773	24.31186	3993

變化1	變化2	輸入	Mg(OH)Cl	MgO	Q	
反應器1	反應器1					
參數	參數					
溫度	壓力					
°C	PSIA	MOL/SEC	MOL/SEC	MOL/SEC	MW	千瓦時/公噸CO <sub>2</sub>
420	7	38.427	0	38.427	19.87482	3264
430	7	38.427	0	38.427	19.89354	3268
440	7	38.427	0	38.427	19.9123	3271
450	7	38.427	0	38.427	19.93111	3274
400	9	76.854	76.854	0	31.37484	5153
410	9	72.85115	68.84829	4.002853	30.20646	4961
420	9	50.2148	23.5756	26.6392	23.42411	3847
430	9	38.427	0	38.427	19.89354	3268
440	9	38.427	0	38.427	19.9123	3271
450	9	38.427	0	38.427	19.93111	3274
400	11	76.854	76.854	0	31.37484	5153
410	11	76.854	76.854	0	31.41	5159
420	11	64.78938	52.72476	12.06462	27.81251	4568
430	11	44.67748	12.50096	32.17652	21.77822	3577
440	11	38.427	0	38.427	19.9123	3271
450	11	38.427	0	38.427	19.93111	3274
400	13	76.854	76.854	0	31.37484	5153
410	13	76.854	76.854	0	31.41	5159
420	13	76.854	76.854	0	31.44515	5165
430	13	55.59535	34.3367	21.25865	25.07026	4118
440	13	38.427	0	38.427	19.9123	3271
450	13	38.427	0	38.427	19.93111	3274
400	15	76.854	76.854	0	31.37484	5153
410	15	76.854	76.854	0	31.41	5159
420	15	76.854	76.854	0	31.44515	5165
430	15	66.51322	56.17244	10.34078	28.36229	4659
440	15	46.41875	15.98351	30.43525	22.32544	3667
450	15	38.427	0	38.427	19.93111	3274
200	5	127	76.854	0	47.51946	7805

變化1	變化2	輸入	Mg(OH)Cl	MgO	Q	
反應器1	反應器1					
參數	參數					
溫度	壓力					
°C	PSIA	MOL/SEC	MOL/SEC	MOL/SEC	MW	千瓦時/公噸CO <sub>2</sub>
210	5	85	76.854	0	33.34109	5476
220	5	77	76.854	0	30.74184	5049
230	5	77	76.854	0	30.77702	5055
240	5	77	76.854	0	30.8122	5061
250	5	77	76.854	0	30.84739	5067
200	7	184	76.854	0	66.57309	10935
210	7	125	76.854	0	46.75184	7679
220	7	85	76.854	0	33.32609	5474
230	7	77	76.854	0	30.777	5055
240	7	77	76.854	0	30.81218	5061
250	7	77	76.854	0	30.84737	5067
200	9	297	76.854	0	89.51079	14702
210	9	165	76.854	0	60.16258	9882
220	9	113	76.854	0	42.92123	7050
230	9	78	76.854	0	31.04401	5099
240	9	77	76.854	0	30.81217	5061
250	9	77	76.854	0	30.84735	5067
200	11	473	76.854	0	136.5784	22433
210	11	205	76.854	0	73.57332	12084
220	11	142	76.854	0	52.51638	8626
230	11	98	76.854	0	38.01558	6244
240	11	77	76.854	0	30.81216	5061
250	11	77	76.854	0	30.84734	5067
200	13	684	76.854	0	192.9858	31698
210	13	303	76.854	0	91.43505	15018
220	13	170	76.854	0	62.11152	10202
230	13	119	76.854	0	44.98715	7389
240	13	83.3323	76.854	0	33.00459	5421
250	13	76.854	76.854	0	30.84733	5067

變化1	變化2	輸入	Mg(OH)Cl	MgO	Q	
反應器1	反應器1					
參數	參數					
溫度	壓力					
°C	PSIA	MOL/SEC	MOL/SEC	MOL/SEC	MW	千瓦時/公噸CO <sub>2</sub>
200	15	930.5287	76.854	0	258.7607	42502
210	15	422.9236	76.854	0	123.7223	20322
220	15	198.7291	76.854	0	71.70666	11778
230	15	139.6567	76.854	0	51.95871	8534
240	15	98.51739	76.854	0	38.14363	6265
250	15	76.854	76.854	0	30.84733	5067

### 實例 10-21

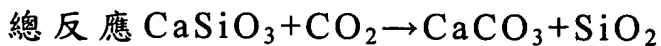
以下其餘實例係關於使用自煤或天然氣發電廠排放之廢熱獲得必需之熱以進行分解反應。為了自煤廢氣排放獲得必需之熱，熱源可位於溫度在320-480°C範圍內之袋濾室之前，以替代空氣預熱器。參見參考文獻：「The structural design of air and gas ducts for power stations and industrial Boiler Applications」第11-15頁，出版商：美國土木工程師學會 (American Society of Civil Engineers) (1995年8月)，其以全文引用的方式併入本文中。開放式循環天然氣工廠之排氣溫度高得多，為600°C。參見參考文獻：「The structural design of air and gas ducts for power stations and industrial Boiler Applications」第11-15頁，出版商：美國土木工程師學會(1995年8月)，其以全文引用的方式併入本文中。另外， $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 之分解反應亦可依兩種不同模式進行，亦即完全分解成MgO或部分分解成Mg(OH)Cl。在一些實施例中，部分分解成Mg(OH)Cl需要

高於180°C之溫度；而在一些實施例中，完全分解成MgO需要440°C或高於440°C之溫度。

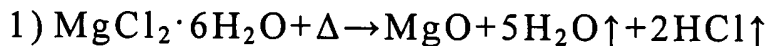
另外，引入過程中之饋料可表示為介於100%矽酸鈣(CaSiO<sub>3</sub>)與100%矽酸鎂(MgSiO<sub>3</sub>)之間的連續流，其中透輝石(MgCa(SiO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)(或莫耳比為1:1之CaSiO<sub>3</sub>與MgSiO<sub>3</sub>之混合物)表示中間50%之情況。對於此等情況中之每一者，在一些實施例中，所得輸出物將在碳酸鈣(CaCO<sub>3</sub>)至碳酸鎂(MgCO<sub>3</sub>)之範圍內，其中白雲石CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>表示中間情況。使用100%矽酸鈣之方法為所有先前模型化之實施例中使用之Ca-Mg方法。亦重要的是，應注意100%矽酸鎂方法不使用鈣化合物；而100%矽酸鈣引入饋料方法使用鎂化合物，但在再循環迴路中，僅需要補給性鎂化合物。

以下描述關於例如使用水合MgCl<sub>2</sub>之完全及部分分解以分別獲得MgO及Mg(OH)Cl之Ca-Mg方法、僅使用Mg之方法、透輝石方法的更多細節。

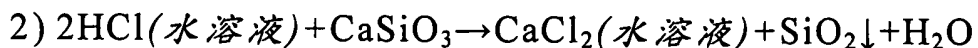
### I) Ca-Mg方法



a) 完全分解(「CaSiO<sub>3</sub>-MgO方法」):

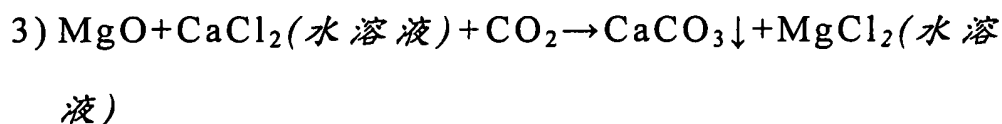


熱分解反應。

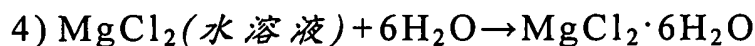


岩石熔化反應。

注意，在反應期間每2莫耳HCl將存在5莫耳H<sub>2</sub>O。

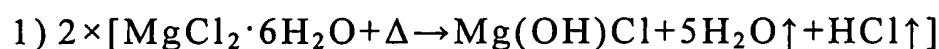


此反應式之一些形式使用自 MgO 及 H<sub>2</sub>O 形成之 Mg(OH)<sub>2</sub>。



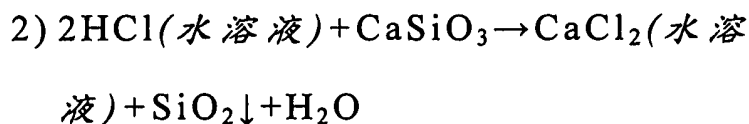
再生 MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O，返回至 1 號中。

b) 部分分解(「CaSiO<sub>3</sub>-Mg(OH)Cl 方法」):

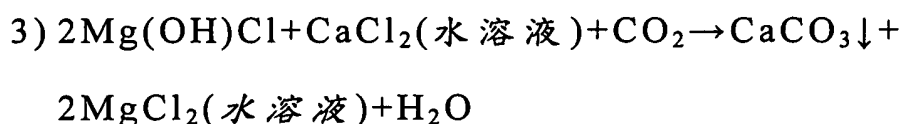


熱分解。

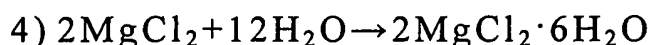
需要兩倍 MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 來捕集相同量之 CO<sub>2</sub>。



岩石熔化反應。



CO<sub>2</sub> 捕獲反應。

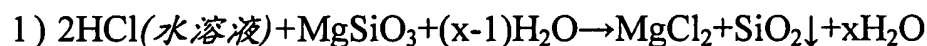


再生 MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O，返回至 1 號中。

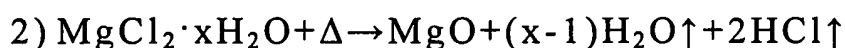
## II) 僅使用 Mg 之方法



c) 完全分解(「MgSiO<sub>3</sub>-MgO 方法」)



岩石熔化反應。



熱分解反應。

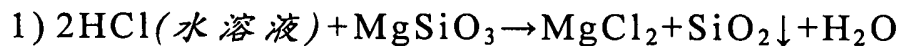
注意，每2莫耳HCl將產生「x-1」莫耳H<sub>2</sub>O。



CO<sub>2</sub>捕獲反應。

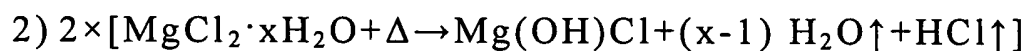
注意，在此實施例中，無需MgCl<sub>2</sub>之再循環。x之值，亦即水合水之數目，遠小於6，因為來自岩石熔化反應之MgCl<sub>2</sub>足夠熱以驅動許多水變成氣相之故。因此，自岩石熔化起始之路徑在穩定狀態下以如用約為2之值模型化之「x」進行操作。

d)部分分解(「MgSiO<sub>3</sub>-Mg(OH)Cl方法」)



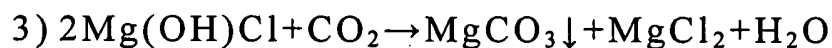
岩石熔化反應。

注意，在反應期間每莫耳HCl將存在「x-1」莫耳H<sub>2</sub>O。

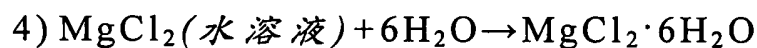


分解。

需要兩倍MgCl<sub>2</sub>·(x-1)H<sub>2</sub>O來捕集相同量之CO<sub>2</sub>。



CO<sub>2</sub>捕獲反應。



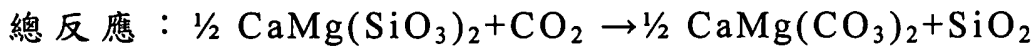
再生MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O，返回至1號中。

注意，在此實施例中，一半MgCl<sub>2</sub>經再循環。x之值，亦即水合水之數目，稍小於6，因為一半來自岩石熔化反應之MgCl<sub>2</sub>足夠熱以驅動許多水變成氣相且其餘一半自吸收

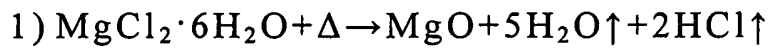
柱再循環之故。因此，在穩定狀態下，對於 $\text{MgCl}_2$ 之總量，水合數目將具有約為4之值，其為 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 與 $\text{MgCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 之平均值。

### III) 透輝石或混合方法：

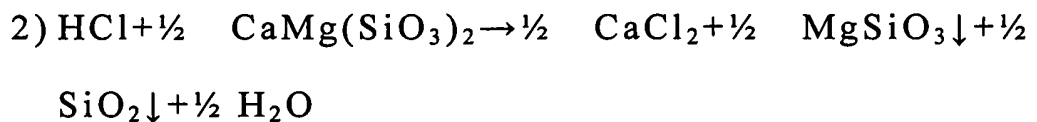
注意，透輝石為混合之矽酸鈣與矽酸鎂且白雲石為混合之碳酸鈣與碳酸鎂。



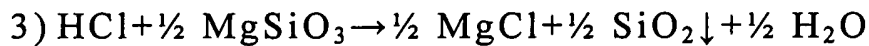
e) 完全分解(「透輝石-MgO方法」)：



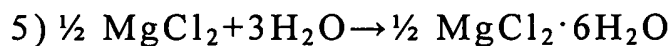
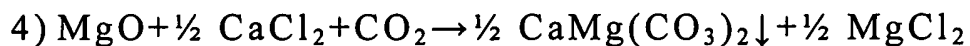
熱分解。



第一岩石熔化反應。



第二岩石熔化反應。MgCl<sub>2</sub>返回至1號中。



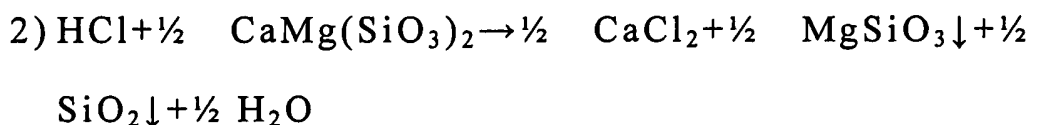
再生 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ，返回至1號中。

f) 部分分解(「透輝石-Mg(OH)Cl方法」)：



熱分解。

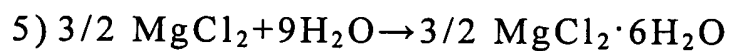
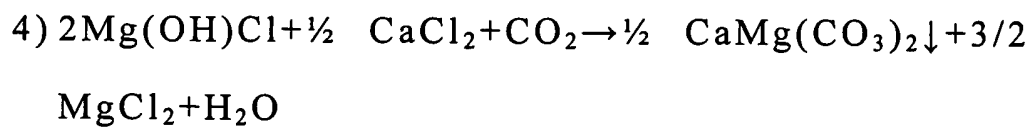
需要兩倍 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 來捕集相同量之 $\text{CO}_2$ 。



第一岩石熔化反應。



第二岩石熔化反應。此處  $\text{MgCl}_2$  返回至 1 號中。



再生  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ，返回至 1 號中。

表 9：方法概述

實例	方法	廢氣來源	溫度 $^{\circ}\text{C}^1$	廢氣之 $\text{CO}_2$ % <sup>2</sup>	各過程流之詳細質量及能量平衡
10	$\text{CaSiO}_3\text{-Mg(OH)Cl}$	煤	320-550	7.2%-18%	表 14
11	$\text{CaSiO}_3\text{-Mg(OH)Cl}$	天然氣	600	7.2%-18%	表 14
12	$\text{CaSiO}_3\text{-MgO}$	煤	550	7.2%-18%	表 15
13	$\text{CaSiO}_3\text{-MgO}$	天然氣	600	7.2%-18%	表 15
14	$\text{MgSiO}_3\text{-Mg(OH)Cl}$	煤	320-550	7.2%-18%	表 16
15	$\text{MgSiO}_3\text{-Mg(OH)Cl}$	天然氣	600	7.2%-18%	表 16
16	$\text{MgSiO}_3\text{-MgO}$	煤	550	7.2%-18%	表 17
17	$\text{MgSiO}_3\text{-MgO}$	天然氣	600	7.2%-18%	表 17
18	透輝石- $\text{Mg(OH)Cl}$	煤	320-550	7.2%-18%	表 18
19	透輝石- $\text{Mg(OH)Cl}$	天然氣	600	7.2%-18%	表 18
20	透輝石- $\text{MgO}$	煤	550	7.2%-18%	表 19
21	透輝石- $\text{MgO}$	天然氣	600	7.2%-18%	表 19

1-320-550 $^{\circ}\text{C}$ 之溫度範圍包括分別在320 $^{\circ}\text{C}$ 、360 $^{\circ}\text{C}$ 、400 $^{\circ}\text{C}$ 、440 $^{\circ}\text{C}$ 及550 $^{\circ}\text{C}$ 下操作之模型。

2-廢氣之 $\text{CO}_2$ 百分比7.2%-18%包括分別在7.2%、10%、14%及18%下操作之模型。

**矽酸鈣方法：**

CaSiO<sub>3</sub>-MgO及CaSiO<sub>3</sub>-Mg(OH)Cl分解過程進一步分成兩個階段，第一步由MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O轉化成MgCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O+4 H<sub>2</sub>O之脫水反應組成，且第二步為MgCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O轉化成Mg(OH)Cl+HCl+H<sub>2</sub>O(若部分分解為所要或所需的)及MgO+2HCl+H<sub>2</sub>O(若完全分解為所要或所需的)。圖15描述此方法之佈局。

**矽酸鎂方法：**

MgSiO<sub>3</sub>-MgO及MgSiO<sub>3</sub>-Mg(OH)Cl方法由一腔室分解步驟組成，其中來自分解腔室之HCl與MgSiO<sub>3</sub>在岩石熔化反應器中反應且伴隨產生之反應熱使MgCl<sub>2</sub>在離開接近分解反應器之岩石熔化腔室時呈二水合物形式MgCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O，在該分解反應器中MgCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O如較早所述轉化成MgO或Mg(OH)Cl。若矽酸鈣不可用，則此方法可為較佳的。由分解放出之HCl與MgSiO<sub>3</sub>反應以形成更多MgCl<sub>2</sub>。矽酸鎂方法遵循與鈣不同之路徑。該方法自「岩石熔化反應HCl+矽酸鹽」起始，接著轉至「分解反應(MgCl<sub>2</sub>+熱)」，且最後進入吸收柱。在矽酸鈣方法中，所有鎂化合物在分解反應與吸收反應之間轉換。圖16描述此方法之佈局。

**混合之矽酸鎂與矽酸鈣「透輝石」方法：**

中間過程透輝石-MgO及透輝石-Mg(OH)Cl亦涉及兩階段分解，其由脫水反應MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O+Δ→MgCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O+4 H<sub>2</sub>O、繼之以分解反應MgCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O+Δ→MgO+2HCl+H<sub>2</sub>O(完全分解)或MgCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O+Δ→Mg(OH)Cl+HCl+H<sub>2</sub>O(部分分解)

組成。圖 17 描述此方法之佈局。

由分解伴隨產生之 HCl 接著在兩步「岩石熔化反應」中與透輝石  $\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$  反應。第一反應經由反應  $2\text{HCl} + \text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2 \rightarrow \text{CaCl}_2(\text{水溶液}) + \text{MgSiO}_3\downarrow + \text{SiO}_2\downarrow + \text{H}_2\text{O}$  產生  $\text{CaCl}_2$ 。來自先前反應之固體接著再次與 HCl 反應以經由反應  $\text{MgSiO}_3 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{MgCl}_2 + \text{SiO}_2\downarrow + \text{H}_2\text{O}$  產生  $\text{MgCl}_2$ 。來自第一岩石熔化器之  $\text{CaCl}_2$  輸送至吸收柱中且來自第二岩石熔化器之  $\text{MgCl}_2$  輸送至分解反應器中以產生  $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$  或  $\text{MgO}$ 。

反應基礎：

所有此等實例皆設想吸收來自相關已知燒煤工廠之參考廢氣中之 50%  $\text{CO}_2$ 。作出此設想以使得能夠在各實例之間進行比較。廢氣自此工廠之排放流率為 136,903,680 公噸/年且此氣體之  $\text{CO}_2$  含量為 10 重量%。此  $\text{CO}_2$  量為實例 10 至 21 之基礎，其中：

每年存在於廢氣中之  $\text{CO}_2$  量：

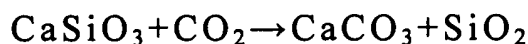
$$136,903,680 \text{ 公噸/年} \times 10\% = 13,690,368 \text{ 公噸/年}$$

每年吸收之  $\text{CO}_2$  量：

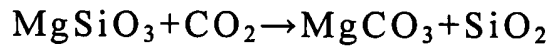
$$13,690,368 \text{ 公噸/年} \times 50\% = 6,845,184 \text{ 公噸 } \text{CO}_2/\text{年}。$$

因為吸收之  $\text{CO}_2$  量為恆量，所以反應物消耗量及產物產生量視各化合物之反應化學計量及分子量而定亦為恆量。

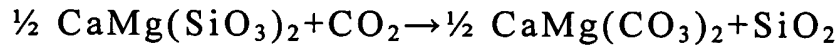
對於  $\text{CaSiO}_3$ - $\text{MgO}$  方法與  $\text{CaSiO}_3$ - $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$  方法之所有實例(實例 10-13)，總反應為：



對於  $\text{MgSiO}_3\text{-MgO}$  方法與  $\text{MgSiO}_3\text{-Mg(OH)Cl}$  方法之所有實例(實例 14-17)，總反應為：



對於透輝石 - $\text{MgO}$  方法與透輝石 - $\text{Mg(OH)Cl}$  方法之所有實例(實例 18-21)，總反應為：



Aspen 模型輸入方法所需之輸入物且計算所需之廢氣，該廢氣用以提供進行分解反應以產生吸收二氧化碳之化合物  $\text{MgO}$ 、 $\text{Mg(OH)}_2$  或  $\text{Mg(OH)Cl}$  所需之熱。此廢氣可來自天然氣或煤工廠且在煤之情況下於  $320^\circ\text{C}$  至  $550^\circ\text{C}$  之溫度範圍內進行測試。此廢氣不應與用作為各實例提供特定  $\text{CO}_2$  移除量之標準的參考廢氣混淆。根據該基礎，使用較高溫度廢氣之方法將通常需要較少廢氣量來捕獲相同量之二氧化碳。又，二氧化碳濃度較高之廢氣將通常使得捕獲二氧化碳所需之廢氣量較大，此係因為較大量之二氧化碳需要被捕獲之故。

反應物消耗量及產物產生量可基於所捕獲之  $\text{CO}_2$  及各實例之各輸入物及各輸出物之分子量來確定。

表 10：輸入物及輸出物(所有實施例)之分子質量

化合物	分子量
$\text{CaSiO}_3$	116.16
$\text{MgSiO}_3$	99.69
透輝石*	215.85
$\text{CaCO}_3$	100.09
$\text{MgCO}_3$	84.31

白雲石*	184.40
SiO <sub>2</sub>	60.08
CO <sub>2</sub>	44.01

\* 莫耳數必須除以2以量測可與其他方法相比較之CO<sub>2</sub>吸收。

對於實例10-13：

CaSiO<sub>3</sub>消耗量為：

$$6,845,184 \text{ 公噸 / 年} \times (116.16/44.01) = 18,066,577 \text{ 公噸 / 年。}$$

CaCO<sub>3</sub>產生量為：

$$6,845,184 \text{ 公噸 / 年} \times (100.09/44.01) = 15,559,282 \text{ 公噸 / 年。}$$

SiO<sub>2</sub>產生量為：

$$6,845,184 \text{ 公噸 / 年} \times (60.08/44.01) = 9,344,884 \text{ 公噸 / 年。}$$

對於其餘實例，可進行相同類型之計算。此下表含有實例10至21之輸入物及輸出物。基礎：每年吸收6,845,184公噸CO<sub>2</sub>。

表11：實例10-21之輸入物及輸出物之質量流量

所有量測值皆以公噸/年(TPY)為單位。			
	實例		
	10-13	14-17	18-21
吸收之CO <sub>2</sub>	6,845,184	6,845,184	6,845,184
輸入物			
用於CO <sub>2</sub> 捕獲之廢氣	136,903,680	136,903,680	136,903,680
10% CO <sub>2</sub>	13,690,368	13,690,368	13,690,368
CaSiO <sub>3</sub>	18,066,577		

MgSiO <sub>3</sub>		15,613,410	
透輝石			16,839,993
輸出物			
SiO <sub>2</sub>	9,344,884	9,344,884	9,344,884
CaCO <sub>3</sub>	15,559,282		
MgCO <sub>3</sub>		13,111,817	
白雲石			14,319,845

操作 Aspen 模型產生分解反應、脫水及分解之各步驟的  
以下熱負荷結果。各實例之結果概述於下表中。

表 12：動力 (在特定 CO<sub>2</sub> 吸收基礎下，各方法之能量等級)

熱平衡		HCl與矽酸鹽反應					
方法	CaSiO <sub>3</sub> -Mg(OH)Cl	CaSiO <sub>3</sub> -MgO	MgSiO <sub>3</sub> -Mg(OH)Cl	MgSiO <sub>3</sub> -MgO	透輝石 - Mg(OH)Cl	透輝石 - MgO	
實例	10、11	12、13	14、15	16、17	18、19	20、21	
脫水腔室(MW)	2670	1087	n/a	n/a	2614	1306	
六水合物脫水成二水合物(210°C)							
來源	HCl與矽酸鹽反應						
分解腔室(MW)	1033	1297	1226	1264	1231	1374	
分解溫度, °C	210	450	210	450	210	450	
來源	廢氣						
用於D&D*之總熱(MW)	3703	2384	1226	1264	3854	2680	

\* D&amp;D等同於脫水及分解

表 13：隨廢氣溫度及 CO<sub>2</sub> 濃度而變之所捕獲 CO<sub>2</sub> 之百分比。實例 10 至 13

方法	CaSiO <sub>3</sub> -Mg(OH)Cl				CaSiO <sub>3</sub> -MgO	CaSiO <sub>3</sub> -Mg(OH)Cl	CaSiO <sub>3</sub> -MgO
	煤 320°C	煤 360°C	煤 400°C	煤 440°C			
廢氣來源/溫度	煤 320°C	煤 360°C	煤 400°C	煤 440°C	煤 550°C	天然氣 600°C	天然氣 600°C
實例號	10	10	10	10	12	11	13
CO <sub>2</sub> %							
7%	33%	45%	57%	70%	105%	121%	96%
10%	24%	32%	41%	50%	75%	87%	69%
14%	17%	23%	29%	36%	54%	62%	50%
18%	13%	18%	23%	28%	42%	48%	39%

超過 100% 之值意謂過量熱可用於產生更多 Mg(OH)Cl 或 MgO。圖 24 說明對於 CaSiO<sub>3</sub>-Mg(OH)Cl 及 CaSiO<sub>3</sub>-MgO 方法之實例 10 至 13 而言，在不同 CO<sub>2</sub> 廢氣濃度、不同溫度、廢氣來源於煤抑或天然氣以及方法依賴於完全分解或部分分解下所捕獲 CO<sub>2</sub> 之百分比。

表 14：隨廢氣溫度及 CO<sub>2</sub>濃度而變之所捕獲 CO<sub>2</sub>之百分比。實例 14 至 17

方法	MgSiO <sub>3</sub> -Mg(OH)Cl				MgSiO <sub>3</sub> -MgO		MgSiO <sub>3</sub> -Mg(OH)Cl		MgSiO <sub>3</sub> -MgO	
	煤 320°C	煤 360°C	煤 400°C	煤 440°C	煤 550°C	煤 550°C	天然氣 600°C	天然氣 600°C	天然氣 600°C	天然氣 600°C
實例號	14	14	14	14	14	16	15	17		
CO <sub>2</sub> %										
7%	24%	34%	45%	55%	84%	86%	93%	96%		
10%	17%	25%	32%	40%	61%	62%	67%	69%		
14%	12%	18%	23%	28%	43%	44%	48%	49%		
18%	10%	14%	18%	22%	34%	34%	37%	38%		

圖 25 說明對於 MgSiO<sub>3</sub>-Mg(OH)Cl 及 MgSiO<sub>3</sub>-MgO 方法之實例 14 至 17 而言，在不同 CO<sub>2</sub> 廢氣濃度、不同溫度、廢氣來源於煤抑或天然氣以及方法依賴於完全分解或部分分解下所捕獲 CO<sub>2</sub> 之百分比。

表 15：隨廢氣溫度及 CO<sub>2</sub> 濃度而變之所捕獲 CO<sub>2</sub> 之百分比。實例 18 至 21

方法	透輝石-Mg(OH)Cl					Diop-MgO		Diop-Mg(OH)Cl	Diop-MgO
	煤	煤	煤	煤	煤	煤	煤	天然氣	天然氣
廢氣來源/溫度	320°C	360°C	400°C	440°C	550°C	550°C	550°C	600°C	600°C
實例號	18	18	18	18	18	20	19	21	
CO <sub>2</sub> %									
7%	28%	38%	48%	59%	88%	79%	101%	91%	
10%	20%	27%	35%	42%	63%	57%	73%	65%	
14%	14%	19%	25%	30%	45%	40%	52%	47%	
18%	11%	15%	19%	23%	35%	31%	41%	36%	

\* 注意，Diop 等同於透輝石

圖 26 說明對於透輝石-Mg(OH)Cl 及透輝石-MgO 方法之實例 18 至 21 而言，在不同 CO<sub>2</sub> 廢氣濃度、不同溫度、廢氣來源於煤抑或天然氣以及方法依賴於完全分解或部分分解下所捕獲 CO<sub>2</sub> 之百分比。

表 16a：說明實例 10 及 11 模擬之質量及能量

過程物流名稱→	1	2	CaCl <sub>2</sub>	CaCl <sub>2</sub> -Si	CaCO <sub>3</sub>	CaSiO <sub>3</sub>	廢氣	H <sub>2</sub> O	HCl	HCl蒸氣
PH										
溫度，°C	112.6	95	149.9	150	95	25	100	25	200	250
壓力，psia	14.696	15	100	14.696	14.7	14.696	15.78	14.7	14.696	14.696
蒸氣質量分率	0	0.793	0	0	0	0	1	0	1	1
固體質量分率	1	0.207	0	0.163	1	1	0	0	0	0
質量流量，公噸/年	5.73E+07	3.96E+07	4.36E+07	5.21E+07	1.41E+07	164E+07	6.21E+07	1.80E+07	3.57E+07	3.57E+07
體積流量，gal/min	11216.8	2.2E+07	17031.4	18643.542	2616.633	2126.004	3.11E+07	502184.16	3.30E+07	3.65E+07
焓，MW	-22099.5	-3288.21	-17541.7	-21585.353	-5368.73	-7309.817	-2926.806	-9056.765	-11331.898	-11240.08
密度，lb/cuft	160.371	0.059	80.305	87.619	169.173	241.725	0.063	1.125	0.034	0.031
H <sub>2</sub> O	0	1.80E+07	2.79E+07	2.79E+07	0	0	3.10E+06	1.80E+07	2.54E+07	2.54E+07
HCl	0	0	0.004	0.004	0	0	0	0	1.03E+07	1.03E+07
CO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	6.21E+06	0	0	0
O <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	6.21E+06	0	0	0
N <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	4.65E+07	0	0	0
CaCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	1.41E+07	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

過程物流名稱→	1	2	CaCl <sub>2</sub>	CaCl <sub>2</sub> -Si	CaCO <sub>3</sub>	CaSiO <sub>3</sub>	廢氣	H <sub>2</sub> O	HCl	HCl蒸氣
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	5.73E+07	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH)Cl	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	8.22E+06	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg <sup>2+</sup>	0	3.43E+06	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca <sup>2+</sup>	0	0	5.65E+06	5.65E+06	0	0	0	0	0	0
Cl <sup>-</sup>	0	1.00E+07	1.00E+07	1.00E+07	0	0	0	0	0	0
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OH <sup>-</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CaSiO <sub>3</sub>	0	0	0	0.007	0	1.64E+07	0	0	0	0
SiO <sub>2</sub>	0	0	0	8.47E+06	0	0	0	0	0	0

表 16b : 說明實例 10 及 11 模擬之質量及能量

過程物流名稱→	MgCl <sub>2</sub> -2W	MgCl <sub>2</sub> -6W	再循環1	RX2-出	SiO <sub>2</sub>	燃料	固體-1	固體-2
PH			9.453			9.453		
溫度, C	215	80	95	95	149.9	95	250	115
壓力, psia	14.696	14.696	14.7	14.7	100	14.7	14.696	14.696
蒸氣質量分率	0.502	0	0	1	0	0	0	0.165
固體質量分率	0.498	1	0	0	1	0.152	1	0.207
質量流量, 公噸/年	5.73E+07	5.73E+07	7.84E+07	5.27E+07	8.47E+06	9.26E+07	2.16E+07	3.96E+07
體積流量, gal/min	3.03E+07	11216.796	33789.492	282E+07	1607.826	32401.78	3828.933	6.33E+06
焓, MW	-1877.989	-22191.287	-32705.27	120.09	0	-38074.2	-7057.97	-4070.06
密度, lb/cuft	0.059	160.371	72.846	0.059	165.327	89.628	177.393	0.197
H <sub>2</sub> O	2.54E+07	0	5.16E+07	0	0	5.16E+07	0	1.80E+07
HCl	3.40E+06	0	0	0	0	0	0	0
CO <sub>2</sub>	0	0	0.074	25.781	0	0.074	0	0
O <sub>2</sub>	0	0	2510.379	6.20E+06	0	2510.379	0	0
N <sub>2</sub>	0	0	8109.244	4.65E+07	0	8109.245	0	0
CaCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	1.41E+07	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	2.14E+07	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	0	0	0

過程物流名稱→	MgCl <sub>2</sub> -2W	MgCl <sub>2</sub> -6W	再循環1	RX2-出	SiO <sub>2</sub>	藥料	固體-1	固體-2
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	5.73E+07	0	0	0	0	0	0
Mg(OH)Cl	7.15E+06	0	0	0	0	0	2.16E+07	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	8.22E+06
MgO	0	0	0	0	0	0	0	0
MgHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	0	0	3324.433	0	0	3324.433	0	0
SO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
NO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
NO	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg <sup>2+</sup>	0	0	6.85E+06	0	0	6.85E+06	0	3.43E+06
Ca <sup>2+</sup>	0	0	1644.031	0	0	1644.031	0	0
Cl <sup>-</sup>	0	0	2.00E+07	0	0	2.00E+07	0	1.00E+07
CO <sub>3</sub>	0	0	61.424	0	0	61.424	0	0
HCO <sub>3</sub>	0	0	27.297	0	0	27.297	0	0
OH <sup>-</sup>	0	0	690.278	0	0	690.278	0	0
CaSiO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0.007	0	0	0
SiO <sub>2</sub>	0	0	0	0	8.47E+06	0	0	0

表 17a：說明實例 12 及 13 模擬之質量及能量

過程物流名稱→	1	2	CaCl <sub>2</sub>	CaCl <sub>2</sub> -Si	CaCO <sub>3</sub>	CaSiO <sub>3</sub>	廢氣	H <sub>2</sub> O	HCl	HCl 蒸氣
PH										
溫度, °C	271	255.5	149.8	150	95	25	100	25	200	450
壓力, psia	14.696	15	100	14.696	14.7	14.696	15.78	14.7	14.696	14.696
蒸氣質量分率	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
固體質量分率	1	1	0	0.215	1	1	0	0	0	0
質量流量, 公噸/年	2.87E+07	2.37E+07	3.09E+07	3.94E+07	1.41E+07	1.64E+07	6.21E+07	1.80E+07	2.30E+07	2.30E+07
體積流量, gal/min	5608.398	10220.835	10147.12	11758.176	2616.827	2126.004	3.11E+07	502184.16	1.93E+07	2.94E+07
焓, MW	-10826.6	-11660.74	-11347.9	-15391.633	-5369.12	-7309.817	-2926.806	-9056.765	-6056.076	-5786.994
密度, lb/cuft	160.371	72.704	95.515	105.035	169.173	241.725	0.063	1.125	0.037	0.024
H <sub>2</sub> O	0	1.55E+07	1.52E+07	1.52E+07	0	0	3.10E+06	1.80E+07	1.27E+07	1.27E+07
HCl	0	0	0.015	0.015	0	0	0	0	1.03E+07	1.03E+07
CO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	6.21E+06	0	0	0
O <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	6.21E+06	0	0	0
N <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	4.65E+07	0	0	0
CaCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	1.41E+07	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

過程物流名稱→	1	2	CaCl <sub>2</sub>	CaCl <sub>2</sub> -Si	CaCO <sub>3</sub>	CaSiO <sub>3</sub>	廢氣	H <sub>2</sub> O	HCl	HCl蒸氣
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	2.87E+07	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH)Cl	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	8.22E+06	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg <sup>2+</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca <sup>2+</sup>	0	0	5.65E+06	5.65E+06	0	0	0	0	0	0
Cl <sup>-</sup>	0	0	1.00E+07	1.00E+07	0	0	0	0	0	0
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OH <sup>-</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CaSiO <sub>3</sub>	0	0	0	0.023	1.64E+07	0	0	0	0	0
SiO <sub>2</sub>	0	0	0	8.47E+06	0	0	0	0	0	0

表 17b：說明實例 12 及 13 模擬之質量及能量

過程物流名稱→	MgCl <sub>2</sub> -2W	MgCl <sub>2</sub> -6W	再循環1	RX2-出	SiO <sub>2</sub>	燃料	固體-1	固體-2
PH			9.304			9.304		
溫度， °C	215	80	95	95	149.8	95	450	115
壓力， psia	14.696	14.696	14.7	14.7	100	14.7	14.696	14.696
蒸氣質量分率	0.502	0	0	1	0	0	0	0
固體質量分率	0.498	1	0	0	1	0.221	1	1
質量流量，公噸/年	2.87E+07	2.87E+07	4.98E+07	5.27E+07	8.47E+06	6.39E+07	5.68E+06	2.37E+07
體積流量， gal/min	1.51E+07	5608.398	25330.305	2.82E+07	1607.826	22988.79	797.11	10220.84
焓， MW	-9388.949	-11095.644	-21589.89	120.08	0	-26959.3	-2603.98	-11955.9
密度， lb/cuft	0.059	160.371	61.662	0.059	165.327	87.199	223.695	72.704
H <sub>2</sub> O	127E+07	0	3.63E+07	0	0	3.63E+07	0	1.55E+07
HCl	1.70E+07	0	0	0	0	0	0	0
CO <sub>2</sub>	0	0	0.145	79.255	0	0.145	0	0
O <sub>2</sub>	0	0	1919.222	6.20E+06	0	1919.222	0	0
N <sub>2</sub>	0	0	6199.3	4.65E+07	0	6199.301	0	0
CaCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	1.41E+07	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	1.07E+07	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	0	0	0

過程物流名稱→	MgCl <sub>2</sub> -2W	MgCl <sub>2</sub> -6W	再循環1	RX2-出	SiO <sub>2</sub>	漿料	固體-1	固體-2
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	2.87E+07	0	0	0	0	0	0
Mg(OH)Cl	3.58E+06	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	8.22E+06
MgO	0	0	0	0	0	0	5.68E+06	0
MgHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	0	0	2208.676	0	0	2208.676	0	0
SO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
NO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0
NO	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg <sup>2+</sup>	0	0	3.43E+06	0	0	3.43E+06	0	0
Ca <sup>2+</sup>	0	0	1225.309	0	0	1225.309	0	0
Cl <sup>-</sup>	0	0	1.00E+07	0	0	1.00E+07	0	0
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0	0	110.963	0	0	110.963	0	0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0	0	63.12	0	0	63.12	0	0
OH <sup>-</sup>	0	0	519.231	0	0	519.231	0	0
CaSiO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0.023	0	0	0
SiO <sub>2</sub>	0	0	0	0	8.47E+06	0	0	0

表 18a：說明實例 14 及 15 模擬之質量及能量

過程物流名稱→	廢氣	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	HCl 蒸氣	MgCl <sub>2</sub> --2	MgCl <sub>2</sub> -2w	MgCl <sub>2</sub> -Si
PH							
溫度, °C	100	25	26	250	200.7	200	200
壓力, psia	15.78	1	14.696	14.696	15	14.696	14.696
蒸氣質量分率	1	0	0.798	1	0.238	0	0.169
固體質量分率	0	0	0.186	0	0	1	0.289
質量流量, 公噸/年	1.37E+08	1.00E+07	1.58E+08	1.69E+07	2.31E+07	4.08E+07	3.26E+07
體積流量, gal/min	62.21E+07	4569.619	4.91E+07	1.22E+07	5.22E+06	3828.933	5.33E+06
焓, MW	-5853.92	-4563.814	-13984.7	-2861.732	0	-11194.13	-10932.15
密度, lb/cuft	0.063	62.249	0.091	0.04	0.126	303.28	0.174
H <sub>2</sub> O	6.85E+06	1.00E+07	5.19E+06	5.60E+06	8.37E+06	0	8.37E+06
HCl	0	0	0	1.13E+07	126399.9	0	126399.87
CO <sub>2</sub>	1.37E+07	0	6.85E+06	0	0	0	0
O <sub>2</sub>	1.37E+07	0	1.37E+07	0	0	0	0
N <sub>2</sub>	1.03E+08	0	1.03E+08	0	0	0	0
MgCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	4.08E+07	0

過程物流名稱→	廢氣	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	HCl蒸氣	MgCl <sub>2</sub> --2	MgCl <sub>2</sub> -2w	MgCl <sub>2</sub> -Si
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	0	1.09E+07	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	0	1.83E+07	0	0	0	0
Mg(OH)Cl	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0
MgHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	0	0	0.001	0	0	0	0
SO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0
NO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0
NO	0	0	0	0	0	0	0
Mg <sup>2+</sup>	0	0	0	0	3.74E+06	0	3.74E+06
Cl <sup>-</sup>	0	0	0	0	1.09E+07	0	1.09E+07
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0	0	0	0	0	0	0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0	0	0	0	0	0	0
OH <sup>-</sup>	0	0	0	0	0	0	0
SiO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	9.24E+06
MgSiO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	174011.19

表 18b：說明實例 14 及 15 模擬之質量及能量

過程物流名稱→	MgCO <sub>3</sub>	MgSiO <sub>3</sub>	RX2-出	SiO <sub>2</sub>	燃料	固體-1	固體-2
PH					0.0864		6.24
溫度，°C	26	25		200.7	60	250	95
壓力，psia	14.696	14.696		15	44.088	14.696	44.088
蒸氣質量分率	0	0		0	0	0	0
固體質量分率	1	1		1	0.248	1	0.268
質量流量，公噸/年	1.31E+07	1.56E+07	0	9.41E+06	1.71E+08	2.39E+07	3.39E+07
體積流量，gal/min	1985.546	2126.004		1613.601	178707.499	3828.933	8016.874
焓，MW	0	-6925.208	0	0	-18961.843	-7057.974	-12123.17
密度，lb/cuft	187.864	208.902		165.967	27.184	177.393	120.206
H <sub>2</sub> O	0	0		0	5.19E+06	0	1.00E+07
HCl	0	0		0	0	0	0
CO <sub>2</sub>	0	0		0	6.85E+06	0	0
O <sub>2</sub>	0	0		0	1.37E+07	0	0
N <sub>2</sub>	0	0		0	1.03E+08	0	0
MgCO <sub>3</sub>	1.31E+07	0		0	1.31E+07	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0		0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0		0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0		0	0	0	0

過程物流名稱→	MgCO <sub>3</sub>	MgSiO <sub>3</sub>	RX2-出	SiO <sub>2</sub>	染料	固體-1	固體-2
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	0		0	1.09E+07	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	0		0	1.83E+07	0	0
Mg(OH)Cl	0	0		0	0	2.39E+07	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0		0	0	0	9.07E+06
MgO	0	0		0	0	0	0
MgHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	0	0		0	0.001	0	0
SO <sub>2</sub>	0	0		0	0	0	0
NO <sub>2</sub>	0	0		0	0	0	0
NO	0	0		0	0	0	0
Mg <sup>2+</sup>	0	0		0	0	0	3.78E+06
Cl <sup>-</sup>	0	0		0	0	0	1.10E+07
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0	0		0	0	0	0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0	0		0	0	0	0
OH <sup>-</sup>	0	0		0	0	0	0.029
SiO <sub>2</sub>	0	0		9.24E+06	0	0	0
MgSiO <sub>3</sub>	0	1.56E+07		174011.19	0	0	0

表 19a：說明實例 16 及 17 模擬之質量及能量

過程物流名稱→	廢氣	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	HCl 蒸氣	MgCl <sub>2</sub> --2	MgCl <sub>2</sub> -2w	MgCl <sub>2</sub> -Si
PH			6.583				
溫度, °C	100	25	59.6	450	200	200	200
壓力, psia	15.78	1	14.696	14.696	15	14.696	14.696
蒸氣質量分率	1	0	0.004	1	0	0	0
固體質量分率	0	0	0	0	1	1	1
質量流量, 公噸/年	1.37E+08	1.00E+07	1.70E+07	1.41E+07	2.04E+07	2.04E+07	2.98E+07
體積流量, gal/min	6.21E+07	4569.619	40446.86	1.26E+07	1914.466	1914.466	3522.292
焓, MW	-5853.92	-4563.814	-7633.28	-1728.6	0	-5597.066	-9628.072
密度, lb/cuft	0.063	62.249	11.94	0.032	303.28	303.28	240.308
H <sub>2</sub> O	685.E+06	1.00E+07	1.68E+07	2.80E+06	0	0	0
HCl	0	0	0	1.13E+07	0	0	0
CO <sub>2</sub>	1.37E+07	0	56280.04	0	0	0	0
O <sub>2</sub>	1.37E+07	0	18848.97	0	0	0	0
N <sub>2</sub>	1.03E+08	0	56346.51	0	0	0	0
MgCO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	2.04E+07	2.04E+07	2.04E+07

過程物流名稱→	廢氣	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	HCl蒸氣	MgCl <sub>2</sub> --2	MgCl <sub>2</sub> -2w	MgCl <sub>2</sub> -Si
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH)Cl	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0
MgHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	0	0	77.467	0	0	0	0
SO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0
NO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0
NO	0	0	0	0	0	0	0
Mg <sup>2+</sup>	0	0	744.857	0	0	0	0
Cl <sup>-</sup>	0	0	0	0	0	0	0
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0	0	1.19	0	0	0	0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0	0	3259.779	0	0	0	0
OH <sup>-</sup>	0	0	0.109	0	0	0	0
SiO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	9.34E+06
MgSiO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0

表 19b：說明實例 16 及 17 模擬之質量及能量

過程物流名稱→	MgCO <sub>3</sub>	MgSiO <sub>3</sub>	RX2-出	SiO <sub>2</sub>	漿料	固體-1	固體-2
PH					6.583		8.537
溫度，°C	59.6	25	60	200	60	450	95
壓力，psia	14.696	14.696	44.088	15	44.088	14.696	44.088
蒸氣質量分率	0	0	1	0	0	0	0
固體質量分率	1	1	0	1	0.436	1	0.558
質量流量，公噸/年	1.31E+07	1.56E+07	1.23E+08	9.34E+06	3.01E+07	6.27E+06	1.63E+07
體積流量，gal/min	1983.661	2126.004	1.76E+07	1607.826	9945.342	797.11	5155.55
烔，MW	0	-6925.208	-1613.054	0	-12593.788	-2603.979	-7331.893
密度，lb/cuft	187.864	208.902	0.199	165.327	86.031	223.695	89.76
H <sub>2</sub> O	0	0	0	0	1.68E+07	0	7.20E+06
HCl	0	0	0	0	0	0	0
CO <sub>2</sub>	0	0	6.78E+06	0	56280.036	0	0
O <sub>2</sub>	0	0	1.37E+07	0	18848.966	0	0
N <sub>2</sub>	0	0	1.03E+08	0	56346.51	0	0
MgCO <sub>3</sub>	1.31E+07	0	0	0	1.31E+07	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	0	0

過程物流名稱→	MgCO <sub>3</sub>	MgSiO <sub>3</sub>	RX2-出	SiO <sub>2</sub>	漿料	固體-1	固體-2
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH)Cl	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	9.07E+06
MgO	0	0	0	0	0	6.27E+06	0
MgHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	0	0	343.415	0	77.467	0	0
SO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0
NO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0
NO	0	0	0	0	0	0	0
Mg <sup>2+</sup>	0	0	2722.849	0	744.857	0	14.282
Cl <sup>-</sup>	0	0	0	0	0	0	0
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0	0	4.344	0	1.19	0	0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0	0	14439.982	0	3259.779	0	0
OH <sup>-</sup>	0	0	0.481	0	0.109	0	19.989
SiO <sub>2</sub>	0	0	0	9.34E+06	0	0	0
MgSiO <sub>3</sub>	0	1.56E+07	0	0	0	0	0

表 20a：說明實例 18 及 19 模擬之質量及能量

過程物流名稱→	5	CaCl <sub>2</sub> -2W	廢氣	H <sub>2</sub> O	HCl	HCl-出	HCl蒸氣2	HCl蒸氣	HCl-出2	熔體1	熔體2	熔體3
PH												
溫度, °C	200	160	100	25	250	100	349.1	349.1	160	160	160	100
壓力, psia	14.696	14.696	15.78	1	14.696	14.696	14.696	14.696	14.696	14.696	14.696	14.696
蒸氣質量分率	0.378	0.473	1	0	1	1	1	1	1	0.311	0	0
固體質量分率	0.622	0	0	0	0	0	0	0	0	0.342	1	0.291
質量流量, 公噸/年	6.32E+07	2.40E+07	1.37E+08	1.00E+07	3.94E+07	0.001	1.97E+07	1.97E+07	26.688	3.65E+07	1.25E+07	3.22E+07
體積流量, gal/min	2.29E+07	1.02E+07	6.21E+07	4569.619	3.64E+07	0.001	1.82E+07	1.82E+07	11.834	1.02E+07	1866.916	9636.543
焓, MW	-19530.7	-8042.026	-5853.92	-4563.814	-11241.7	0	-5620.856	-5620.856	-0.002	-13498.19	-5456.154	-12759.563
密度, lb/cuft	0.079	0.067	0.063	62.249	0.031	0.075	0.031	0.031	0.064	0.102	190.163	94.933
H <sub>2</sub> O	2.29E+07	1.54E+07	6.85E+06	1.00E+07	2.08E+07	0	1.40E+07	1.40E+07	0	1.54E+07	0	1.54E+07
HCl	983310.7	0	0	0	1.13E+07	0.001	5.67E+06	5.67E+06	26.688	26.688	0	0.001
CO <sub>2</sub>	0	0	1.37E+07	0	0	0	0	0	0	0	0	0

過程物流名稱→	5	CaCl <sub>2</sub> -2W	廢氣	H <sub>2</sub> O	HCl	HCl-出	HCl蒸氣2	HCl蒸氣	HCl-出2	熔體1	熔體2	熔體3
O <sub>2</sub>	0	0	1.37E+0 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N <sub>2</sub>	0	0	1.03E+0 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	3.73E+ 07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



表 20b : 說明實例 18 及 19 模擬之質量及能量

過程物流名稱→	MgCaSiO <sub>3</sub>	MgCl <sub>2</sub> --H	MgCl <sub>2</sub> -H	再循環	再循環-	SiO <sub>2</sub>	漿料	固體	固體-1	固體-2	出
PH							5.163			6.252	
溫度, °C	25	100	100	95	95	100	95	95	250	95	95
壓力, psia	14.696	14.696	14.696	14.696	14.696	14.696	14.696	14.696	14.696	14.696	14.696
蒸氣質量分率	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
固體質量分率	1	0	1	0.828	1	1	0.317	1	1	0.268	0
質量流量, 公噸/年	168E+07	2.28E+07	4.74E+07	5.73E+07	1.58E+07	9.34E+06	1.95E+08	1.43E+07	2.39E+07	3.39E+07	1.23E+08
體積流量, gal/min	1063.002	8028.716	8412.597	13075.55	2804.199	1607.827	185622	2276.765	3828.933	8017.333	5.85E+07
焓, MW	-7167.458	0	-16601.2	-21023.6	-5537.26	0	-27714.4	0	-7057.97	-12113.4	-1510.76
密度, lb/cuft	450.627	80.836	160.371	124.605	160.371	165.327	29.855	178.921	177.393	120.2	0.06
H <sub>2</sub> O	0	1.54E+07	0	9.84E+07	0	0	9.84E+06	0	0	1.00E+07	0
HCl	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	6.85E+06	0	0	0	6.85E+06
O <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	1.37E+07	0	0	0	1.37E+07
N <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	1.03E+08	0	0	0	1.03E+08
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

過程物流名稱→	MgCaSiO <sub>3</sub>	MgCl <sub>2</sub> --H	MgCl <sub>2</sub> -H	再循環	再循環-	SiO <sub>2</sub>	漿料	固體	固體-1	固體-2	出
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	0	4.74E+07	4.74E+07	1.58E+07	0	4.74E+07	0	0	0	0
Mg(OH)Cl	0	0	0	0	0	0	0	0	2.39E+07	0	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	12011.06	0	0	12011.06	0	0	9.07E+06	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	0	0	0	11.135	0	0	11.135	0	0	0	0
SO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg <sup>2+</sup>	0	1.89E+06	0	0	0	0	0	0	0	3.78E+06	0
Ca <sup>2+</sup>	0	4128.267	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl <sup>-</sup>	0	5.51E+06	0	4.627	0	0	4.627	0	0	1.10E+07	0
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OH <sup>-</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0
CaSiO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SiO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	9.34E+06	0	0	0	0	0
MgSiO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	36.743	0	0	0	0	0
透輝石	1.68E+07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
白雲石	0	0	0	0	0	0	1.43E+07	1.43E+07	0	0	0

表 21a：說明實例 20 及 21 模擬之質量及能量

過程物流名稱→	5	CaCl <sub>2</sub> -2W	廢氣	H <sub>2</sub> O	HCl	HCl-出	HCl蒸氣2	HCl蒸氣	HCl-出2	熔體1	熔體2	熔體3
PH												
溫度, °C	200	160	100	25	450	100	449.5	449.5	160	160	160	100
壓力, psia	14.696	14.696	15.78	1	14.696	14.696	14.696	14.696	14.696	14.696	14.696	14.696
蒸氣質量分率	0.378	0.256	1	0	1	1	1	1	1	0.148	0	0
固體質量分率	0.622	0	0	0	0	0	0	0	0	0.423	1	0.371
質量流量, 公噸/年	3.16E+07	1.70E+07	1.37E+08	1.00E+07	2.54E+07	0.006	1.27E+07	1.27E+07	10.275	2.95E+07	1.25E+07	2.52E+07
體積流量, gal/min	1.14E+07	3.91E+06	6.21E+07	4569.619	2.94E+07	0.002	1.47E+07	1.47E+07	4.556	3.91E+06	1866.915	6342.437
焓, MW	-9765.36	-5388.055	-5853.92	-	-5787.5	0	-2893.751	-	-0.0001	-10844.21	-5456.149	-9602.42
密度, lb/cuft	0.079	0.124	0.063	62.249	0.025	0.075	0.025	0.025	0.064	0.215	190.163	112.823
H <sub>2</sub> O	1.15E+07	8.41E+06	6.85E+06	1.00E+07	1.40E+07	0	7.00E+06	7.00E+06	0	8.41E+06	0	8.41E+06
HCl	491655.4	0	0	0	1.13E+07	0.006	5.67E+06	5.67E+06	10.275	10.275	0	0.006
CO <sub>2</sub>	0	0	1.37E+07	0	0	0	0	0	0	0	0	0
O <sub>2</sub>	0	0	1.37E+07	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N <sub>2</sub>	0	0	1.03E+08	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	1.86E+07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

過程物流名稱→	5	CaCl <sub>2</sub> -2W	廢氣	H <sub>2</sub> O	HCl	HCl-出	HCl蒸氣2	HCl蒸氣	HCl-出2	熔體1	熔體2	熔體3
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH)Cl	1.04E+06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg <sup>2+</sup>	0	2494.624	0	0	0	0	0	0	0	2494.624	0	1.89E+06
Ca <sup>2+</sup>	0	3.11E+06	0	0	0	0	0	0	0	3.11E+06	0	4119.258
Cl <sup>-</sup>	0	5.51E+06	0	0	0	0	0	0	0	5.51E+06	0	5.51E+06
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
OH <sup>-</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CaSiO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11939.547	11939.547	0
SiO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.67E+06	4.67E+06	9.34E+06
MgSiO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7.80E+06	7.80E+06	14.153
透輝石	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
白雲石	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 21b：說明實例 20 及 21 模擬之質量及能量

過程物流名稱→	MgCaSiO <sub>3</sub>	MgCl <sub>2</sub> -H	MgCl <sub>2</sub> -H	MgCl <sub>2</sub> -H	再循環	再循環-	SiO <sub>2</sub>	漿料	固體	固體-1	固體-2	出
PH					-0.879			5.271			8.545	
溫度, °C	25	100	100	100	95	95	100	95	95	450	95	95
壓力, psia	14.696	14.696	14.696	14.696	14.696	14.696	14.696	14.696	14.696	14.696	14.696	14.696
蒸氣質量分率	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
固體質量分率	1	0	0	1	0	0.484	1	1	0.177	1	1	0.558
質量流量, 公噸/年	1.68E+07	1.58E+07	1.58E+07	1.58E+07	3.27E+07	1.58E+07	9.34E+06	1.70E+08	1.43E+07	6.27E+06	1.63E+07	1.23E+08
體積流量, gal/min	1063.002	4734.61	2804.199	2804.199	10786.59	2804.199	1607.826	183332.5	2276.772	797.11	5155.892	5.85E+07
焓, MW	-7167.458	0	-5533.74	-5533.74	-13087	-5537.26	0	-19788.2	0	-2603.98	-7331.92	-1510.64
密度, lb/cuft	450.627	94.994	160.371	160.371	86.167	160.371	165.327	26.409	178.921	223.695	89.754	0.06
H <sub>2</sub> O	0	8.41E+06	0	1.68E+07	0	0	0	1.68E+07	0	0	7.20E+06	0
HCl	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	6.85E+06	0	0	0	6.85E+06
O <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	1.37E+07	0	0	0	1.37E+07
N <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	1.03E+08	0	0	0	1.03E+08
MgCl <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *2W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgCl <sub>2</sub> *4W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

過程物流名稱→	MgCaSiO <sub>3</sub>	MgCl <sub>2</sub> --H	MgCl <sub>2</sub> -H	再循環	再循環-	SiO <sub>2</sub>	漿料	固體	固體-1	固體-2	出
MgCl <sub>2</sub> *6W	0	0	1.58E+07	1.58E+07	1.58E+07	0	1.58E+07	0	0	0	0
Mg(OH)Cl	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg(OH) <sub>2</sub>	0	0	0	11678.01	0	0	11678.01	0	0	9.07E+06	0
MgO	0	0	0	0	0	0	0	0	6.27E+06	0	0
MgHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>	0	0	0	908.901	0	0	908.901	0	0	0	0
SO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg <sup>2+</sup>	0	1.89E+06	0	0	0	0	0	0	0	14.555	0
Ca <sup>2+</sup>	0	4119.258	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cl <sup>-</sup>	0	5.51E+06	0	377.667	0	0	377.667	0	0	0	0
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0	0	0	0.006	0	0	0.006	0	0	0	0
OH <sup>-</sup>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CaSiO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SiO <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	9.34E+06	0	0	0	0	0
MgSiO <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	14.153	0	0	0	0	0
透輝石	1.68E+07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
白雲石	0	0	0	0	0	0	1.43E+07	1.43E+07	0	0	0

## 實例 22：其他鹽之分解

已在實驗室中量測其他鹽之熱分解。一些測試結果之概述展示於下表中。

表 22：其他鹽之分解

鹽	溫度，°C	時間 (分鐘)	結果
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	400	30	63%分解。反應為Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> →MgO+2NO <sub>2</sub> +½ O <sub>2</sub>
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	400	45	64%分解。
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	400	90	100%分解。
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	400	135	100%分解。
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	400	30	<25%分解。反應為Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> →CaO+2NO <sub>2</sub> +½ O <sub>2</sub>
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	600	50	61%分解。
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	600	隔夜	100%分解。
LiCl	450	120	約0%分解。

## 實例 22：兩腔室、三腔室及四腔室分解模型

下表為對應於圖 31-34 之四種組態之比較。描述腔室之數目及說明、消耗熱(MW(百萬瓦))、來自特定來源之熱之百分比及因來自過程中其他反應(亦即鹽酸與礦物質矽酸鹽之反應及鹽酸冷凝)之可用熱而引起的所需外部熱(千瓦時/公噸CO<sub>2</sub>)之降低。在圖 34 之實例中，來自開放式循環天然氣工廠之熱廢氣亦合格。

表 23：兩腔室、三腔室及四腔室分解結果

實例	腔室數目	腔室說明				分解
		預熱冷廢氣	自蒸汽預熱	預熱礦物質溶解反應器		
				矽酸鹽反應	HCl熱回收	
<b>圖31冷廢氣預熱</b>	3					
熱之百萬瓦數		83.9	未使用	286	563	86.8
總熱之百分比		8.2%	未使用	28.0%	55.2%	8.5%
千瓦時/公噸之降低		-506.7	未使用	-1727.4	-3400.5	不降低
<b>圖32冷廢氣及蒸汽預熱</b>	4					
熱之百萬瓦數		83.9	8.7	286	563	82.2
總熱之百分比		8.2%	0.8%	27.9%	55.0%	8.0%
千瓦時/公噸之降低		-506.7	-52.5	-1727.4	-3400.5	不降低
<b>圖33僅天然氣</b>	2					
熱之百萬瓦數		未使用	未使用	279	586	129.3
總熱之百分比		未使用	未使用	28%	59%	13%
千瓦時/公噸之降低		未使用	未使用	-1685.1	-3539.4	不降低
<b>圖34僅熱廢氣</b>	2					
熱之百萬瓦數		未使用	未使用	243	512	112.9
總熱之百分比		未使用	未使用	28%	59%	13%
千瓦時/公噸之降低		未使用	未使用	-1467.7	-3092.4	-681.9

本文揭示及主張之所有方法皆可根據本發明在不進行不當實驗之情況下獲得及執行。儘管本發明之組合物及方法已關於特定實施例加以描述，但熟習此項技術者將顯而易知，可在不脫離本發明概念、精神及範疇之情況下將變化形式應用於方法及本文所述方法之步驟或步驟順序中。為熟習此項技術者顯而易知之所有此等類似替代物及修改皆視為處於如隨附申請專利範圍所定義之本發明精神、範疇及概念內。

#### 參考文獻

提供補充本文所闡述細節之例示性程序或其他細節的以下參考文獻以引用的方式明確併入本文中。

美國臨時申請案 60/612,355

美國臨時申請案 60/642,698

美國臨時申請案 60/718,906

美國臨時申請案 60/973,948

美國臨時申請案 61/032,802

美國臨時申請案 61/033,298

美國臨時申請案 61/288,242

美國臨時申請案 61/362,607

美國專利申請案 11/233,509

美國專利申請案 12/235,482

美國專利公開案 2006/0185985

美國專利公開案 2009/0127127

美國專利 7,727,374

PCT申請案 PCT/US08/77122

Goldberg 等人，*roceedings of First National Conference on Carbon Sequestration*, 2001 年 5 月 14 日 -17 日，ashington, DC., 章節 6c, United States Department of Energy, National Energy Technology Laboratory；可獲自：  
[http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/01/carbon\\_seq/6c1.pdf](http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/01/carbon_seq/6c1.pdf)。

*Proceedings of First National Conference on Carbon Sequestration*, 2001 年 5 月 14 日 -17 日，ashington, DC. United States Department of Energy, National Energy Technology Laboratory. CD-ROM USDOE/NETL-2001/1144；亦可獲自：  
[http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/01/carbon\\_seq/carbon\\_seq01.html](http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/01/carbon_seq/carbon_seq01.html)。

### 【圖式簡單說明】

圖 1 為根據本發明之一些實施例，用於以第 2 族碳酸鹽形式捕捉 CO<sub>2</sub> 之基於第 2 族氫氧化物之方法之系統的方塊圖。

圖 2 為根據本發明之一些實施例，其中 Mg<sup>2+</sup> 充當以碳酸鈣形式捕捉 CO<sub>2</sub> 之催化劑之系統的方塊圖。

圖 3 為根據本文提供之方法之一些實施例的簡化方法流程圖。展示基於第 II 族氫氧化物之方法，其以石灰石(主要由礦物質方解石 CaCO<sub>3</sub> 構成)形式捕捉 CO<sub>2</sub>。此圖中之術語「道路用鹽」係指第 II 族氯化物，諸如 CaCl<sub>2</sub> 及 / 或 MgCl<sub>2</sub>，其中任一者或兩者視情況經水合。在包含 MgCl<sub>2</sub> 之實施例

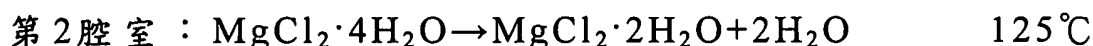
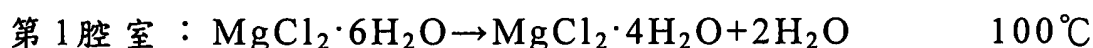
中，可使用熱來驅動道路用鹽與水(包括水合水)之間的反應以形成HCl及氫氧化鎂 $Mg(OH)_2$ ，及/或羥基氯化鎂 $Mg(OH)Cl$ 。在包含 $CaCl_2$ 之實施例中，可使用熱來驅動道路用鹽與水之間的反應以形成氫氧化鈣及HCl。HCl與例如鏈狀矽酸鈣岩石(視情況經研磨)反應以形成額外道路用鹽(例如 $CaCl_2$ )及砂( $SiO_2$ )。

圖4為對應於本發明之一些實施例之簡化方法流程圖。在本發明之一些實施例中，可使用矽酸鹽岩石以 $CaCO_3$ 形式捕捉 $CO_2$ 。此圖中之術語「道路用鹽」係指第II族氯化物，諸如 $CaCl_2$ 及/或 $MgCl_2$ ，其中任一者或兩者視情況經水合。在道路用鹽鍋爐中，可使用熱來驅動道路用鹽(例如 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ )與水(包括水合水)之間的反應以形成HCl及第二族氫氧化物、氧化物及/或混合氫氧化物-氯化物，包括例如氫氧化鎂 $Mg(OH)_2$ 及/或羥基氯化鎂 $Mg(OH)Cl$ 。在包含 $CaCl_2$ 之實施例中，可使用熱來驅動道路用鹽與水之間的反應以形成氫氧化鈣及HCl。HCl可出售或與矽酸鹽岩石(例如鏈狀矽酸鹽)反應以形成額外道路用鹽(例如 $CaCl_2$ )及砂( $SiO_2$ )。在一些此等實施例中，可使用 $Mg^{2+}$ 與 $Ca^{2+}$ 之間的離子交換反應以允許例如 $Mg^{2+}$ 離子循環。

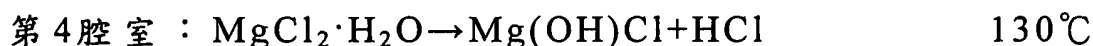
圖5為展示使用Aspen Plus過程軟體進行之過程模擬之參數及結果的方法流程圖。在此實施例中，加熱35% $MgCl_2$ 、65% $H_2O$ 溶液至 $536^\circ F(280^\circ C)$ ，接著物流以包含 $MgCl_2$ 溶液及固體 $Mg(OH)_2$ 之標示為「 $H_2O-MgOH$ 」之物流形式離開。通常，當 $Mg(OH)Cl$ 溶解於水中時，其形成

Mg(OH)<sub>2</sub>(固體)及MgCl<sub>2</sub>(溶解)。此處，MgCl<sub>2</sub>不用於直接吸收CO<sub>2</sub>，而實際上經再循環。淨反應為使用便宜原料CaCl<sub>2</sub>及水自廢氣中捕獲CO<sub>2</sub>以形成CaCO<sub>3</sub>。模擬之結果表明，使MgCl<sub>2</sub>流再循環，接著使其與H<sub>2</sub>O及熱反應以形成Mg(OH)<sub>2</sub>為高效的。一或多種以上提及之化合物接著與CaCl<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O溶液及來自廢氣之CO<sub>2</sub>反應以最終形成CaCO<sub>3</sub>，將CaCO<sub>3</sub>自物流中濾出。由此形成之MgCl<sub>2</sub>再循環至第一反應器中以重複過程。

圖6為展示使用Aspen Plus過程軟體進行之過程模擬之參數及結果的方法流程圖。淨反應為使用便宜原料CaCl<sub>2</sub>及水自廢氣中捕獲CO<sub>2</sub>以形成CaCO<sub>3</sub>。在此實施例中，六水合物在3個各別腔室中脫水且在第4腔室中分解，在第4腔室中由分解形成之HCl再循環回第3腔室中以防止任何副反應。此等腔室中發生之反應包括以下：



(存在HCl蒸氣)



HCl再循環至第3腔室中。

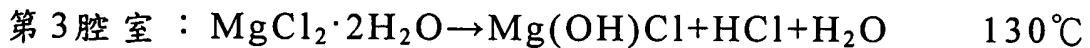
腔室	反應	模型溫度	較佳溫度範圍	註解
第1腔室	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{O}$	100°C	90°C-120°C	
第2腔室	$\text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MgCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{O}$	125°C	160°C-185°C	
第3腔室	$\text{MgCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$	160°C	190°C-230°C	*
第4腔室	$\text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg(OH)Cl} + \text{HCl}$	130°C	230°C-260°C	**

\*存在 HCl 蒸氣

\*\*HCl 蒸氣再循環至第 3 腔室中

以上前 3 個反應可表徵為脫水，而第 4 個反應可表徵為分解。在實例 2 中更詳細說明之此模擬之結果指示在較低溫度 (130-250°C) 下， $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  之分解會形成  $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$  而非  $\text{MgO}$ 。  $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$  接著與  $\text{H}_2\text{O}$  反應以形成  $\text{MgCl}_2$  及  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ，其接著與飽和  $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$  溶液及來自廢氣之  $\text{CO}_2$  反應以形成  $\text{CaCO}_3$ ，將  $\text{CaCO}_3$  自物流中濾出。由此形成之  $\text{MgCl}_2$  再循環至第一反應器中以再次開始過程。

圖 7 為展示使用 Aspen Plus 過程軟體進行之過程模擬之參數及結果的方法流程圖。淨反應為使用便宜原料  $\text{CaCl}_2$  及水自廢氣中捕獲  $\text{CO}_2$  以形成  $\text{CaCO}_3$ 。在此實施例中，六水合鎂在 2 個各別腔室中脫水且在第 3 腔室中分解。脫水反應與分解反應均在第 3 腔室中發生。不存在再循環之 HCl。此等腔室中發生之反應包括以下：

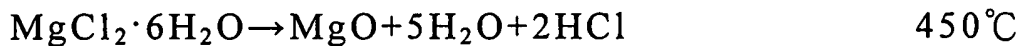


腔室	反應	模型溫度	較佳溫度範圍	註解
第 1 腔室	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{O}$	100°C	90°C-120°C	
第 2 腔室	$\text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MgCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{O}$	125°C	160°C-185°C	
第 3 腔室	$\text{MgCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg}(\text{OH})\text{Cl} + \text{HCl} + \text{H}_2\text{O}$	130°C	190°C-230°C	*
	$\text{MgCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$			

\*無再循環之 HCl

以上第1反應、第2反應及第4反應可表徵為脫水，而第3反應可表徵為分解。如同圖6之實施例，此實施例中所用之溫度使得自  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  形成  $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$  而非  $\text{MgO}$ 。 $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$  接著與  $\text{H}_2\text{O}$  反應以形成  $\text{MgCl}_2$  及  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ，其與飽和  $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$  溶液及來自廢氣之  $\text{CO}_2$  反應以形成  $\text{CaCO}_3$ ，將  $\text{CaCO}_3$  自物流中濾出。由此形成之  $\text{MgCl}_2$  再循環至第一反應器中以再次開始過程。關於此模擬之更多細節提供於以上實例3中。

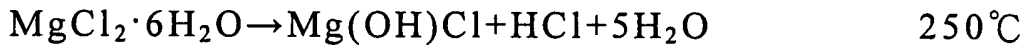
圖8為展示使用 Aspen Plus過程軟體進行之過程模擬之參數及結果的方法流程圖。淨反應為使用便宜原料  $\text{CaCl}_2$  及水自廢氣中捕獲  $\text{CO}_2$  以形成  $\text{CaCO}_3$ 。此模擬之結果指示加熱  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  以形成  $\text{MgO}$  為高效的。 $\text{MgO}$  接著與  $\text{H}_2\text{O}$  反應以形成  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ，其接著與飽和  $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$  溶液及來自廢氣之  $\text{CO}_2$  反應以形成  $\text{CaCO}_3$ ，將  $\text{CaCO}_3$  自物流中濾出。由此形成之  $\text{MgCl}_2$  再循環至第一反應器中以再次開始過程。在此實施例中，六水合鎂在  $450^\circ\text{C}$  下於一個腔室中同時脫水及分解。此為模型溫度範圍。在一些實施例中，較佳範圍為  $450^\circ\text{C}$ - $500^\circ\text{C}$ 。因此，完全分解成  $\text{MgO}$ 。此腔室中發生之主要反應可表示如下：



關於此模擬之更多細節提供於以上實例4中。

圖9為展示使用 Aspen Plus過程軟體進行之過程模擬之參數及結果的方法流程圖，其類似於圖8之實施例，但  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  在  $250^\circ\text{C}$  之較低溫度下於一個腔室中分解成中

間化合物  $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$ 。接著將  $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$  溶解於水中以形成  $\text{MgCl}_2$  及  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ，其繼而與  $\text{CaCl}_2$  及  $\text{CO}_2$  進行相同反應以形成  $\text{CaCO}_3$  及  $\text{MgCl}_2$ 。此腔室中發生之主要反應可表示如下：



該反應在  $250^\circ\text{C}$  下模型化。在一些實施例中，較佳範圍為  $230^\circ\text{C}$  至  $260^\circ\text{C}$ 。關於此模擬之更多細節提供於以上實例 5 中。

圖 10 展示經加熱  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  樣品之質量百分比之圖。樣品之初始質量為約 70 mg 且設定為 100%。在實驗期間，在樣品熱分解的同時量測樣品質量。溫度快速勻升至  $150^\circ\text{C}$ ，接著以每分鐘  $0.5^\circ\text{C}$  緩慢增加。在約  $220^\circ\text{C}$  下，重量變得恆定，與形成  $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$  一致。

圖 11 展示對應於實例 7 之產物之 X 射線繞射資料。

圖 12 展示對應於實例 8 之使用  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  進行之反應所得之產物的 X 射線繞射資料。

圖 13 展示對應於實例 8 之使用  $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$  進行之反應所得之產物的 X 射線繞射資料。

圖 14 展示溫度及壓力對  $\text{MgCl}_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})$  分解之影響。

圖 15 為本文所述之 Ca/Mg 方法之一個實施例的方法流程圖。

圖 16 為僅使用鎂化合物之方法變化形式之方法流程圖。在此實施例中，不發生  $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{Mg}^{2+}$  轉變反應。

圖 17 為介於先前 2 個實施例之間的不同方法變化形式之

方法流程圖。一半  $Mg^{2+}$  經  $Ca^{2+}$  置換，藉此產生所得礦化碳酸鹽  $MgCa(CO_3)_2$  或白雲石。

圖 18-CaSiO<sub>3</sub>-Mg(OH)Cl 方法，事例 10 及 11。此圖展示提供使用 Aspen Plus 過程軟體進行之過程模擬之參數及結果的方法流程圖。淨反應為使用便宜原料 CaSiO<sub>3</sub>、CO<sub>2</sub> 及水自廢氣中捕獲 CO<sub>2</sub> 以形成 SiO<sub>2</sub> 及 CaCO<sub>3</sub>。此模擬之結果指示使用來自 HCl 與 CaSiO<sub>3</sub> 反應之熱及來自燒天然氣或燒煤發電廠排放之廢氣之熱進行 MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 之分解以形成 Mg(OH)Cl 為高效的。Mg(OH)Cl 接著與 H<sub>2</sub>O 反應以形成 MgCl<sub>2</sub> 及 Mg(OH)<sub>2</sub>，其接著與飽和 CaCl<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 溶液及來自廢氣之 CO<sub>2</sub> 反應以形成 CaCO<sub>3</sub>，將 CaCO<sub>3</sub> 自物流中濾出。由此形成之 MgCl<sub>2</sub> 再循環至第一反應器中以再次開始過程。在此實施例中，六水合氯化鎂在第一腔室中使用來自 HCl 與 CaSiO<sub>3</sub> 反應之熱脫水成二水合氯化鎂 MgCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O 且在 250°C 下於第二腔室中使用來自廢氣之熱進行分解。因此，部分分解成 Mg(OH)Cl。此腔室中發生之主要反應可表示如下：

反應	$\Delta H^{**}$ , kJ/mol	反應溫度範圍
$MgCl_2 \cdot 6H_2O \rightarrow Mg(OH)Cl + 5H_2O + HCl$	433	230°C-260°C
$2HCl(氣體) + CaSiO_3 \rightarrow CaCl_2(水溶液) + H_2O + SiO_2 \downarrow$	-259	90°C-150°C
$2Mg(OH)Cl + CO_2 + CaCl_2 \rightarrow 2MgCl_2 + CaCO_3 \downarrow + H_2O$	-266	25°C-95°C

\*\* 焓係基於反應溫度及引入反應物及引出產物流之溫度。  
關於此模擬之更多細節提供於以上實例 10 及 11 中。

圖 19-CaSiO<sub>3</sub>-MgO 方法，事例 12 及 13。此圖展示提供使

用 Aspen Plus 過程軟體進行之過程模擬之參數及結果的方法流程圖。淨反應為使用便宜原料  $\text{CaSiO}_3$ 、 $\text{CO}_2$  及水自廢氣中捕獲  $\text{CO}_2$  以形成  $\text{SiO}_2$  及  $\text{CaCO}_3$ 。此模擬之結果指示使用來自  $\text{HCl}$  與  $\text{CaSiO}_3$  反應之熱及來自燒天然氣或燒煤發電廠排放之廢氣之熱進行  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  之分解以形成  $\text{MgO}$  為高效的。 $\text{MgO}$  接著與  $\text{H}_2\text{O}$  反應以形成  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ，其接著與飽和  $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$  溶液及來自廢氣之  $\text{CO}_2$  反應以形成  $\text{CaCO}_3$ ，將  $\text{CaCO}_3$  自物流中濾出。由此形成之  $\text{MgCl}_2$  再循環至第一反應器中以再次開始過程。在此實施例中，六水合氯化鎂在第一腔室中使用來自  $\text{HCl}$  與  $\text{CaSiO}_3$  反應之熱脫水成二水合氯化鎂  $\text{MgCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  且在  $450^\circ\text{C}$  下於第二腔室中使用來自廢氣之熱進行分解。因此，完全分解成  $\text{MgO}$ 。此腔室中發生之主要反應可表示如下：

反應	$\Delta H$ , kJ/mol**	反應溫度範圍
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MgO} + 5\text{H}_2\text{O} + 2\text{HCl}$	560	$450^\circ\text{C} - 500^\circ\text{C}$
$2\text{HCl}(\text{氣體}) + \text{CaSiO}_3 \rightarrow \text{CaCl}_2(\text{水溶液}) + \text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2\downarrow$	-264	$90^\circ\text{C} - 150^\circ\text{C}$
$\text{MgO} + \text{CO}_2 + \text{CaCl}_2(\text{水溶液}) \rightarrow \text{MgCl}_2(\text{水溶液}) + \text{CaCO}_3\downarrow$	-133	$25^\circ\text{C} - 95^\circ\text{C}$

\*\*焓係基於反應溫度及引入反應物及引出產物流之溫度。關於此模擬之更多細節提供於以上實例 12 及 13 中。

圖 20-MgSiO<sub>3</sub>-Mg(OH)Cl 方法，事例 14 及 15。此圖展示提供使用 Aspen Plus 過程軟體進行之過程模擬之參數及結果的方法流程圖。淨反應為使用便宜原料  $\text{MgSiO}_3$ 、 $\text{CO}_2$  及水自廢氣中捕獲  $\text{CO}_2$  以形成  $\text{SiO}_2$  及  $\text{MgCO}_3$ 。此模擬之結果

指示使用來自HCl與MgSiO<sub>3</sub>反應之熱及來自燒天然氣或燒煤發電廠排放之廢氣之熱進行MgCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O之分解以形成Mg(OH)Cl為高效的。Mg(OH)Cl接著與H<sub>2</sub>O反應以形成MgCl<sub>2</sub>及Mg(OH)<sub>2</sub>，其接著與來自廢氣之CO<sub>2</sub>反應以形成MgCO<sub>3</sub>，將MgCO<sub>3</sub>自物流中濾出。由此形成之MgCl<sub>2</sub>再循環至第一反應器中以再次開始過程。在此實施例中，氯化鎂因來自HCl及MgSiO<sub>3</sub>之熱而在於250°C下使用來自廢氣之熱進行分解之前保持呈二水合物形式MgCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O。因此，部分分解成Mg(OH)Cl。此腔室中發生之主要反應可表示如下：

反應	ΔH， kJ/mol**	反應溫度範圍
MgCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O→Mg(OH)Cl+H <sub>2</sub> O(氣體)+HCl(氣體)	139.8	230°C-260°C
2HCl(氣體)+MgSiO <sub>3</sub> →MgCl <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O+SiO <sub>2</sub> ↓	-282.8	90°C-150°C
2Mg(OH)Cl+CO <sub>2</sub> →MgCl <sub>2</sub> +MgCO <sub>3</sub> ↓+H <sub>2</sub> O	-193.1	25°C-95°C

\*\*焓係基於反應溫度及引入反應物及引出產物流之溫度。  
關於此模擬之更多細節提供於以上實例14及15中。

圖21-MgSiO<sub>3</sub>-MgO方法，事例16及17。此圖展示提供使用Aspen Plus過程軟體進行之過程模擬之參數及結果的方法流程圖。淨反應為使用便宜原料MgSiO<sub>3</sub>、CO<sub>2</sub>及水自廢氣中捕獲CO<sub>2</sub>以形成SiO<sub>2</sub>及MgCO<sub>3</sub>。此模擬之結果指示使用來自HCl與MgSiO<sub>3</sub>反應之熱及來自燒天然氣或燒煤發電廠排放之廢氣之熱進行MgCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O之分解以形成MgO為高效的。MgO接著與H<sub>2</sub>O反應以形成Mg(OH)<sub>2</sub>，其接著與來自廢氣之CO<sub>2</sub>反應以形成MgCO<sub>3</sub>，將MgCO<sub>3</sub>自物流中濾

出。在此實施例中，氯化鎂因來自HCl及MgSiO<sub>3</sub>之熱而在於450°C下使用來自廢氣之熱進行分解之前保持呈二水合物形式MgCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O。因此，完全分解成MgO。此腔室中發生之主要反應可表示如下：

反應	ΔH， kJ/mol**	反應溫度範圍
MgCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O→MgO+H <sub>2</sub> O(氣體)+2HCl(氣體)	232.9	450°C-500°C
2HCl(氣體)+MgSiO <sub>3</sub> →MgCl <sub>2</sub> (水溶液)+H <sub>2</sub> O(氣體)+SiO <sub>2</sub> ↓	-293.5	90°C-150°C
MgO+CO <sub>2</sub> →MgCO <sub>3</sub> ↓	-100	25°C-95°C

\*\*焓係基於反應溫度及引入反應物及引出產物流之溫度。關於此模擬之更多細節提供於以上實例16及17中。

圖 22-透輝石-Mg(OH)Cl方法，事例 18 及 19。此圖展示提供使用 Aspen Plus 過程軟體進行之過程模擬之參數及結果的方法流程圖。淨反應為使用便宜原料透輝石 MgCa(SiO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 及水自廢氣中捕獲 CO<sub>2</sub> 以形成 SiO<sub>2</sub> 及白雲石 MgCa(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>。此模擬之結果指示使用來自 HCl 與 MgCa(SiO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 反應之熱及來自燒天然氣或燒煤發電廠排放之廢氣之熱進行 MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 之分解以形成 Mg(OH)Cl 為高效的。Mg(OH)Cl 接著與 H<sub>2</sub>O 反應以形成 MgCl<sub>2</sub> 及 Mg(OH)<sub>2</sub>，其接著與飽和 CaCl<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 溶液及來自廢氣之 CO<sub>2</sub> 反應以形成 MgCa(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>，將 MgCa(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 自物流中濾出。由此形成之 MgCl<sub>2</sub> 再循環至第一反應器中以再次開始過程。在此實施例中，六水合氯化鎂在第一腔室中使用來自 HCl 與 CaSiO<sub>3</sub> 反應之熱脫水成二水合氯化鎂 MgCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O 且

在 250°C 下於第二腔室中使用來自廢氣之熱分解成 Mg(OH)Cl。此腔室中發生之主要反應可表示如下：

反應	$\Delta H$ , kJ/mol**	反應溫度範圍
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Mg(OH)Cl} + 5\text{H}_2\text{O}(\text{氣體}) + \text{HCl}(\text{氣體})$	433	230°C-260°C
$2\text{HCl}(\text{氣體}) + \text{MgCa}(\text{SiO}_3)_2 \rightarrow \text{CaCl}_2(\text{水溶液})$ $+ \text{MgSiO}_3\downarrow + \text{SiO}_2\downarrow + \text{H}_2\text{O}$	-235	90°C-150°C
$2\text{HCl}(\text{g}) + \text{MgSiO}_3 \rightarrow \text{MgCl}_2(\text{水溶液}) + \text{SiO}_2\downarrow + \text{H}_2\text{O}$	-282.8	90°C-150°C
$4\text{Mg(OH)Cl} + 2\text{CO}_2 + \text{CaCl}_2(\text{水溶液}) \rightarrow$ $\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2\downarrow + 3\text{MgCl}_2(\text{水溶液}) + 2\text{H}_2\text{O}$	-442	25°C-95°C

\*\*焓係基於反應溫度及引入反應物及引出產物流之溫度。  
關於此模擬之更多細節提供於以上實例 18 及 19 中。

圖 23-透輝石-MgO 方法，事例 20 及 21。此圖展示提供使用 Aspen Plus 過程軟體進行之過程模擬之參數及結果的方法流程圖。淨反應為使用便宜原料透輝石  $\text{MgCa}(\text{SiO}_3)_2$ 、 $\text{CO}_2$  及水自廢氣中捕獲  $\text{CO}_2$  以形成  $\text{SiO}_2$  及白雲石  $\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$ 。此模擬之結果指示使用來自 HCl 與  $\text{MgCa}(\text{SiO}_3)_2$  反應之熱及來自燒天然氣或燒煤發電廠排放之廢氣及/或其他熱源之熱進行  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  之分解以形成 MgO 為高效的。MgO 接著與  $\text{H}_2\text{O}$  反應以形成  $\text{Mg(OH)}_2$ ，其接著與飽和  $\text{CaCl}_2/\text{H}_2\text{O}$  溶液及來自廢氣之  $\text{CO}_2$  反應以形成  $\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$ ，將  $\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$  自物流中濾出。由此形成之  $\text{MgCl}_2$  再循環至第一反應器中以再次開始過程。在此實施例中，六水合氯化鎂在第一腔室中使用來自 HCl 與  $\text{CaSiO}_3$  反應之熱脫水成二水合氯化鎂  $\text{MgCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  且在 450°C 下於第二腔室中使用來自廢氣之熱分解成 MgO。此腔室中發生

之主要反應可表示如下：

反應	$\Delta H$ , kJ/mol**	反應溫度範圍
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MgO} + 5\text{H}_2\text{O} + 2\text{HCl}$	560	450°C-500°C
$2\text{HCl}(\text{氣體}) + \text{MgCa}(\text{SiO}_3)_2 \rightarrow \text{CaCl}_2(\text{氣體}) + \text{MgSiO}_3\downarrow + \text{SiO}_2\downarrow + \text{H}_2\text{O}$	-240	90°C-150°C
$2\text{HCl}(\text{水溶液}) + \text{MgSiO}_3 \rightarrow \text{MgCl}_2(\text{水溶液}) + \text{SiO}_2\downarrow + \text{H}_2\text{O}$	-288	90°C-150°C
$2\text{MgO} + 2\text{CO}_2 + \text{CaCl}_2(\text{水溶液}) \rightarrow \text{MgCa}(\text{CO}_3)_2\downarrow + \text{MgCl}_2(\text{水溶液})$	-258	25°C-95°C

\*\*焓係基於反應溫度及引入反應物及引出產物流之溫度。

關於此模擬之更多細節提供於以上實例20及21中。

圖24說明在不同CO<sub>2</sub>廢氣濃度、不同溫度、廢氣來源於煤抑或天然氣以及方法依賴於完全分解抑或部分分解下所捕獲CO<sub>2</sub>之百分比。參見CaSiO<sub>3</sub>-Mg(OH)Cl及CaSiO<sub>3</sub>-MgO方法之實例10至13。

圖25說明在不同CO<sub>2</sub>廢氣濃度、不同溫度、廢氣係來源於煤抑或天然氣以及方法係依賴於完全分解抑或部分分解下所捕獲CO<sub>2</sub>之百分比。參見MgSiO<sub>3</sub>-Mg(OH)Cl及MgSiO<sub>3</sub>-MgO方法之實例14至17。

圖26說明在不同CO<sub>2</sub>廢氣濃度、不同溫度、廢氣係來源於煤抑或天然氣以及方法係依賴於完全分解抑或部分分解下所捕獲CO<sub>2</sub>之百分比。參見透輝石-Mg(OH)Cl及透輝石-MgO方法之實例18至21。

圖27為對應於本發明之一些實施例之簡化方法流程圖，在該等實施例中，例如Ca<sup>2+</sup>及Mg<sup>2+</sup>之兩種不同鹽用於分解及碳酸化。

圖 28-29 展示經加熱  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  樣品之質量百分比之圖。樣品之初始質量各自為約 70 mg 且各自設定為 100%。在實驗期間，在樣品熱分解的同時量測樣品質量。溫度勻升至  $200^\circ\text{C}$ ，接著歷經 12 小時操作過程進一步增加。分解物質之身分可藉由相對於所提供之理論平穩狀態進行比較來確認。圖 28 為 2 個曲線之疊加，第一曲線為實線，其為時間(分鐘)相對於溫度( $^\circ\text{C}$ )之曲線。該線說明溫度隨時間之勻變；第二曲線為虛線，其為重量%(100%=樣品原始重量)相對於時間之曲線，其說明樣品重量因脫水或分解而隨時間之降低。圖 29 亦為 2 個曲線之疊加，第一曲線(實線)為重量%相對於溫度( $^\circ\text{C}$ )之曲線，其說明樣品重量隨著溫度增加而減小；第二曲線(虛線)為重量%對溫度之導數(重量%/ $^\circ\text{C}$ )相對於溫度 $^\circ\text{C}$ 之曲線。當此值較高時，其指示各每度變化之重量損失率較大。若此值為零，則儘管溫度增加，但樣品重量保持相同，指示不存在脫水或分解。注意，圖 28 及圖 29 之樣品相同。

圖 30-在  $500^\circ\text{C}$  下 1 小時後之  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  分解。此圖展示在  $500^\circ\text{C}$  下加熱 1 小時後， $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  之 4 個測試操作之經正規化的最終重量及初始重量。一致的最終重量確認  $\text{MgO}$  在此溫度下係藉由分解而產生。

圖 31-三腔室分解。此圖展示提供使用 Aspen Plus 過程軟體進行之過程模擬之參數及結果的方法流程圖。在此實施例中，來自冷廢氣之熱(腔室 1)、來自礦物質溶解反應器之熱(腔室 2)及外部天然氣(腔室 3)用作熱源。此方法流程圖

說明用於分解成  $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$  之三腔室方法。第一腔室係由  $200^\circ\text{C}$  廢氣加熱以提供所需總熱之約 8.2% 的一些初始熱；第二腔室依賴於自礦物質溶解反應器回收之熱以提供分解所需熱之 83%，其中 28% 來自鹽酸/礦物質矽酸鹽反應且 55% 來自鹽酸冷凝及形成；且最後之第三腔室使用天然氣作為總熱之 8.5% 之餘熱的外部來源。 $\text{CO}_2$  來自組合循環天然氣發電廠，因此極少熱可自該發電廠獲得以對分解反應提供動力。

圖 32-四腔室分解。此圖展示提供使用 Aspen Plus 過程軟體進行之過程模擬之參數及結果的方法流程圖。在此實施例中，來自冷廢氣之熱(腔室 1)、來自其他蒸汽之熱(腔室 2)、來自礦物質溶解反應器之熱(腔室 3)及外部天然氣(腔室 4)用作熱源。此方法流程圖說明用於分解成  $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$  之四腔室方法，第一腔室提供  $200^\circ\text{C}$  廢氣以提供所需總熱之約 8.2% 的一些初始熱；第二腔室以額外蒸汽形式提供所需總熱之 0.8% 的熱；第三腔室依賴於自礦物質溶解反應器回收之熱以提供分解所需熱之 83%，其中 28% 來自鹽酸/礦物質矽酸鹽反應且 55% 來自鹽酸冷凝及形成；且最後之第四腔室使用天然氣作為總熱之 8.0% 之餘熱的外部來源。 $\text{CO}_2$  來自組合循環天然氣發電廠，因此極少熱可自該發電廠獲得以對分解反應提供動力。

圖 33-二腔室分解。此圖展示提供使用 Aspen Plus 過程軟體進行之過程模擬之參數及結果的方法流程圖。在此實施例中，來自礦物質溶解反應器之熱(腔室 1)及外部天然氣

(腔室 2) 用作熱源。此方法流程圖說明用於分解成  $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$  之二腔室方法，第一腔室依賴於自礦物質溶解反應器回收之熱以提供分解所需熱之 87%，其中 28% 來自鹽酸/礦物質矽酸鹽反應且 59% 來自鹽酸冷凝及形成；且第二腔室使用天然氣作為總熱之 13% 之餘熱的外部來源。 $\text{CO}_2$  來自組合循環天然氣發電廠，因此極少熱可自該發電廠獲得以對分解反應提供動力。

圖 34-二腔室分解。此圖展示提供使用 Aspen Plus 過程軟體進行之過程模擬之參數及結果的方法流程圖。在此實施例中，來自礦物質溶解反應器之熱(腔室 1)及來自開放式循環天然氣工廠之熱廢氣(腔室 2)用作熱源。此方法流程圖說明用於分解成  $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$  之二腔室方法，第一腔室依賴於自礦物質溶解反應器回收之熱以提供分解所需熱之 87%，其中 28% 來自鹽酸/礦物質矽酸鹽反應且 59% 來自鹽酸冷凝及形成；且第二腔室使用熱廢氣作為總熱之 13% 之餘熱的外部來源。 $\text{CO}_2$  來自開放式循環天然氣發電廠，因此大量熱可以  $600^\circ\text{C}$  廢氣形式自該發電廠獲得以對分解反應提供動力。

#### 【主要元件符號說明】

10	反應器
20	反應器
30	反應器
100	反應器
200	反應器
300	反應器

# 發明專利說明書

(本說明書格式、順序及粗體字，請勿任意更動，※記號部分請勿填寫)

※申請案號：100124334

※申請日：100-7-8

※IPC 分類：B01D<sup>53/14</sup> (2006.01)

B01D<sup>53/62</sup> (2006.01)

B01D<sup>53/73</sup> (2006.01)

一、發明名稱：(中文/英文)

涉及基於二鹽之熱解方法的二氧化碳捕捉方法

CARBON DIOXIDE SEQUESTRATION INVOLVING TWO-SALT-BASED THERMOLYTIC PROCESSES

二、中文發明摘要：

本發明係關於一種高能效二氧化碳捕捉方法，藉此使用允許熱及化學物質自一個步驟循環至另一步驟之二鹽熱解方法使第2族矽酸鹽礦物質及CO<sub>2</sub>轉化成石灰石及砂。

三、英文發明摘要：

The present invention relates to an energy efficient carbon dioxide sequestration processes whereby Group 2 silicate minerals and CO<sub>2</sub> are converted into limestone and sand using a two-salt thermolytic process that allows for the cycling of heat and chemicals from one step to another.

## 七、申請專利範圍：

1. 一種捕捉由一來源產生之二氧化碳之方法，其包含：

(a)使第一陽離子基鹵化物、硫酸鹽或硝酸鹽或其水合物與水以第一摻合物形式在適於形成第一產物混合物之條件下反應，該第一產物混合物包含有包含第一陽離子基氫氧化物鹽、第一陽離子基氧化物鹽及/或第一陽離子基羥基氯化物鹽之第一步驟(a)產物及包含HCl、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>或HNO<sub>3</sub>之第二步驟(a)產物；

(b)使一些或所有該第一步驟(a)產物與第二陽離子基鹵化物、硫酸鹽或硝酸鹽或其水合物及由該來源產生之二氧化碳以第二摻合物形式在適於形成第二產物混合物之條件下摻合，該第二產物混合物包含有包含第一陽離子基鹵化物、硫酸鹽及/或硝酸鹽或其水合物之第一步驟(b)產物、包含第二陽離子基碳酸鹽之第二步驟(b)產物及包含水之第三步驟(b)產物；及

(c)自該第二產物混合物中分離一些或所有該第二陽離子基碳酸鹽，

藉此以礦物質產物形式捕捉該二氧化碳。

2. 如請求項1之方法，其中步驟(a)之該第一陽離子基鹵化物、硫酸鹽或硝酸鹽或其水合物為第一陽離子基氯化物鹽或其水合物，且該第二步驟(a)產物為HCl。

3. 如請求項1至2中任一項之方法，其中步驟(b)之該第一陽離子基鹵化物、硫酸鹽或硝酸鹽或其水合物為第一陽離子基氯化物鹽或其水合物。

4. 如請求項2之方法，其中步驟(a)之該第一陽離子基氯化物鹽或其水合物為 $\text{MgCl}_2$ 。
5. 如請求項4之方法，其中步驟(a)之該第一陽離子基氯化物鹽或其水合物為水合形式之 $\text{MgCl}_2$ 。
6. 如請求項5之方法，其中步驟(a)之該第一陽離子基氯化物鹽或其水合物為 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 。
7. 如請求項1至6中任一項之方法，其中步驟(a)之該第一陽離子基氫氧化物鹽為 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 。
8. 如請求項2至6中任一項之方法，其中步驟(a)之該第一陽離子基羥基氯化物鹽為 $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$ 。
9. 如請求項8之方法，其中該第一步驟(a)產物主要包含 $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$ 。
10. 如請求項8之方法，其中該第一步驟(a)產物包含大於90重量%之 $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$ 。
11. 如請求項8之方法，其中該第一步驟(a)產物為 $\text{Mg}(\text{OH})\text{Cl}$ 。
12. 如請求項1至6中任一項之方法，其中步驟(a)之該第一陽離子基氧化物鹽為 $\text{MgO}$ 。
13. 如請求項1至12中任一項之方法，其中步驟(b)之該第二陽離子基鹵化物、硫酸鹽或硝酸鹽或其水合物為第二陽離子基氯化物鹽或其水合物。
14. 如請求項13之方法，其中該第二陽離子基氯化物鹽或其水合物為 $\text{CaCl}_2$ 。
15. 如請求項3至12中任一項之方法，其中步驟(b)之該第一

陽離子基氯化物鹽為 $MgCl_2$ 。

16. 如請求項15之方法，其中步驟(b)之該第一陽離子基氯化物鹽為水合形式之 $MgCl_2$ 。
17. 如請求項15之方法，其中步驟(b)之該第一陽離子基氯化物鹽為 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 。
18. 如請求項1至17中任一項之方法，其中步驟(a)中之一些或所有該水係以蒸汽或超臨界水之形式存在。
19. 如請求項1至18中任一項之方法，其中步驟(a)之一些或所有該水係自步驟(b)之該水獲得。
20. 如請求項1至19中任一項之方法，其中步驟(b)進一步包含使氫氧化鈉鹽摻合於該第二摻合物中。
21. 如請求項1至20中任一項之方法，其進一步包含：
  - (d)使第2族矽酸鹽礦物質與HCl在適於形成包含第2族氯化物鹽、水及二氧化矽之第三產物混合物之條件下摻合。
22. 如請求項21之方法，其中步驟(d)中之一些或所有該HCl係自步驟(a)獲得。
23. 如請求項21之方法，其中步驟(d)之該HCl進一步包含攪動該第2族矽酸鹽礦物質與HCl。
24. 如請求項21至23中任一項之方法，其中步驟(d)中所產生之一些或所有熱經回收。
25. 如請求項21至24中任一項之方法，其中步驟(b)之一些或所有該第二陽離子基氯化物鹽為步驟(d)之該第2族氯化物鹽。

26. 如請求項21至25中任一項之方法，其進一步包含分離步驟，在該分離步驟中，自步驟(d)中形成之該第2族氯化物鹽移除該二氧化矽。
27. 如請求項21至26中任一項之方法，其中步驟(a)之一些或所有該水係自步驟(d)之該水獲得。
28. 如請求項21至26中任一項之方法，其中步驟(d)之該第2族矽酸鹽礦物質包含第2族鏈狀矽酸鹽。
29. 如請求項21至26中任一項之方法，其中步驟(d)之該第2族矽酸鹽礦物質包含 $\text{CaSiO}_3$ 。
30. 如請求項21至26中任一項之方法，其中步驟(d)之該第2族矽酸鹽礦物質包含 $\text{MgSiO}_3$ 。
31. 如請求項21至26中任一項之方法，其中步驟(d)之該第2族矽酸鹽礦物質包含橄欖石(olivine)( $\text{Mg}_2[\text{SiO}_4]$ )。
32. 如請求項21至26中任一項之方法，其中步驟(d)之該第2族矽酸鹽礦物質包含蛇紋石(serpentine)( $\text{Mg}_6[\text{OH}]_8\text{Si}_4\text{O}_{10}$ )。
33. 如請求項21至26中任一項之方法，其中步驟(d)之該第2族矽酸鹽礦物質包含海泡石(sepiolite)  $\text{Mg}_4[(\text{OH})_2\text{Si}_6\text{O}_{15}] \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、頑火輝石(enstatite)  $\text{Mg}_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$ 、透輝石(diopside)( $\text{CaMg}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ )及/或透閃石(tremolite) $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\{[\text{OH}]\text{Si}_4\text{O}_{11}\}_2$ 。
34. 如請求項21至26中任一項之方法，其中該第2族矽酸鹽另外包含矽酸鐵及/或矽酸錳。
35. 如請求項34之方法，其中該矽酸鐵為鐵橄欖石

(fayalite)( $\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]$ )。

36. 如請求項3至35中任一項之方法，其中步驟(b)中形成之一些或所有該第一陽離子基氯化物鹽為步驟(a)中所用之該第一陽離子基氯化物鹽。
37. 如請求項1至36中任一項之方法，其中該二氧化碳係呈廢氣形式，其中該廢氣另外包含 $\text{N}_2$ 及 $\text{H}_2\text{O}$ 。
38. 如請求項1至37中任一項之方法，其中步驟(a)之適合反應條件包含約 $200^\circ\text{C}$ 至約 $500^\circ\text{C}$ 之溫度。
39. 如請求項38之方法，其中該溫度為約 $230^\circ\text{C}$ 至約 $260^\circ\text{C}$ 。
40. 如請求項38之方法，其中該溫度為約 $250^\circ\text{C}$ 。
41. 如請求項38之方法，其中該溫度為約 $200^\circ\text{C}$ 至約 $250^\circ\text{C}$ 。
42. 如請求項38之方法，其中該溫度為約 $240^\circ\text{C}$ 。
43. 如請求項1至37中任一項之方法，其中步驟(a)之適合反應條件包含約 $50^\circ\text{C}$ 至約 $200^\circ\text{C}$ 之溫度。
44. 如請求項43之方法，其中該溫度為約 $90^\circ\text{C}$ 至約 $260^\circ\text{C}$ 。
45. 如請求項44之方法，其中該溫度為約 $90^\circ\text{C}$ 至約 $230^\circ\text{C}$ 。
46. 如請求項45之方法，其中該溫度為約 $130^\circ\text{C}$ 。
47. 如請求項1至37中任一項之方法，其中步驟(a)之適合反應條件包含約 $400^\circ\text{C}$ 至約 $550^\circ\text{C}$ 之溫度。
48. 如請求項47之方法，其中該溫度為約 $450^\circ\text{C}$ 至約 $500^\circ\text{C}$ 。
49. 如請求項1至37中任一項之方法，其中步驟(b)之適合反應條件包含約 $20^\circ\text{C}$ 至約 $100^\circ\text{C}$ 之溫度。
50. 如請求項49之方法，其中該溫度為約 $25^\circ\text{C}$ 至約 $95^\circ\text{C}$ 。
51. 如請求項21至37中任一項之方法，其中步驟(d)之適合反

應條件包含約50°C至約200°C之溫度。

52. 如請求項51之方法，其中該溫度為約90°C至約150°C。

53. 一種捕捉由一來源產生之二氧化碳之方法，其包含：

(a)使氯化鎂鹽與水以第一摻合物形式在適於形成(i)氫氧化鎂、氧化鎂及/或 $Mg(OH)Cl$ 及(ii)氯化氫之條件下摻合；

(b)使(i)氫氧化鎂、氧化鎂及/或 $Mg(OH)Cl$ 、(ii) $CaCl_2$ 及(iii)由該來源產生之二氧化碳以第二摻合物形式在適於形成(iv)碳酸鈣、(v)氯化鎂鹽及(vi)水之條件下摻合；及

(c)自該第二摻合物中分離該碳酸鈣，

藉此以礦物質產物形式捕捉該二氧化碳。

54. 如請求項53之方法，其中步驟(a)之一些或所有該氯化氫係與水摻合以形成鹽酸。

55. 如請求項53之方法，其中步驟(b)(i)之一些或所有該氫氧化鎂、氧化鎂及/或 $Mg(OH)Cl$ 係自步驟(a)(i)獲得。

56. 如請求項53之方法，其中步驟(a)中之所有該水中之一些係以該氯化鎂鹽之水合物形式存在。

57. 如請求項53之方法，其中步驟(a)係在1個、2個或3個反應器中進行。

58. 如請求項53之方法，其中步驟(a)係在1個反應器中進行。

59. 如請求項53之方法，其中步驟(a)(i)之該氫氧化鎂、氧化鎂及/或 $Mg(OH)Cl$ 為大於90重量%之 $Mg(OH)Cl$ 。

60. 如請求項53之方法，其中該氯化鎂鹽為大於90重量%之  $\text{MgCl}_2 \cdot 6(\text{H}_2\text{O})$ 。
61. 如請求項53至60中任一項之方法，其進一步包含：
- (d)使第2族矽酸鹽礦物質與氯化氫在適於形成第2族氯化物鹽、水及二氧化矽之條件下摻合。
62. 如請求項61之方法，其中步驟(d)中之一些或所有該氯化氫係自步驟(a)獲得。
63. 如請求項61之方法，其中步驟(d)進一步包含攪動該第2族矽酸鹽礦物質與該鹽酸。
64. 如請求項61之方法，其中步驟(a)中之一些或所有該氯化鎂鹽係自步驟(d)獲得。
65. 如請求項61之方法，其進一步包含分離步驟，在該分離步驟中，自步驟(d)中形成之該第2族氯化物鹽移除該二氧化矽。
66. 如請求項61之方法，其中步驟(a)中之一些或所有該水係自步驟(d)之該水獲得。
67. 如請求項61之方法，其中步驟(d)之該第2族矽酸鹽礦物質包含第2族鏈狀矽酸鹽。
68. 如請求項61之方法，其中步驟(d)之該第2族矽酸鹽礦物質包含  $\text{CaSiO}_3$ 。
69. 如請求項61之方法，其中步驟(d)之該第2族矽酸鹽礦物質包含  $\text{MgSiO}_3$ 。
70. 如請求項61之方法，其中步驟(d)之該第2族矽酸鹽礦物質包含橄欖石。

71. 如請求項61之方法，其中步驟(d)之該第2族矽酸鹽礦物質包含蛇紋石。
72. 如請求項61之方法，其中步驟(d)之該第2族矽酸鹽礦物質包含海泡石、頑火輝石、透輝石及/或透閃石。
73. 如請求項61之方法，其中該第2族矽酸鹽另外包含礦化鐵及/或錳。
74. 如請求項53至66中任一項之方法，其中步驟(b)進一步包含使 $\text{CaCl}_2$ 及水摻合於該第二摻合物中。

## 八、圖式：

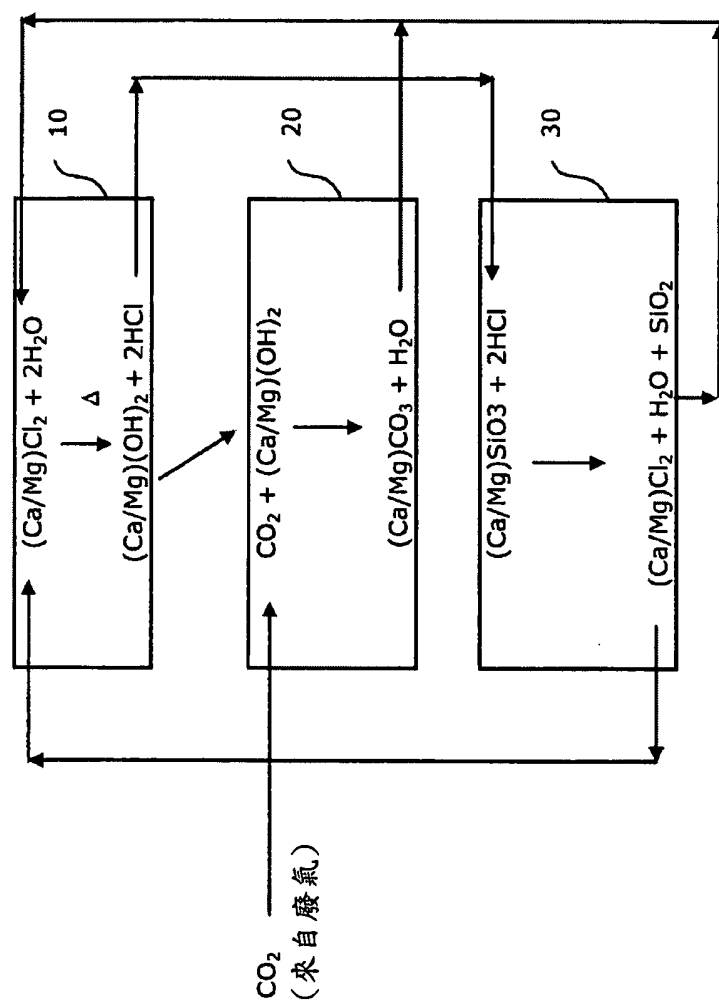


圖 1

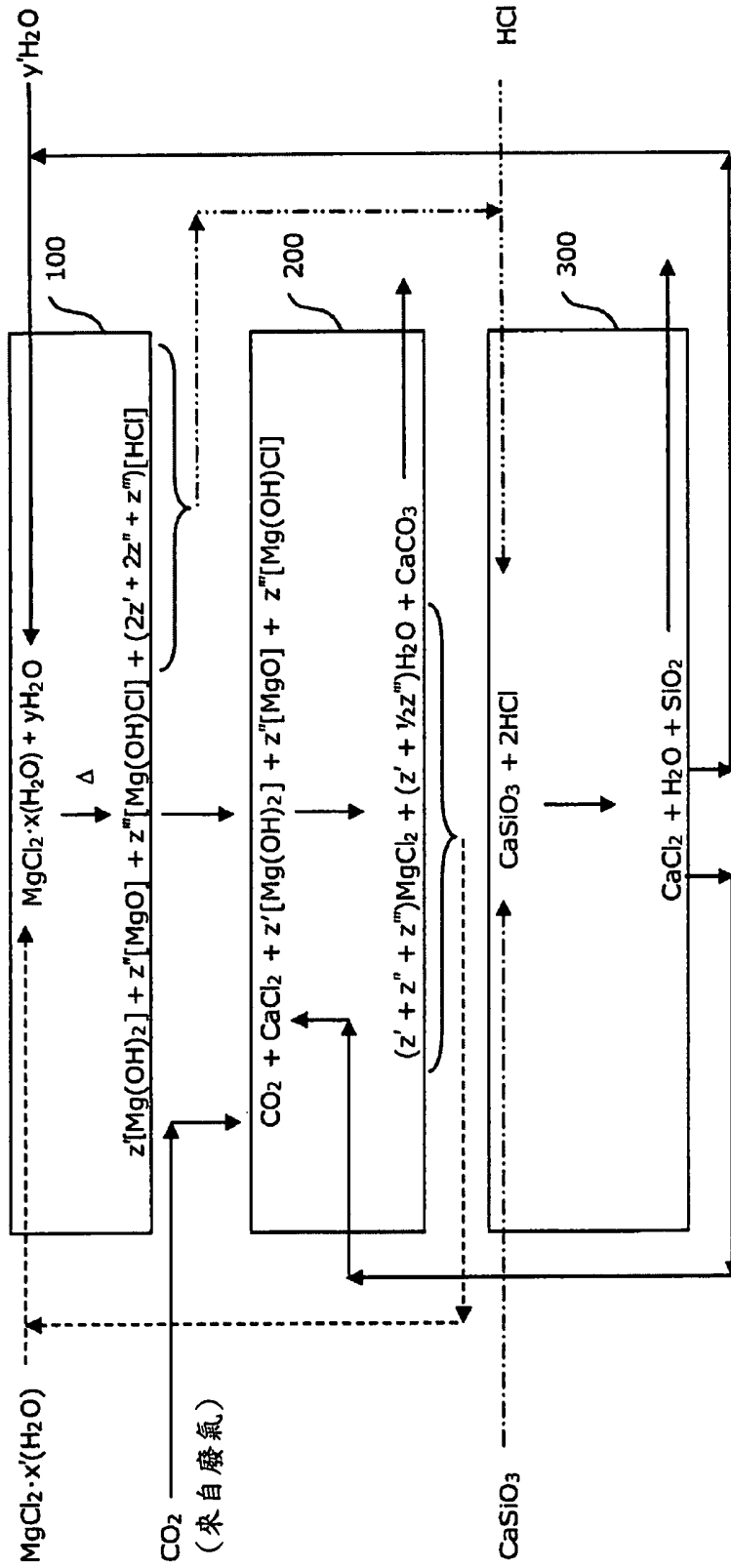


圖2

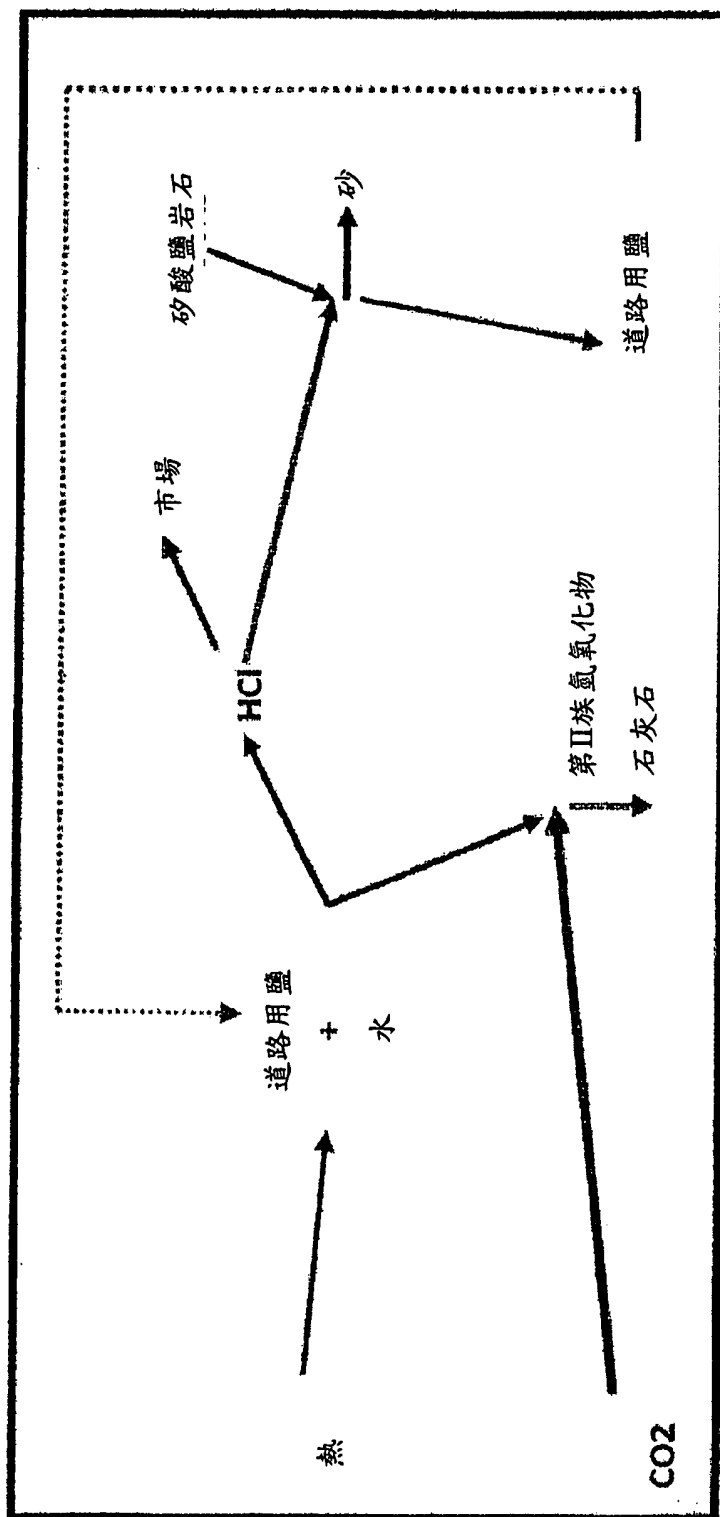


圖3

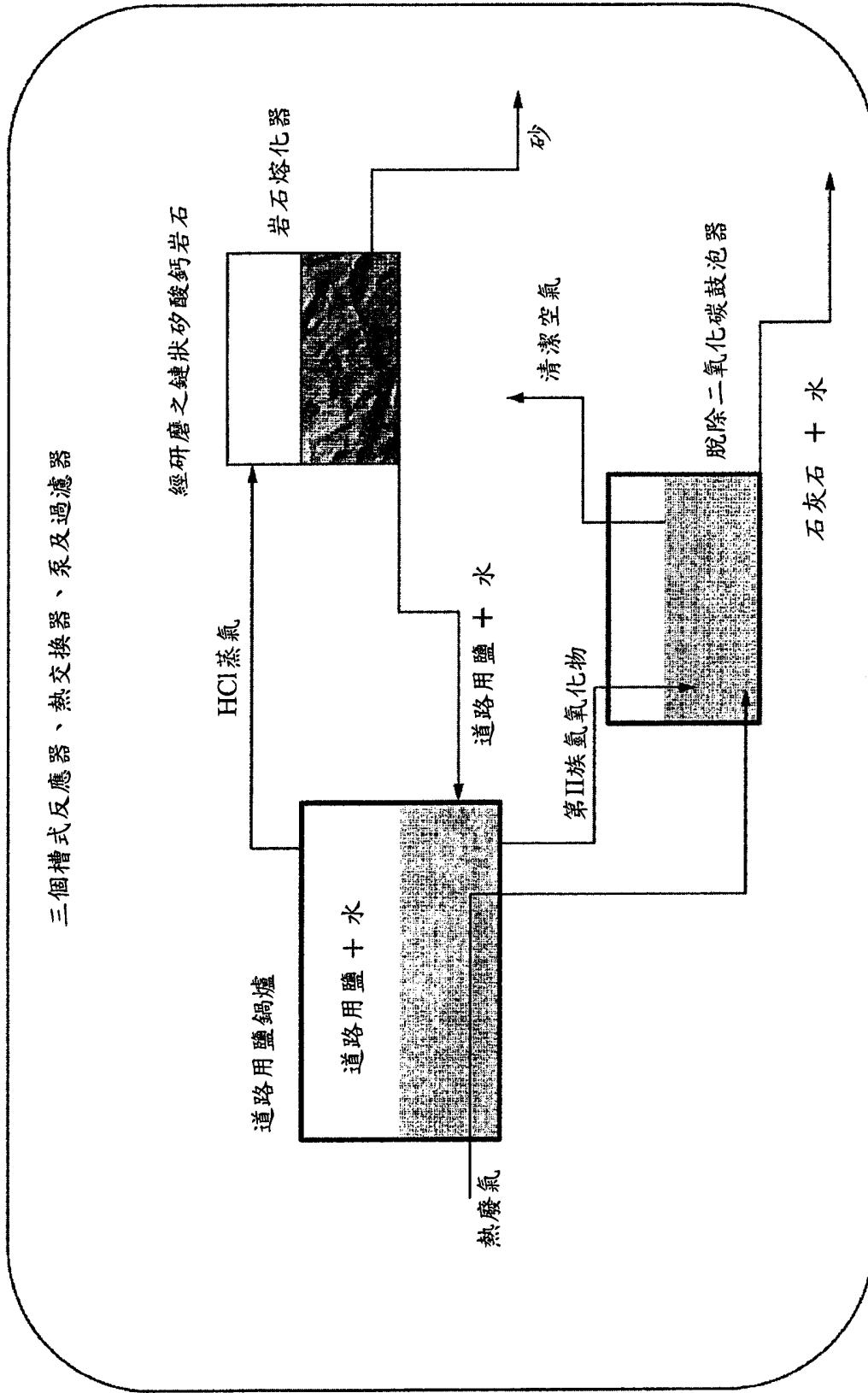


圖4

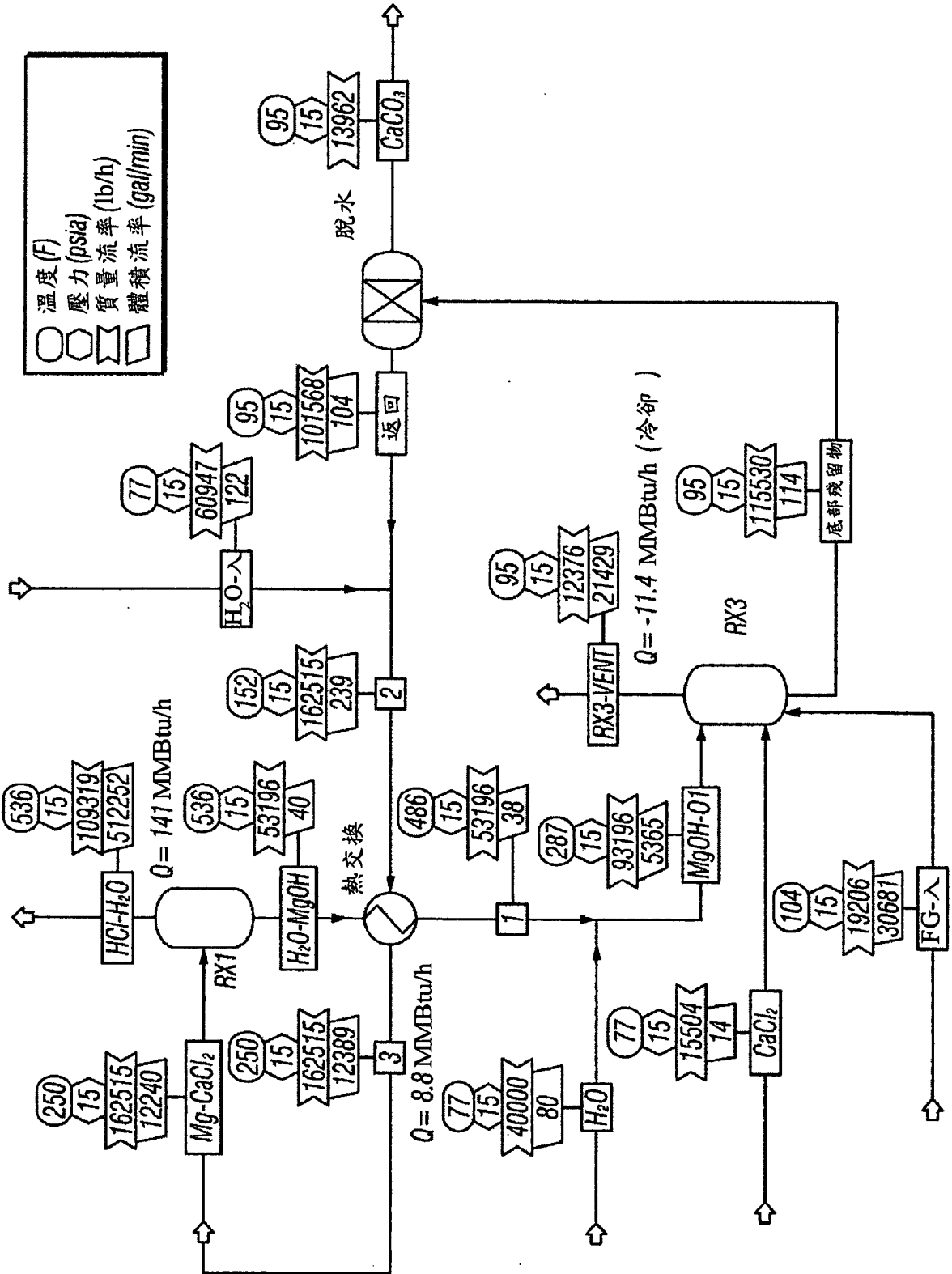


圖5

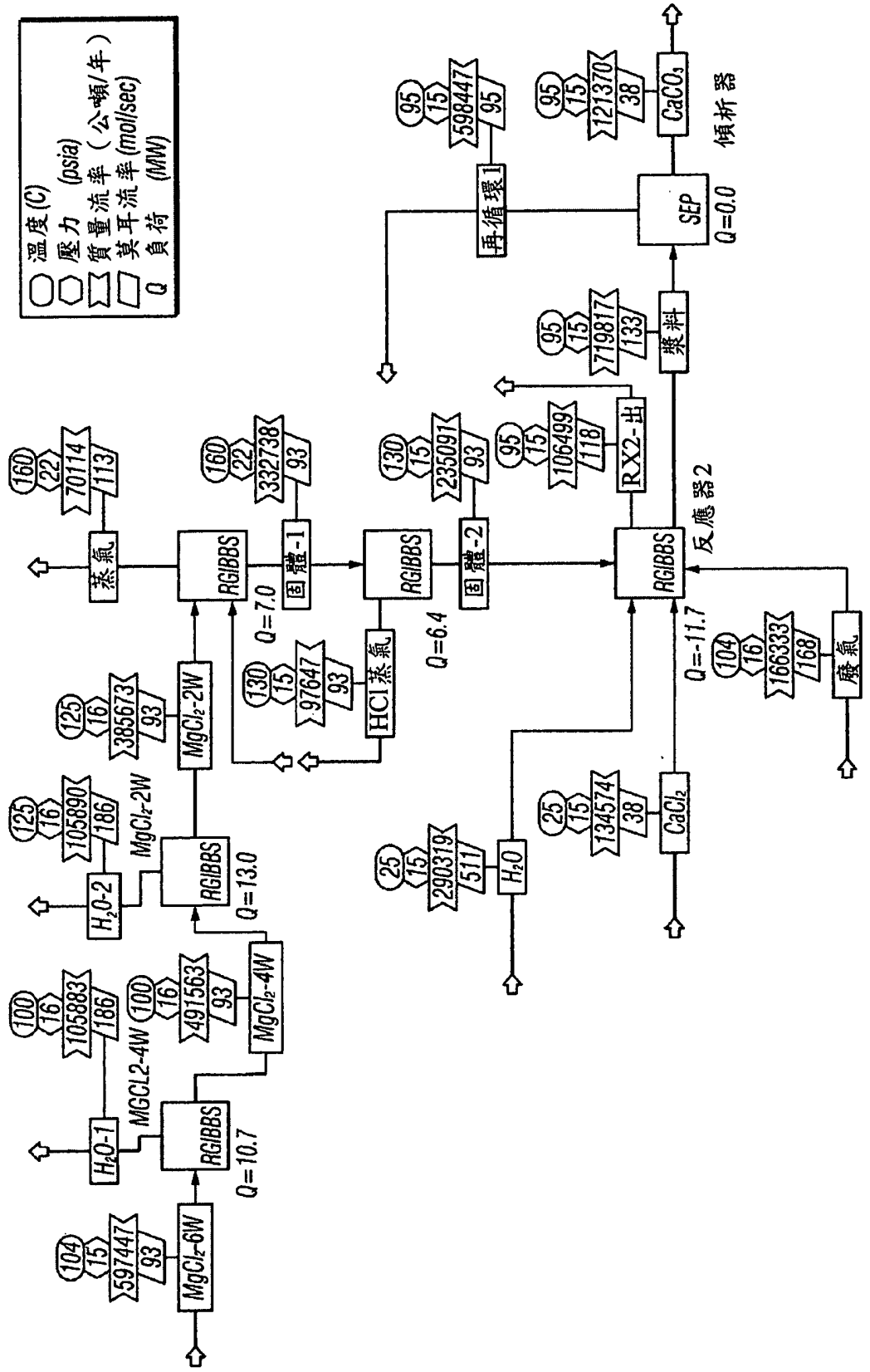


圖6





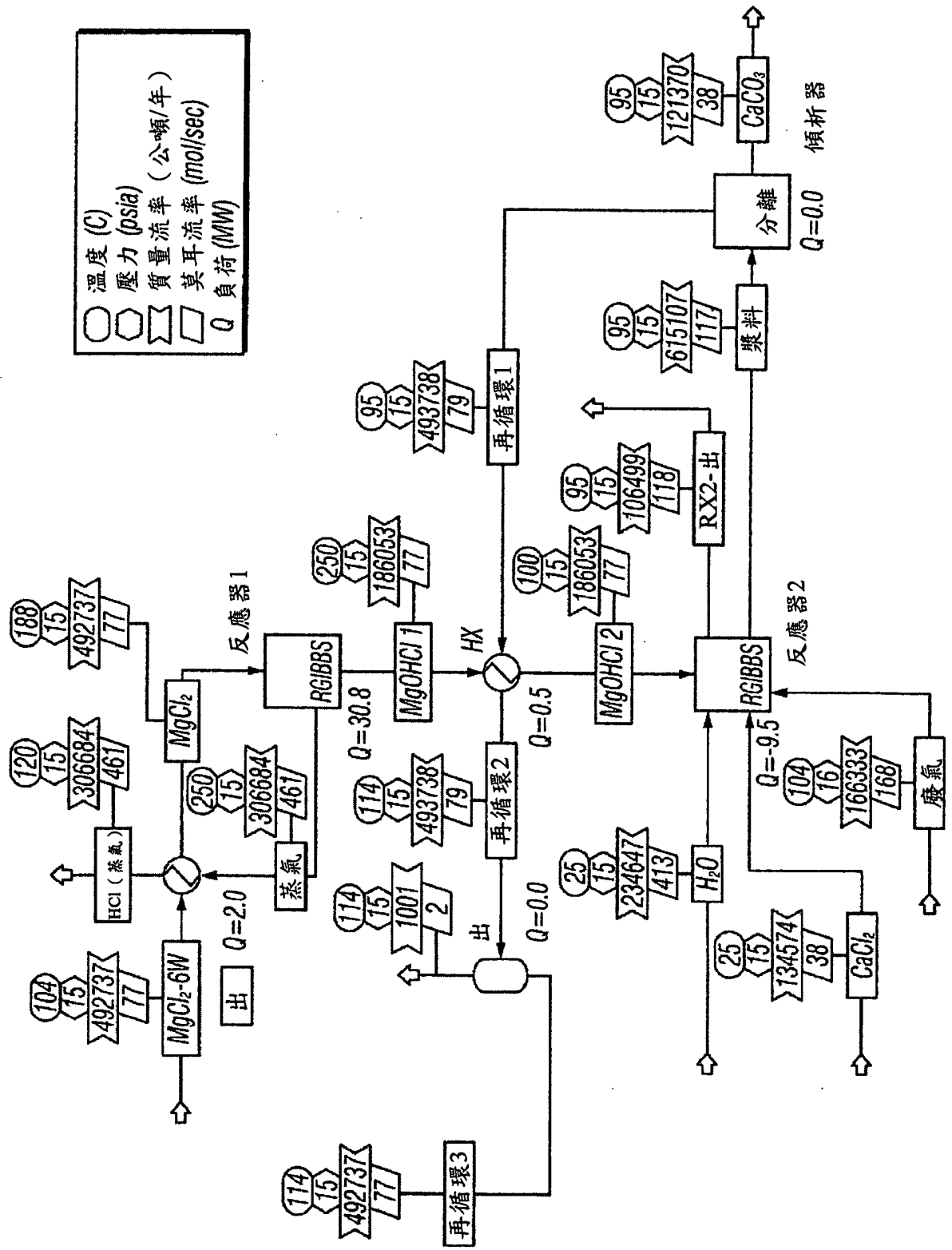


圖9

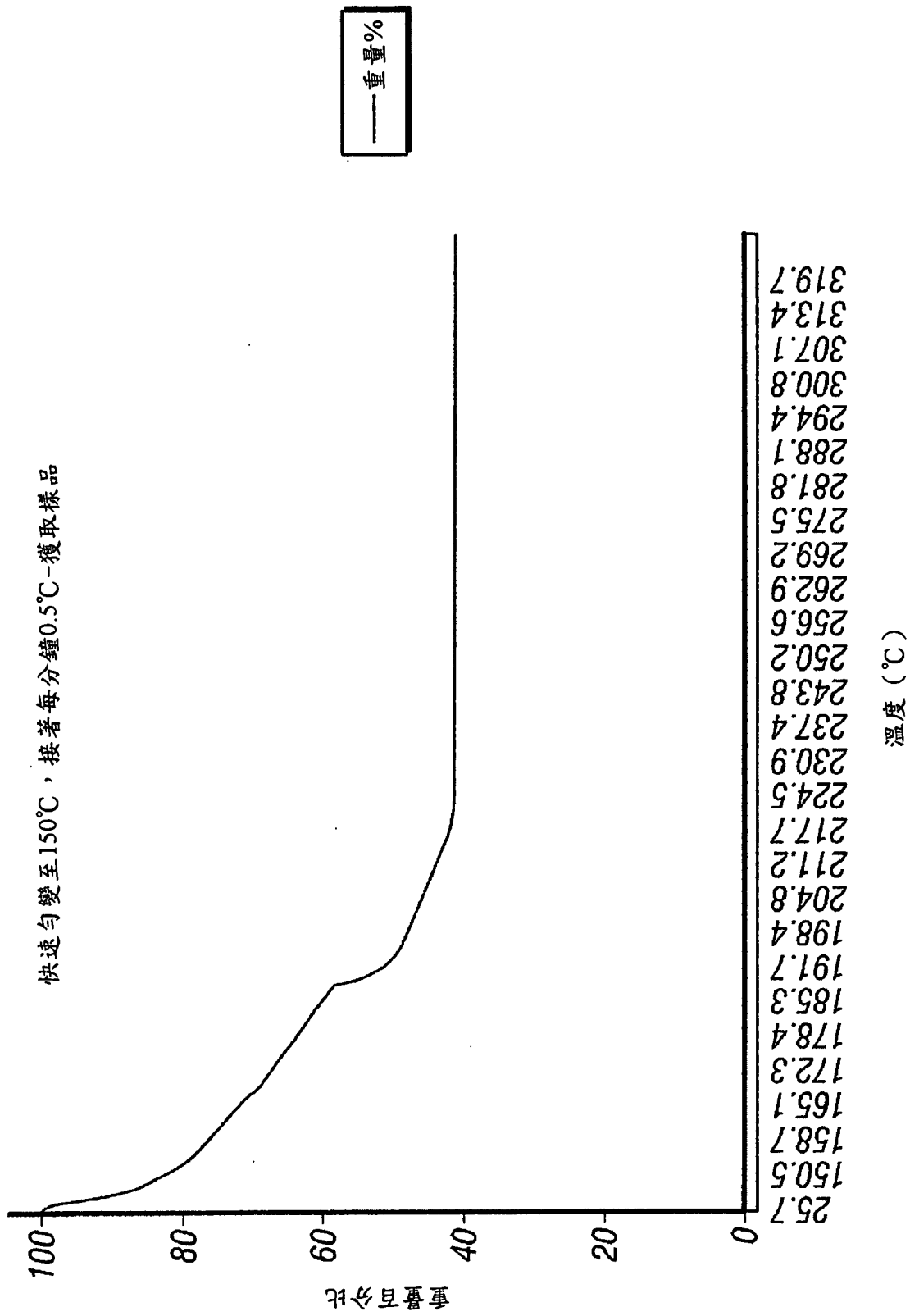


圖10

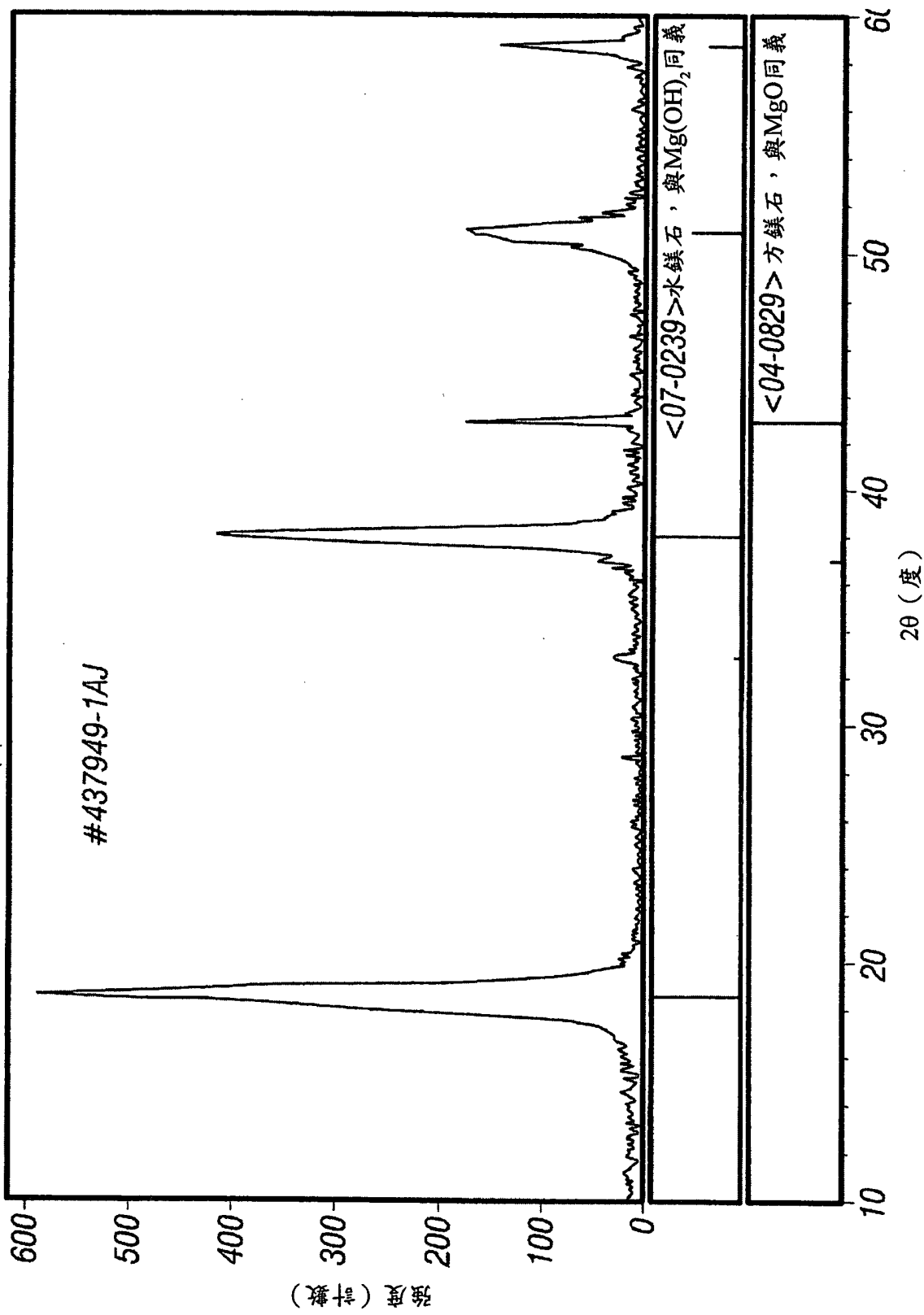


圖 11

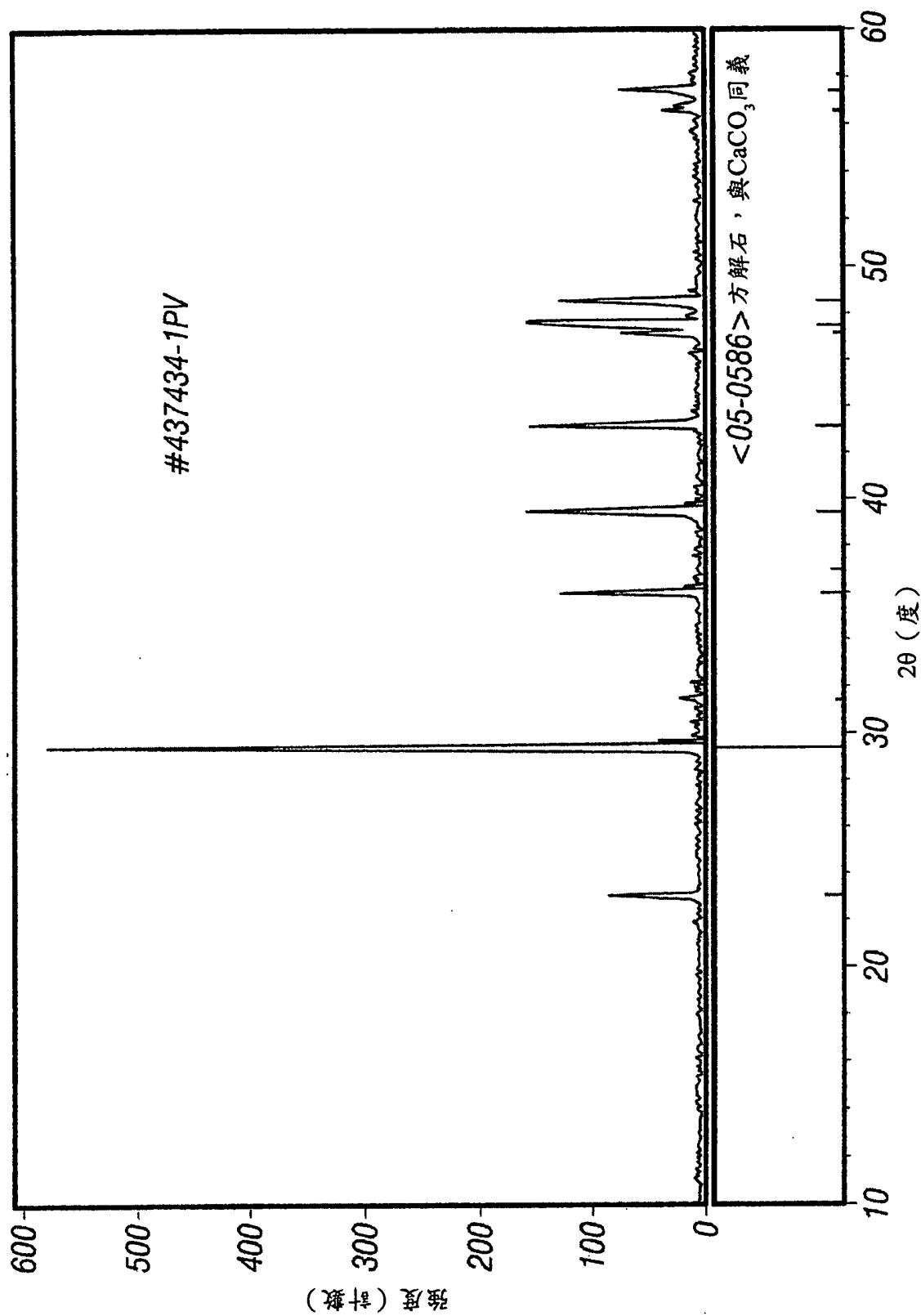


圖12

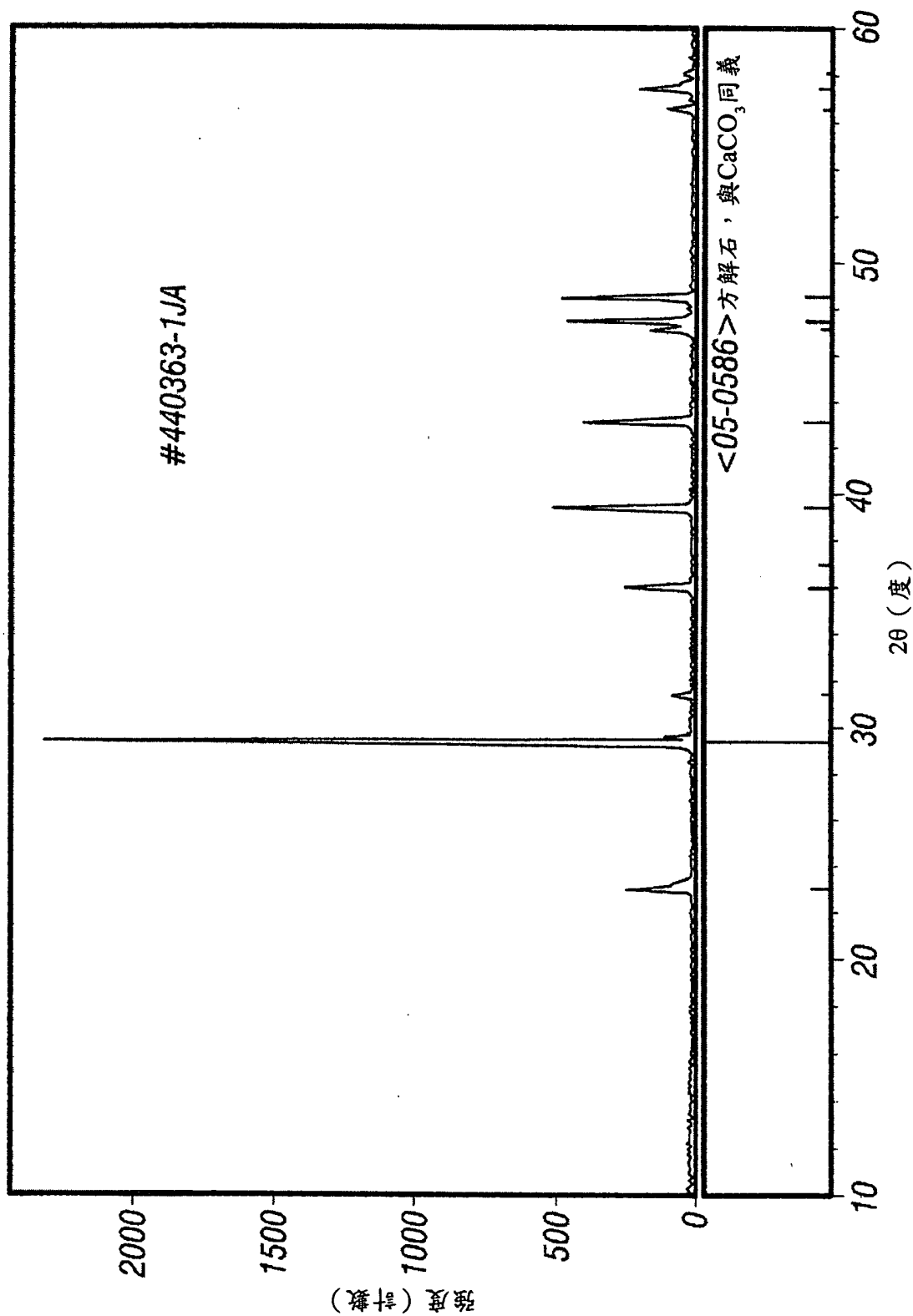


圖13

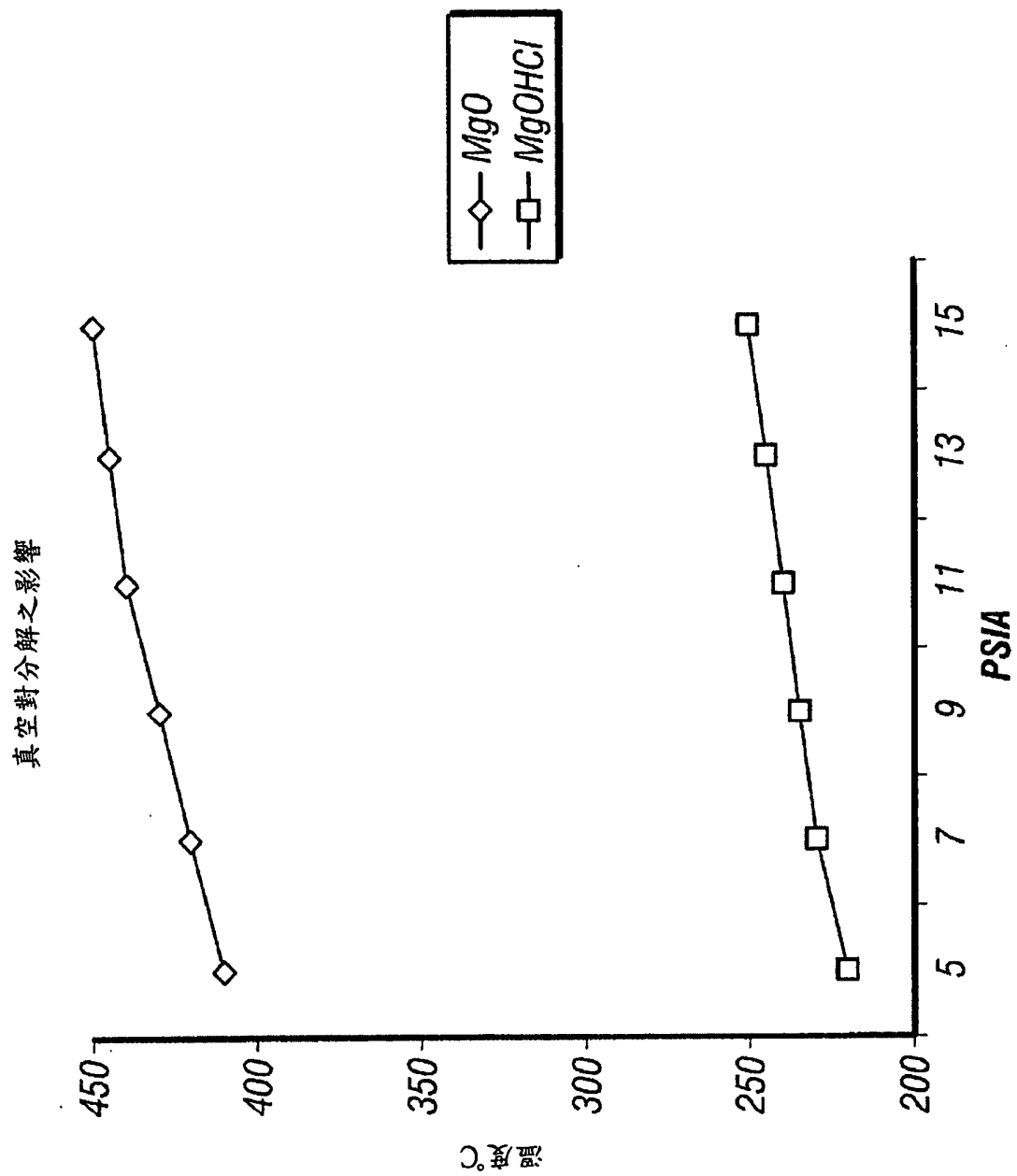


圖14

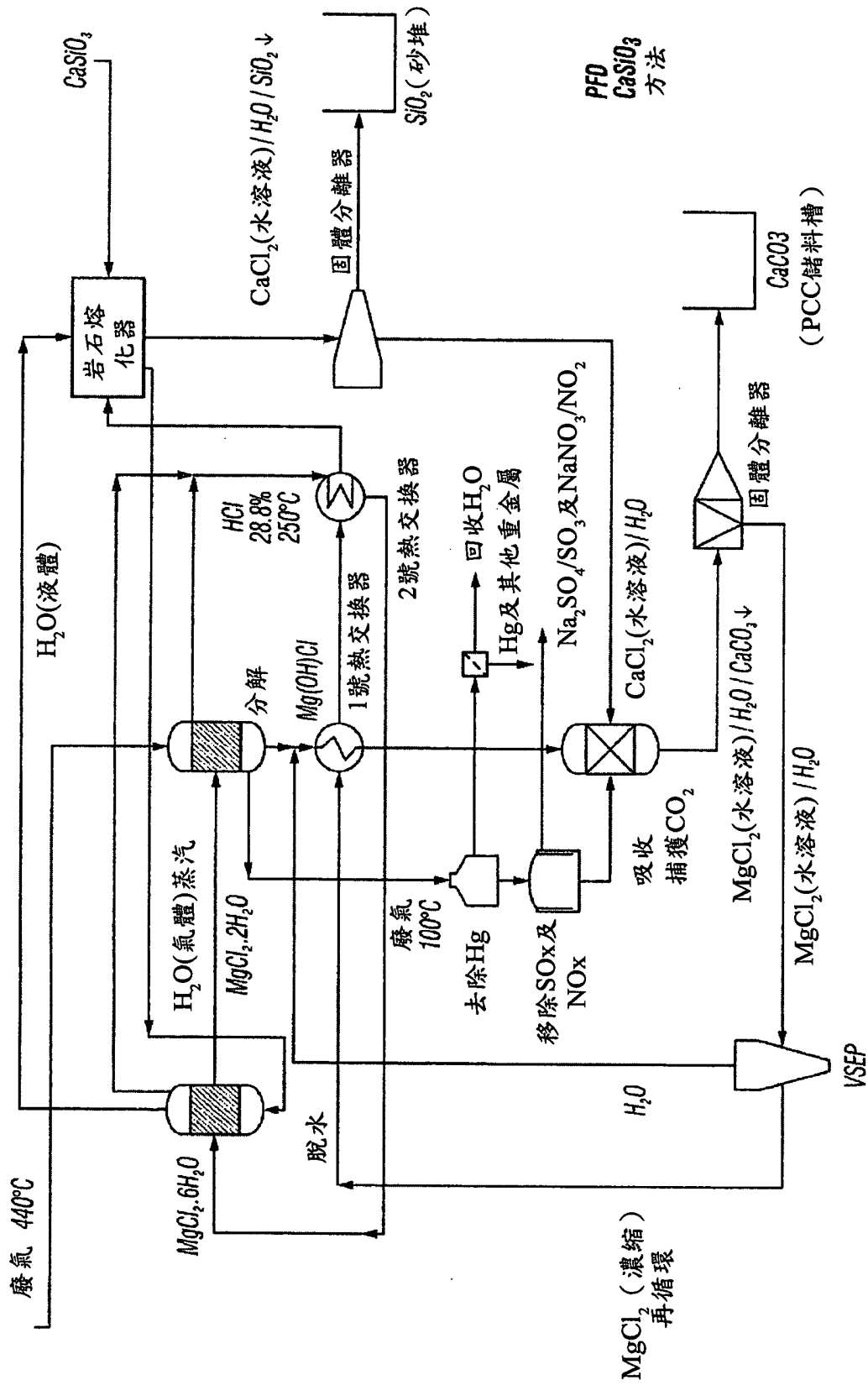


圖15

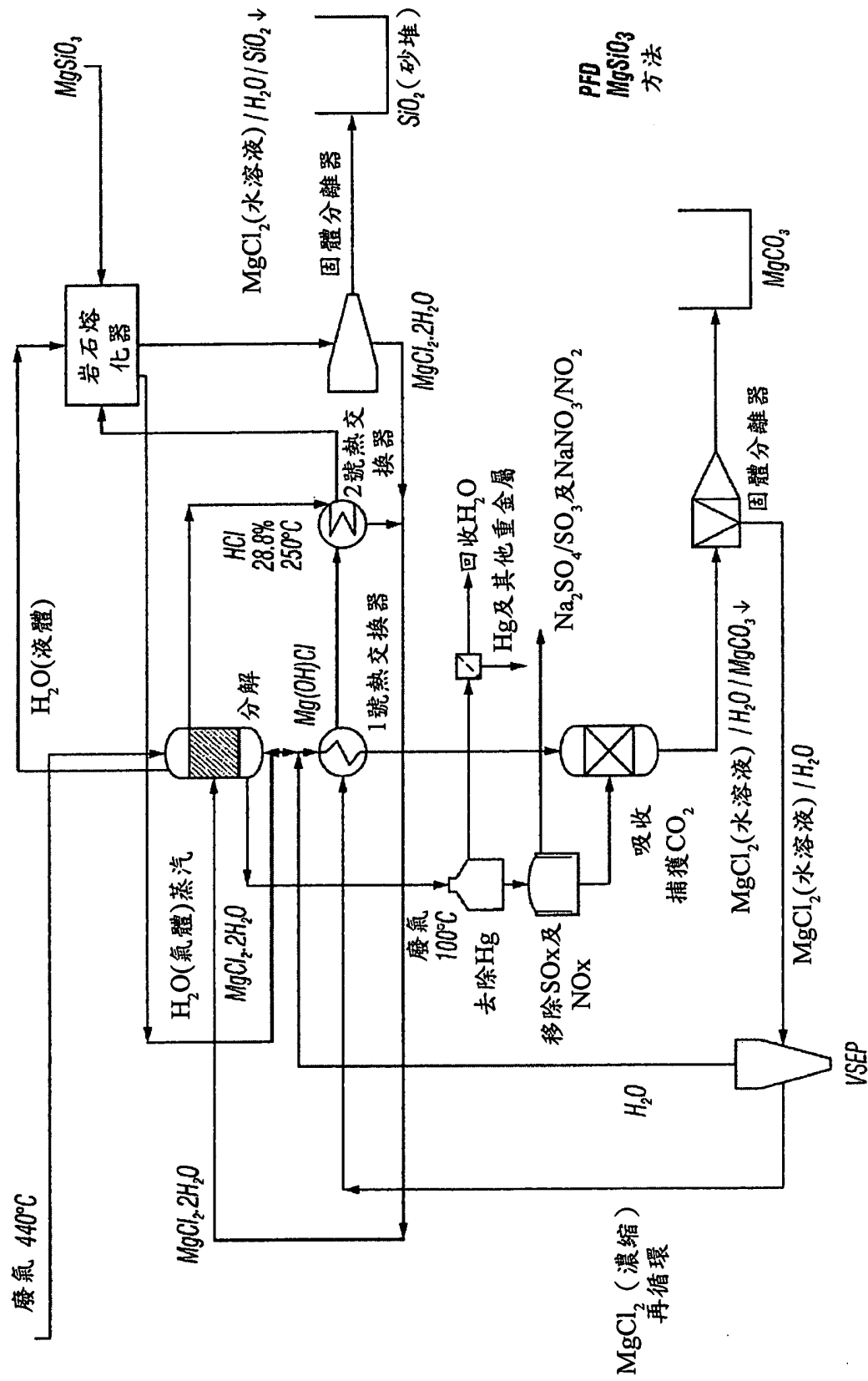


圖16

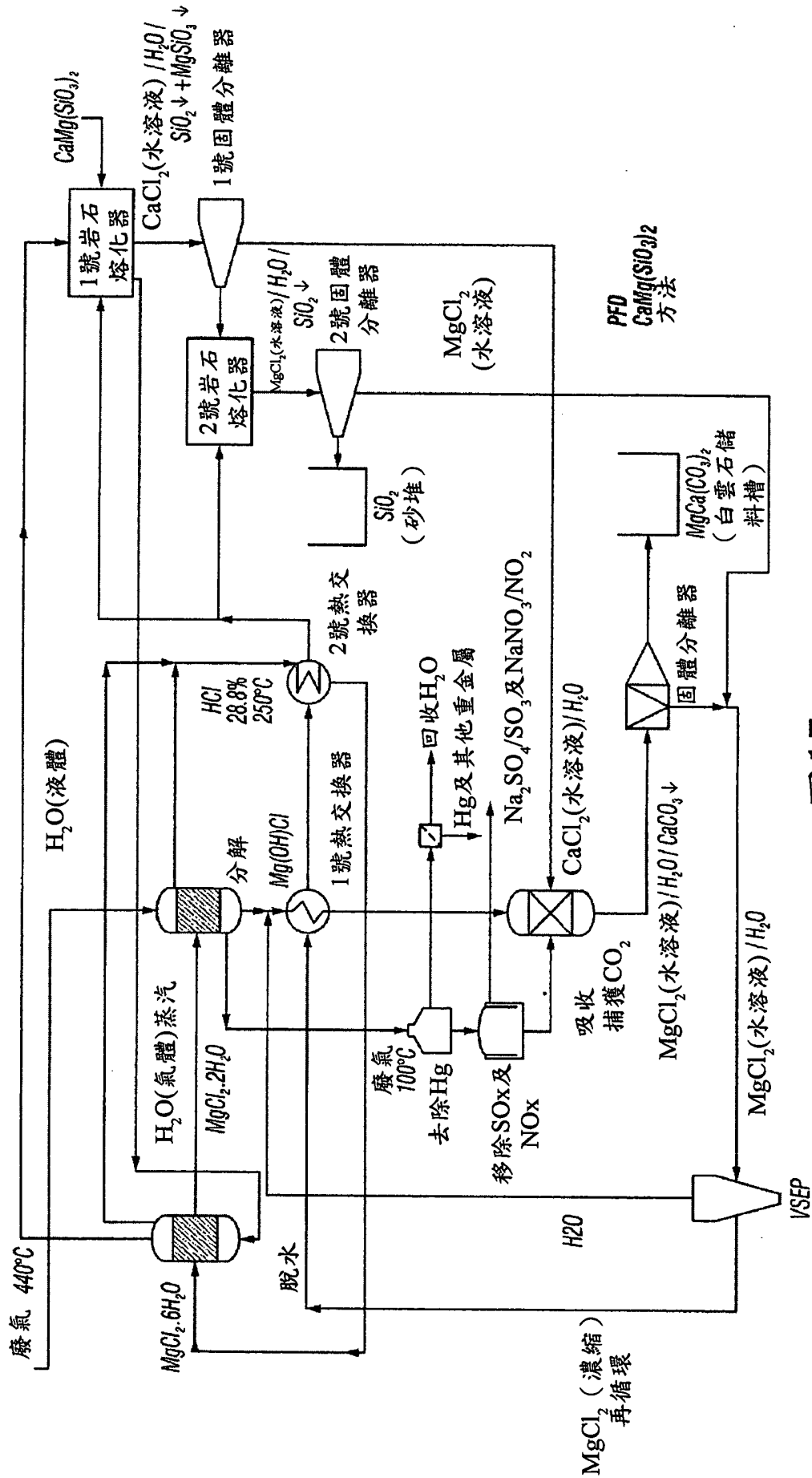


圖17











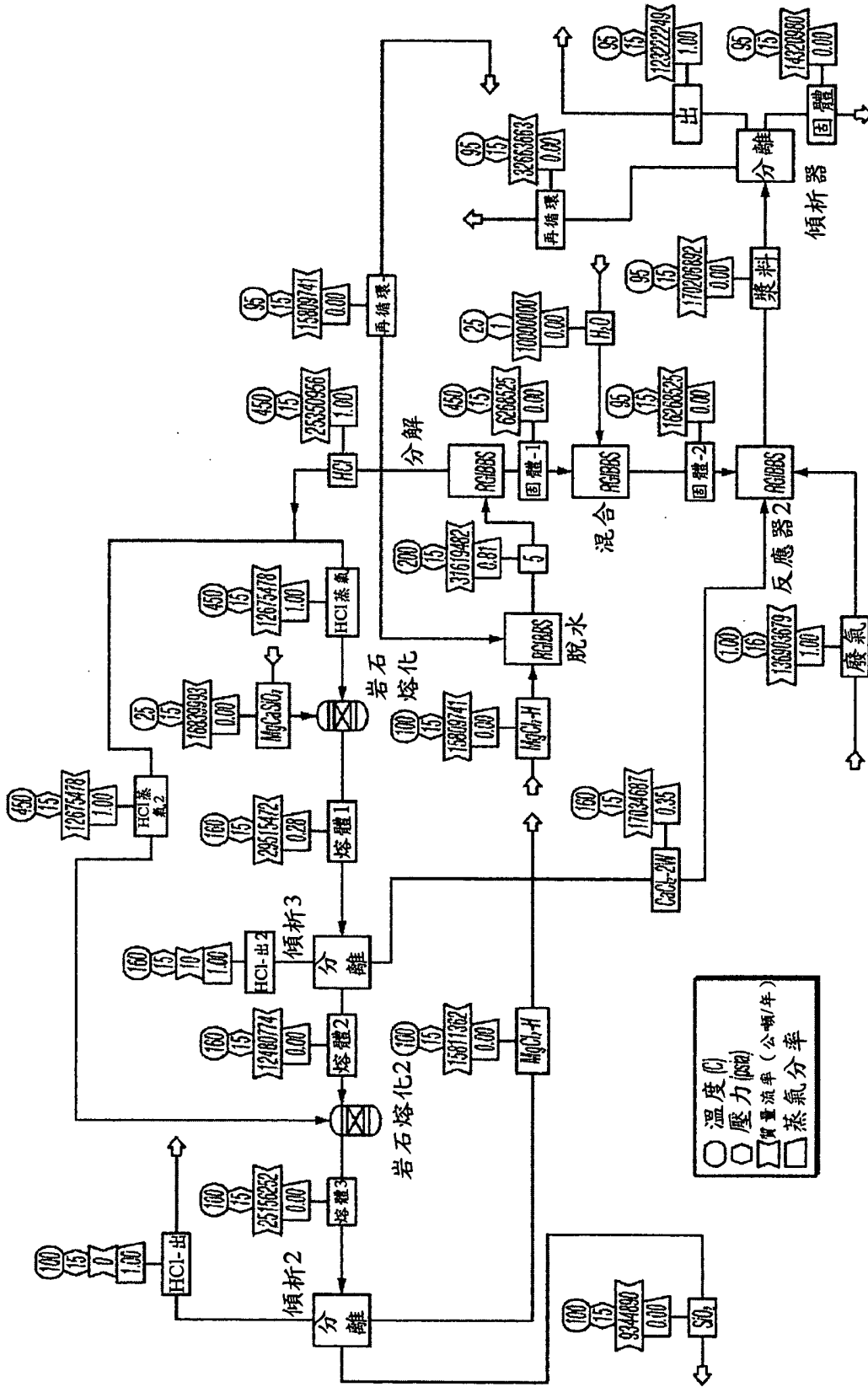


圖 23

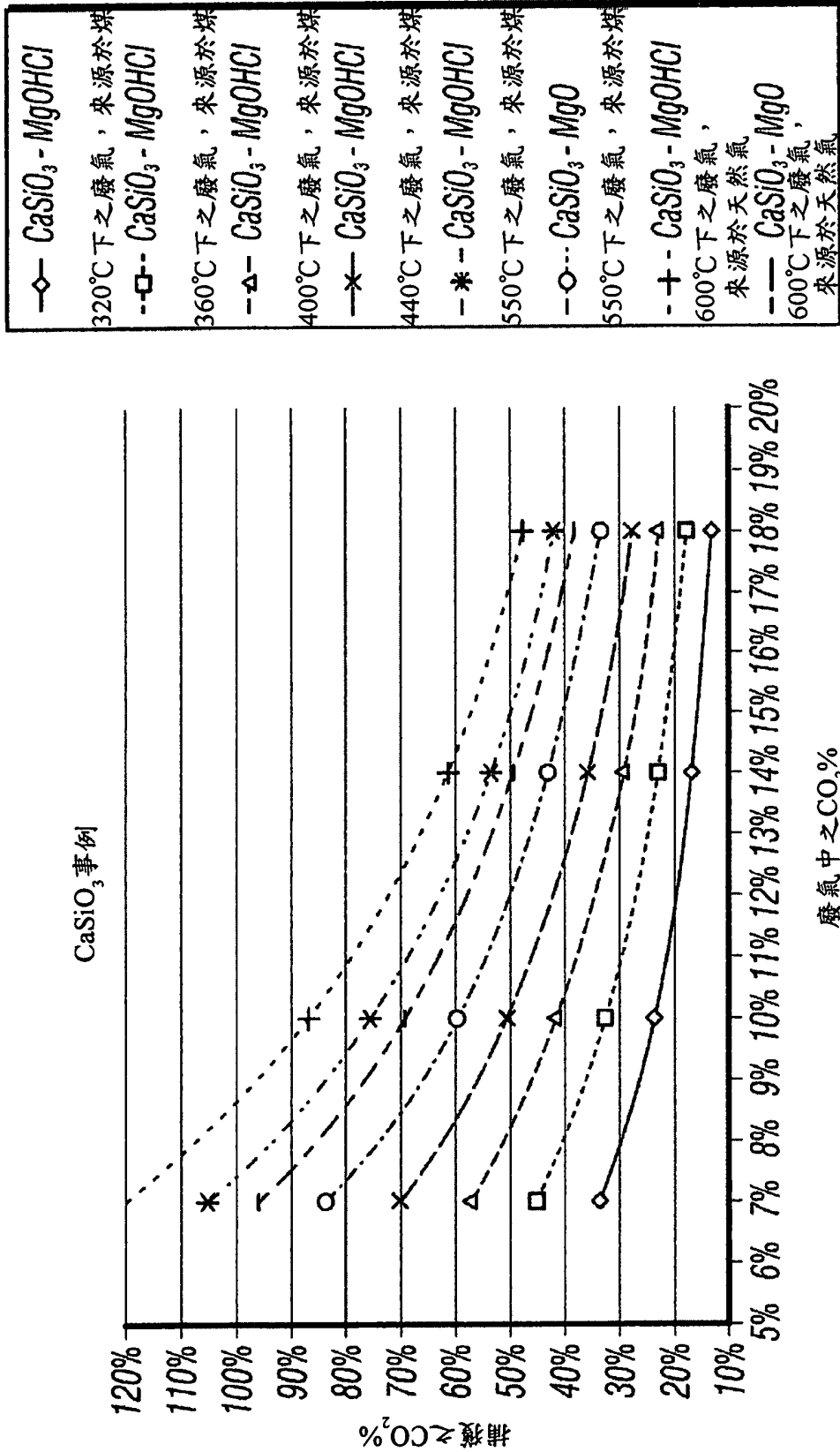


圖24

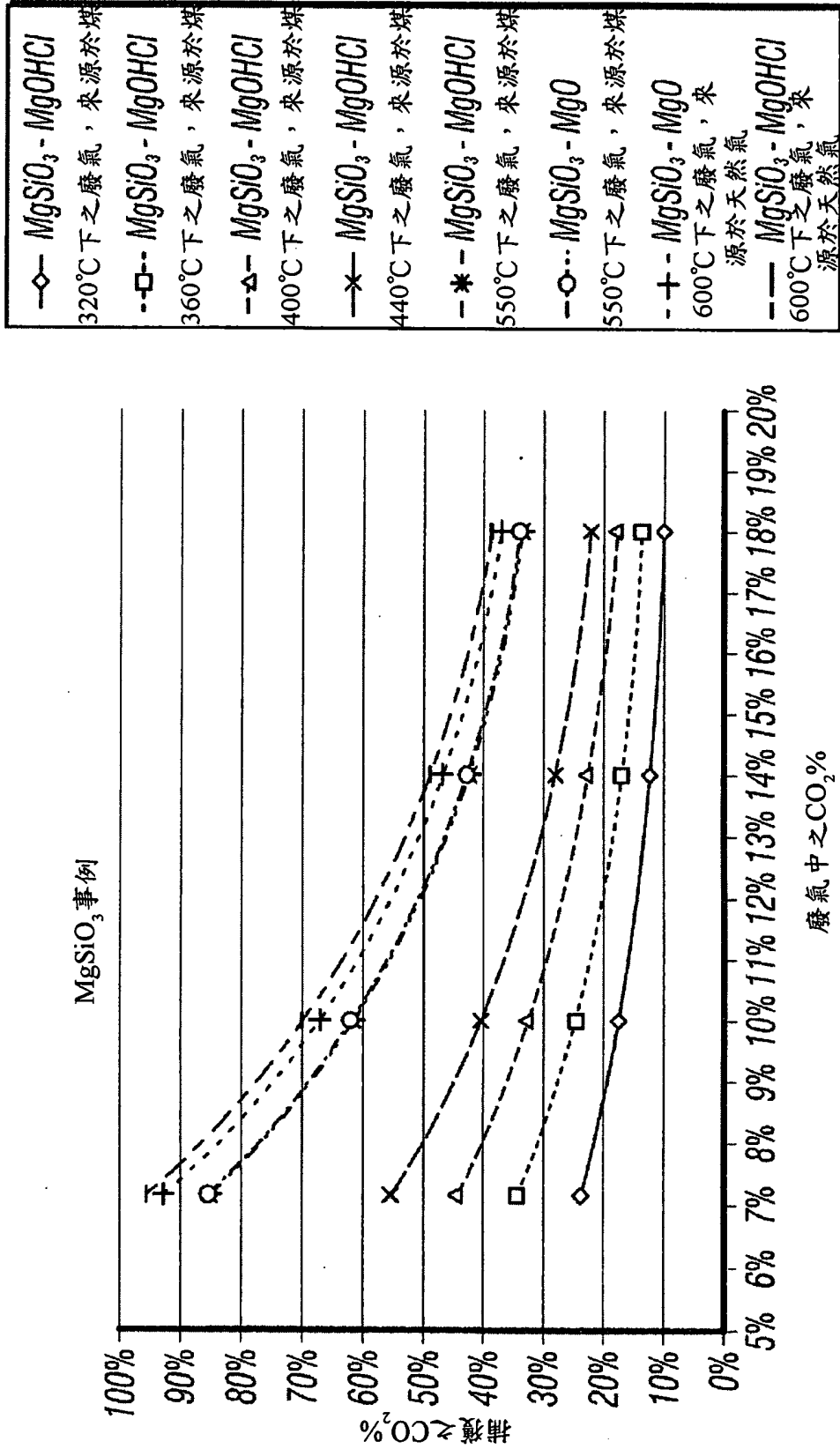


圖 25

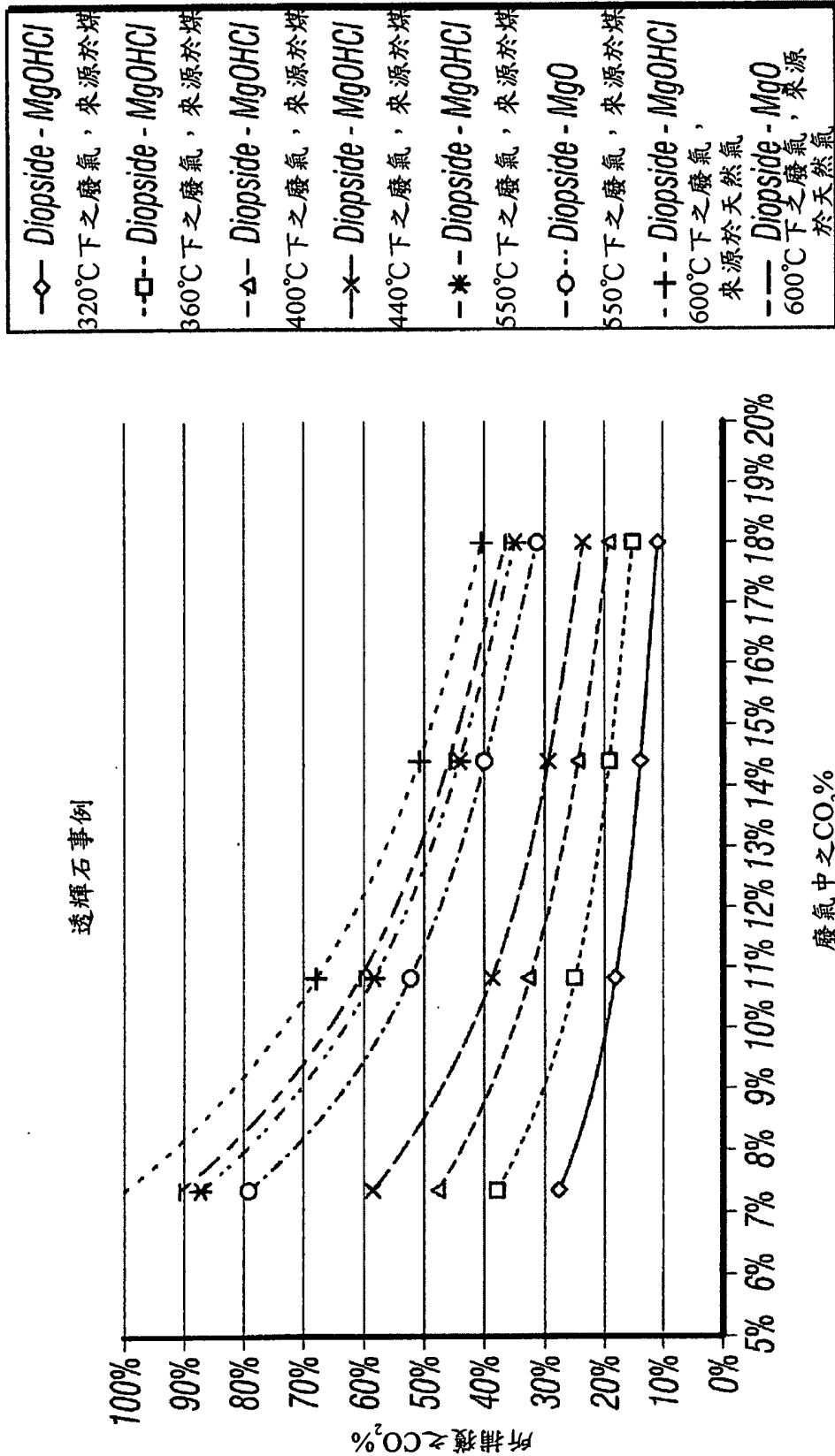


圖 26

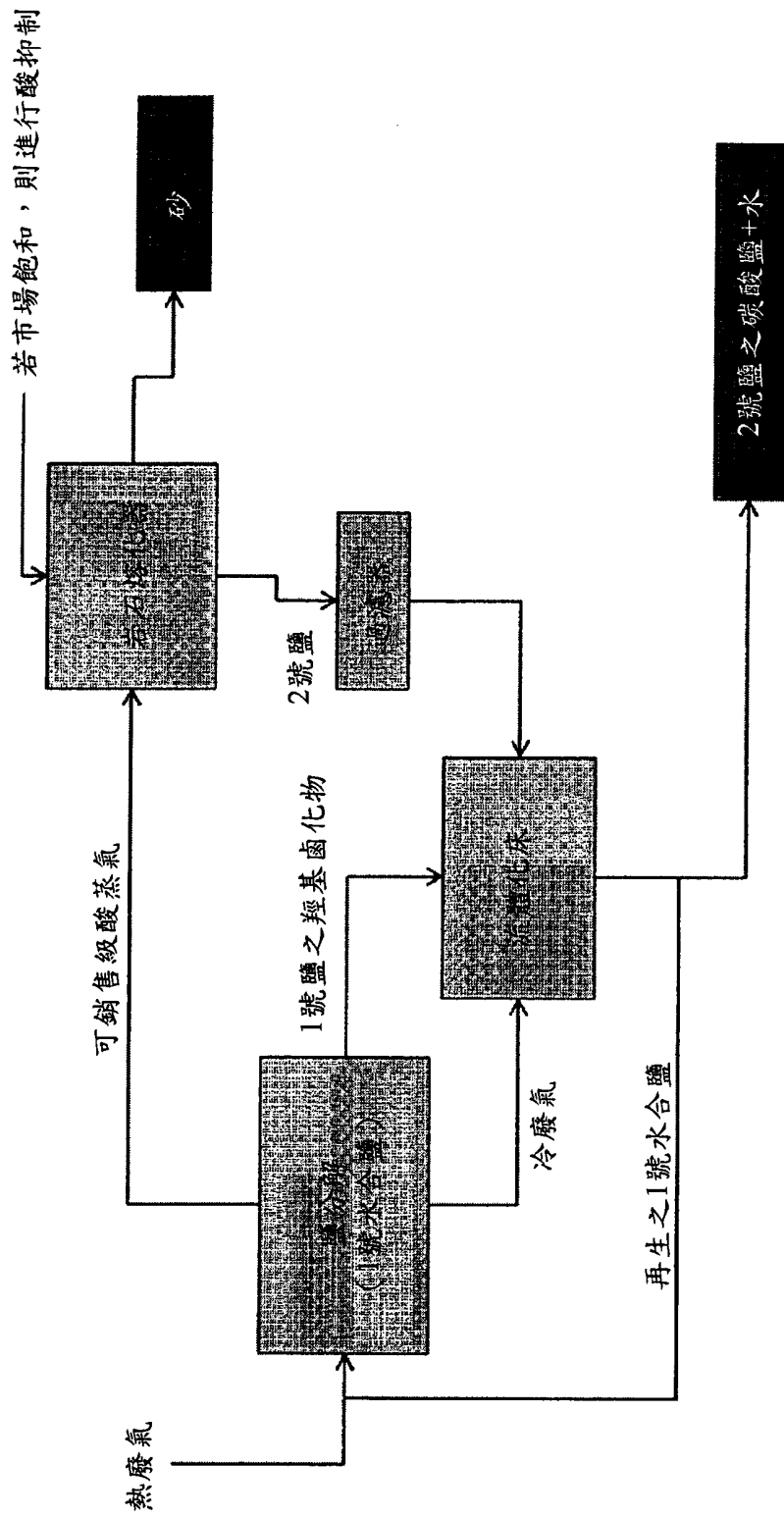


圖27

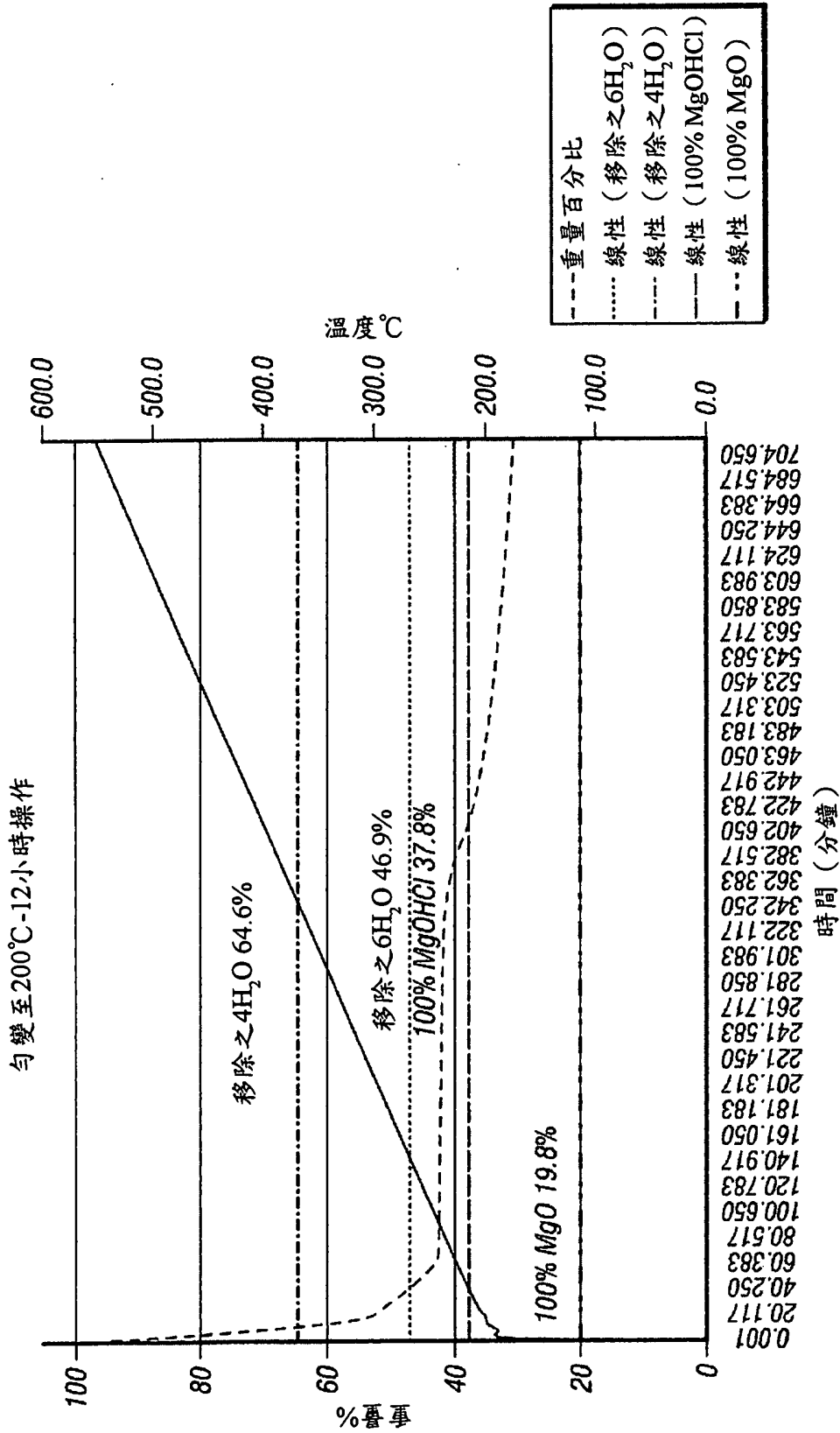
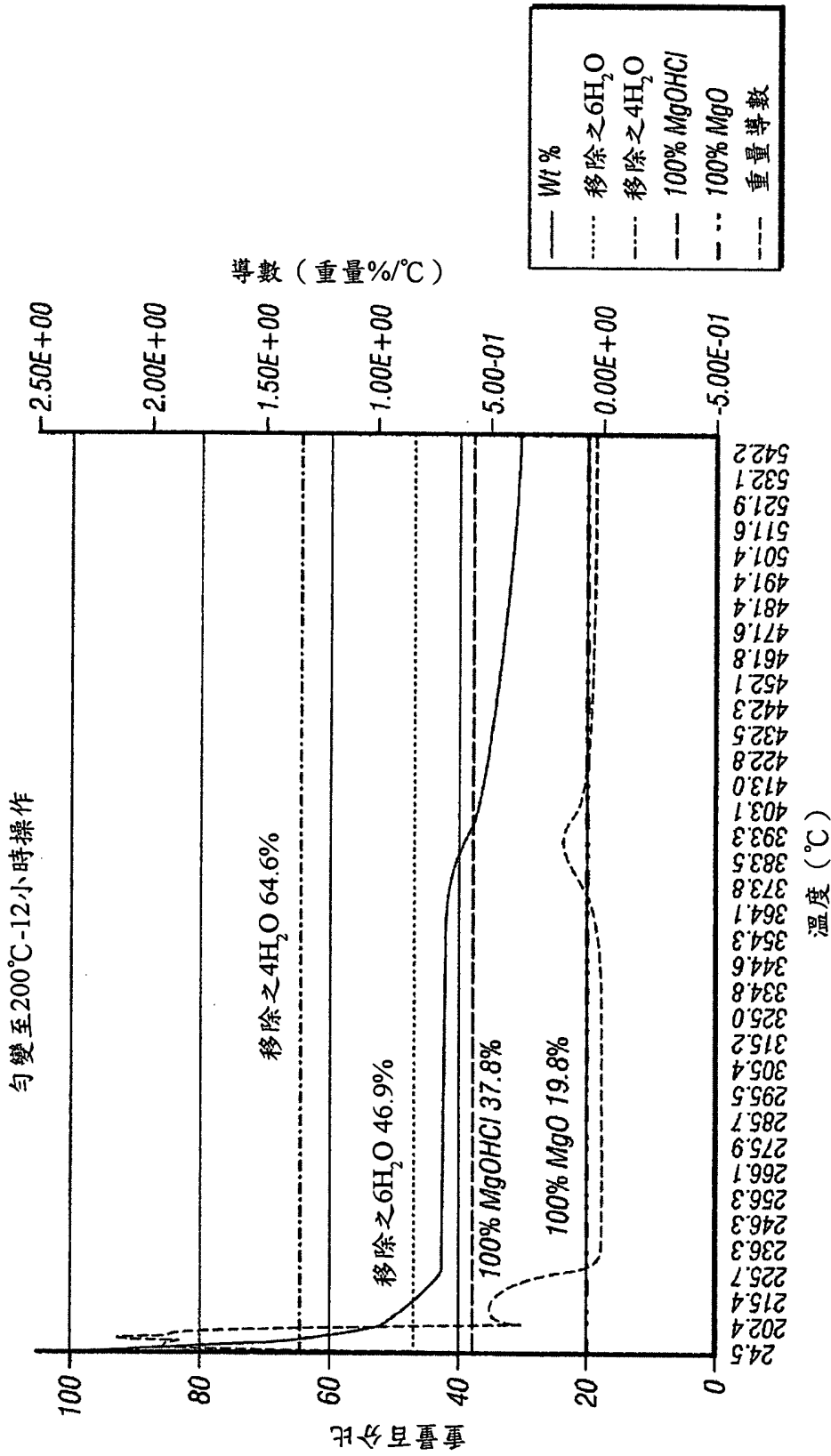


圖28



在500°C下1小時後之 $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ 分解

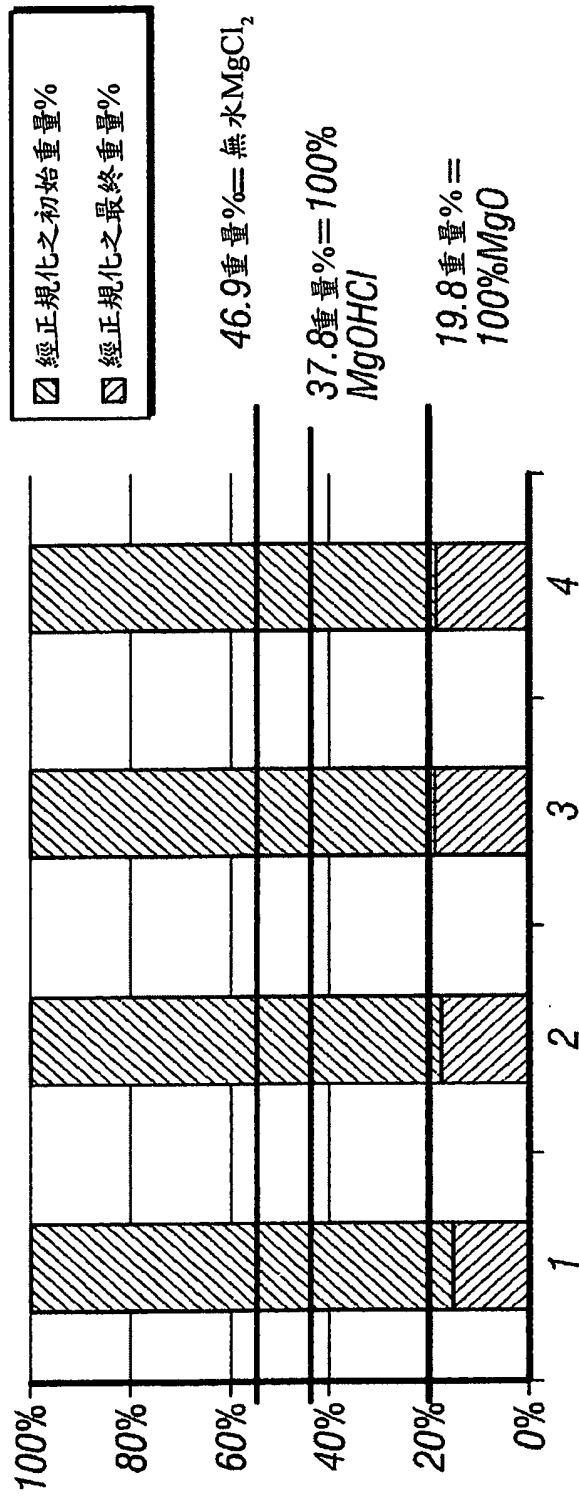


圖30

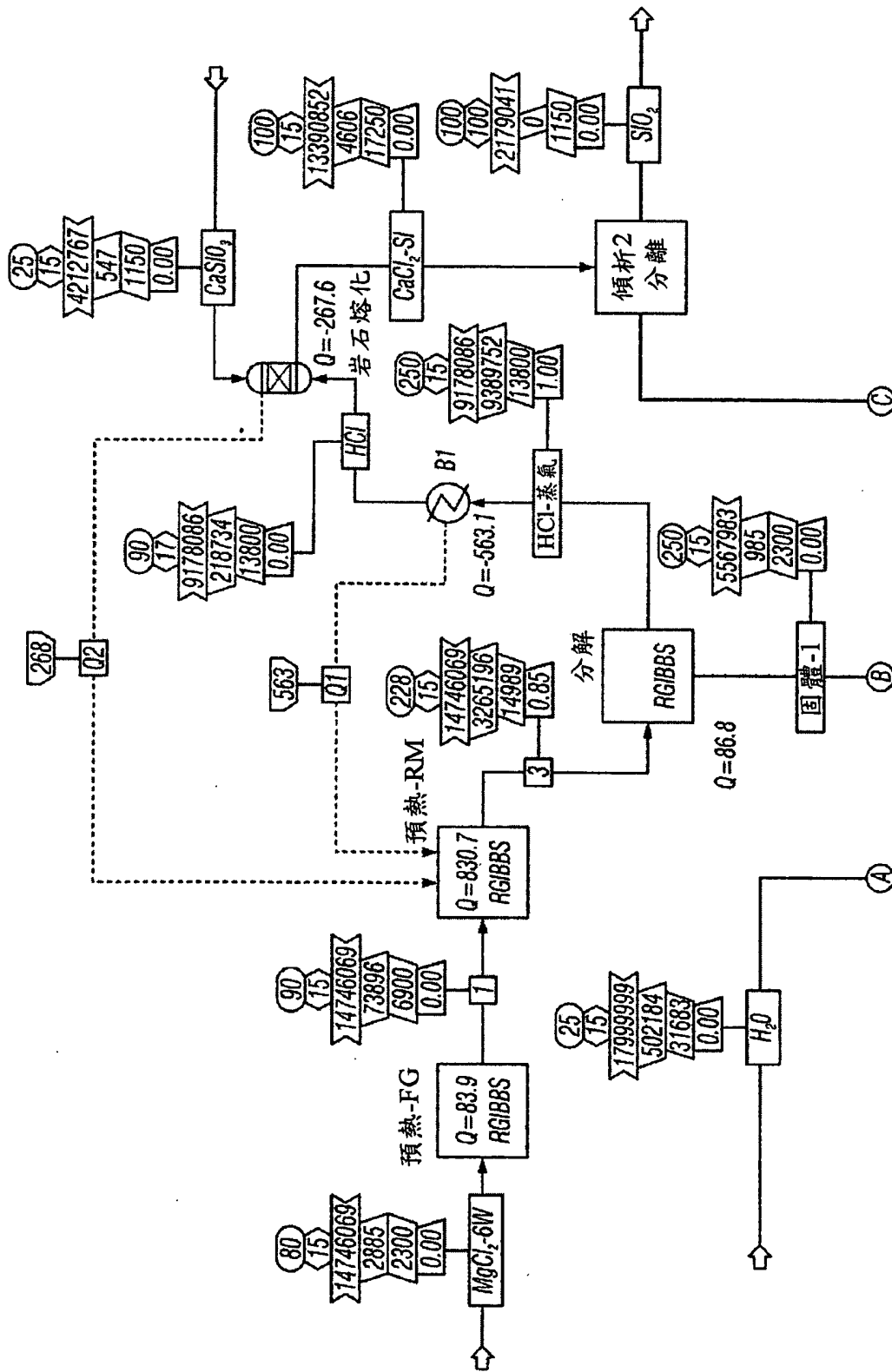


圖31



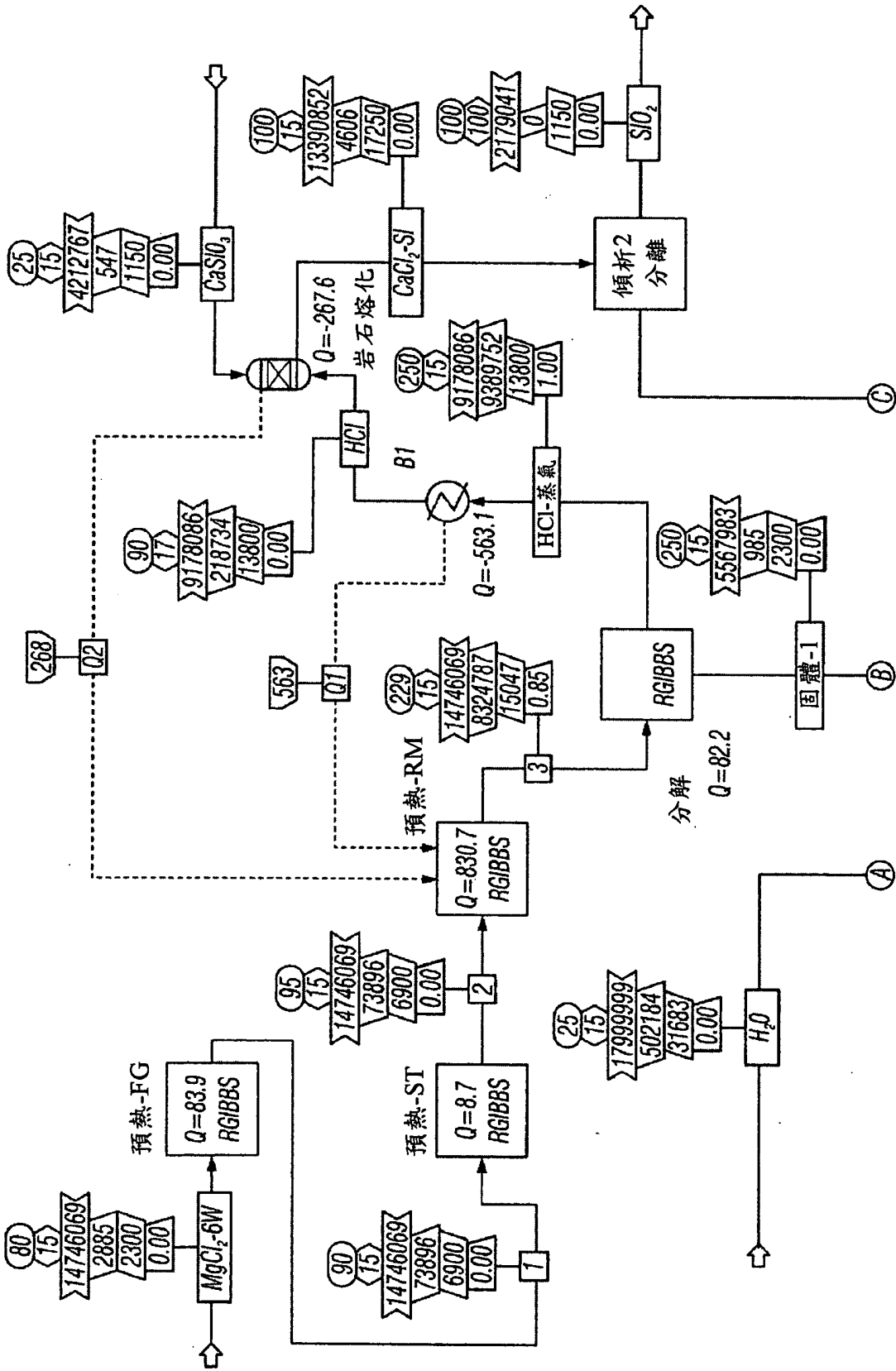
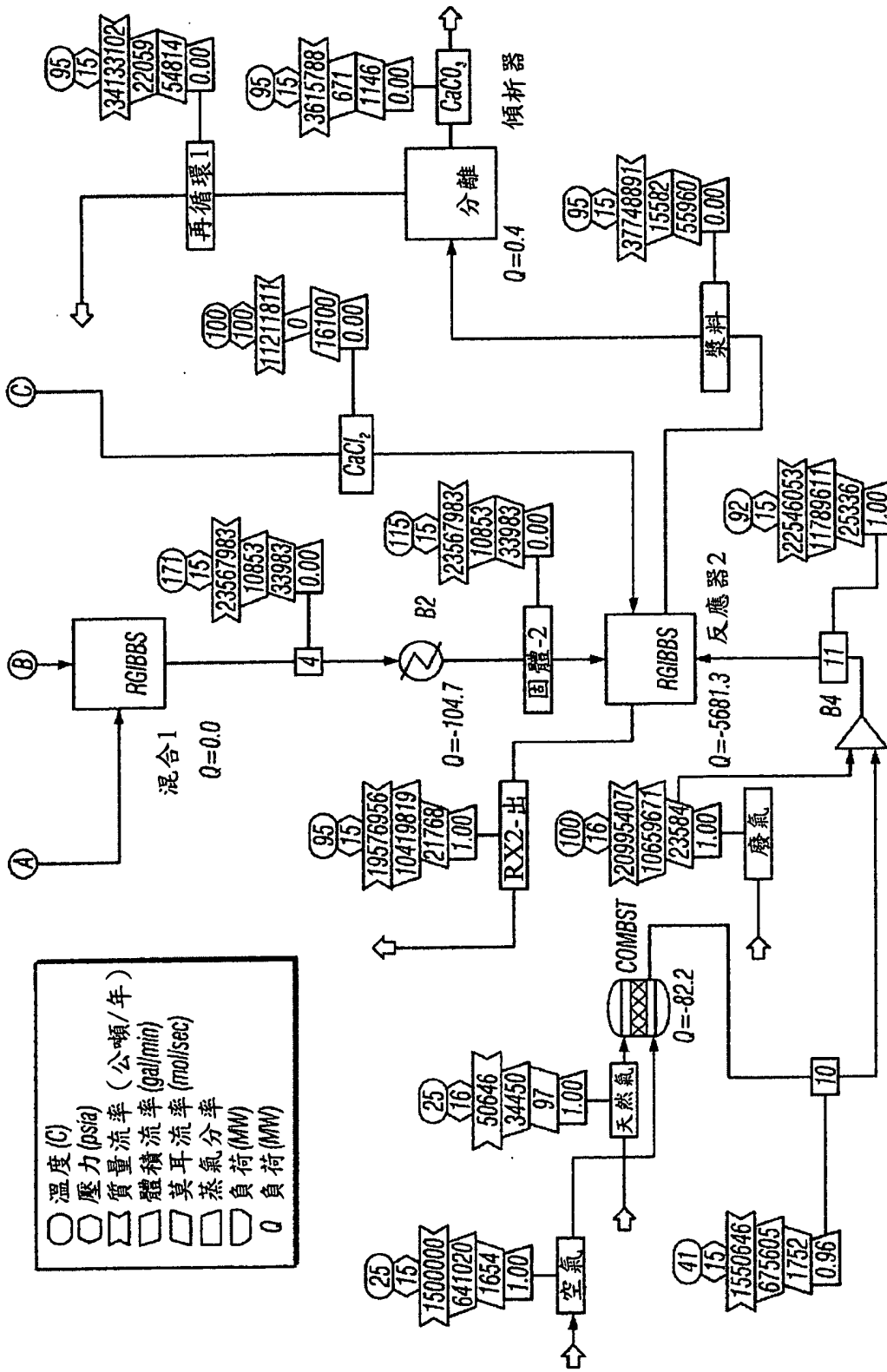


圖32



○ 溫度 (C)  
 ○ 壓力 (psia)  
 ○ 質量流率 (公噸/年)  
 ○ 體積流率 (gall/min)  
 ○ 莫耳流率 (mol/sec)  
 ○ 蒸氣負荷 (MW)  
 ○ 熱負荷 (MW)  
 ○ 0

圖32 (續)

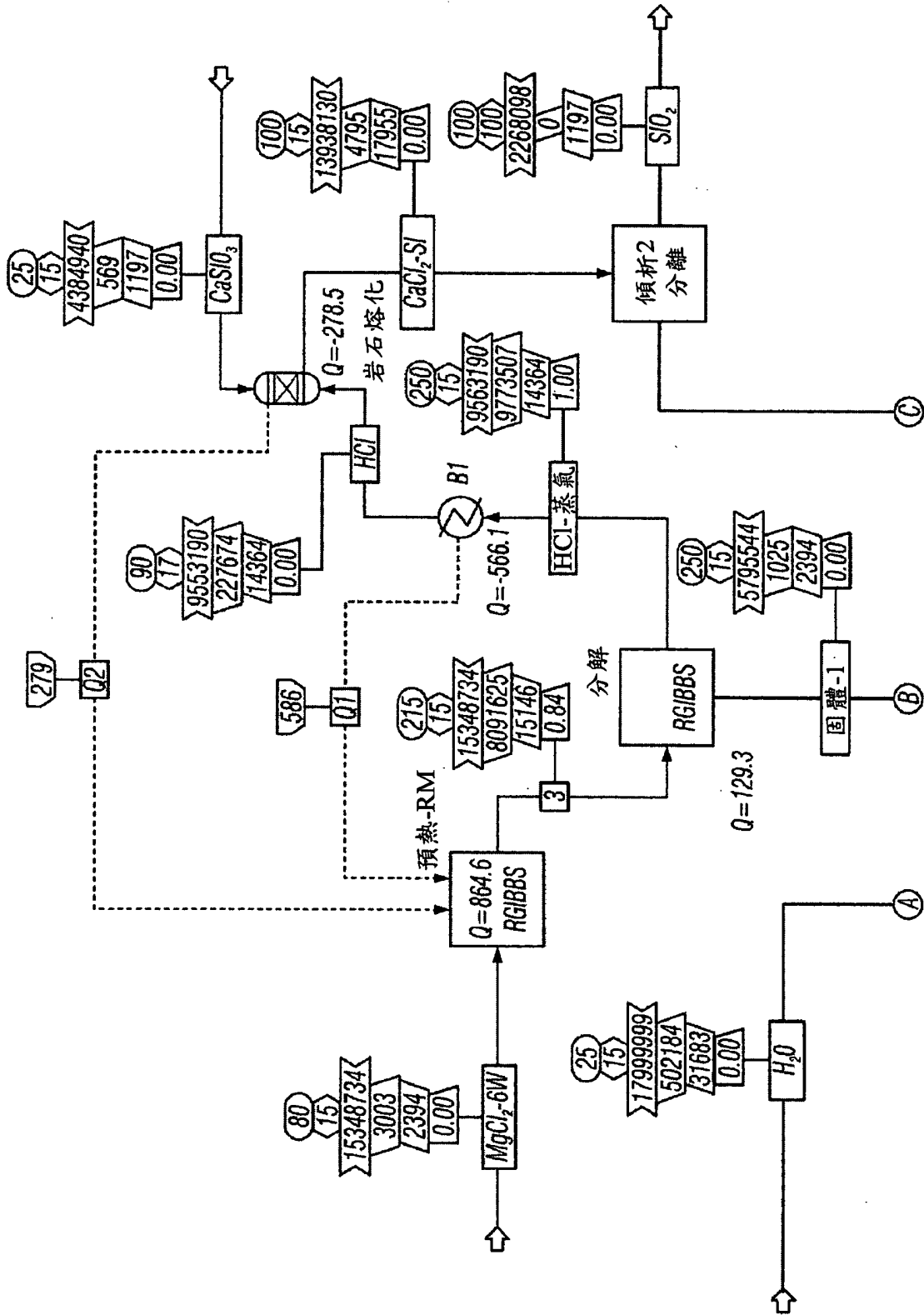


圖 33

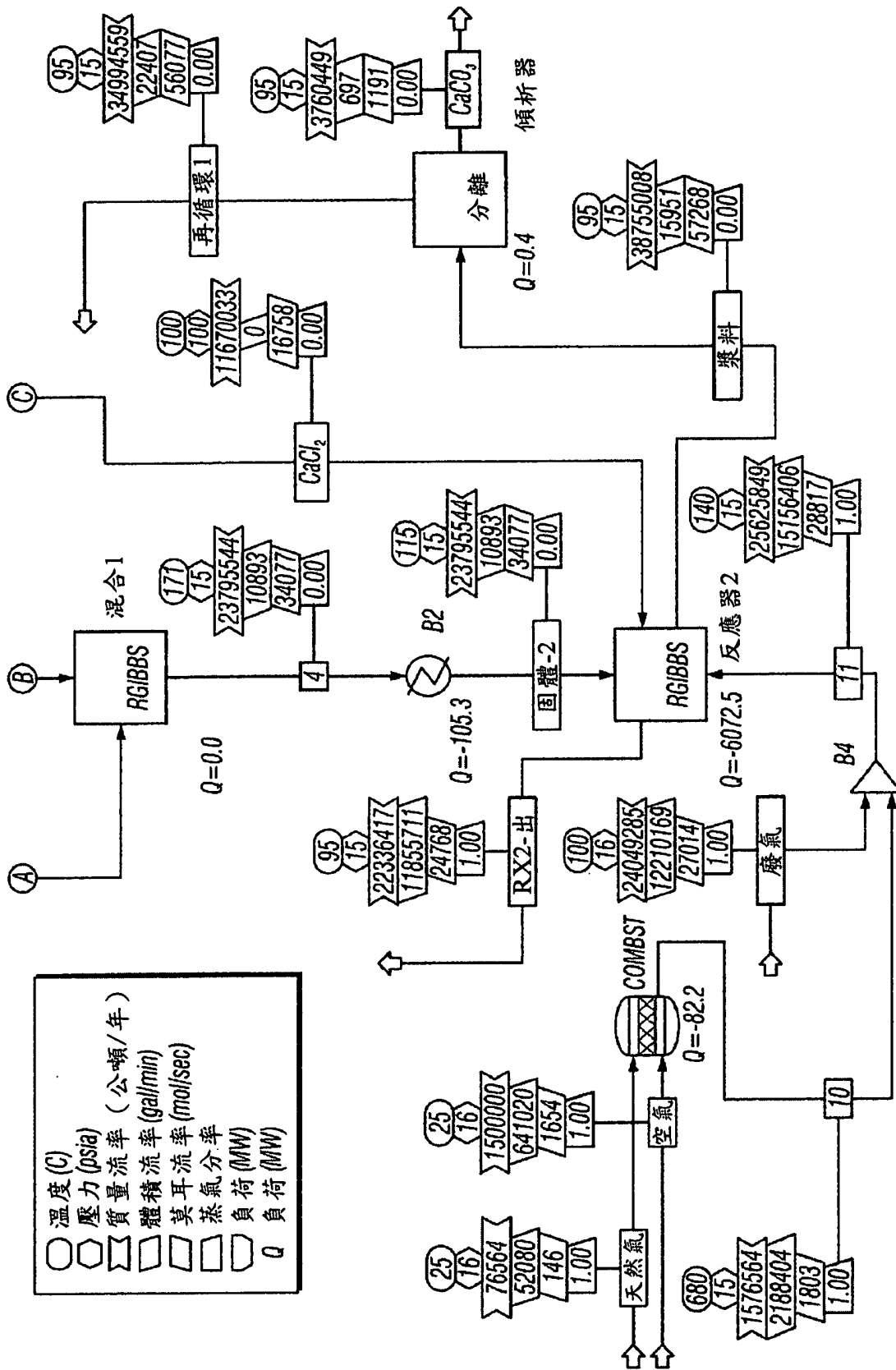


圖33 (續)

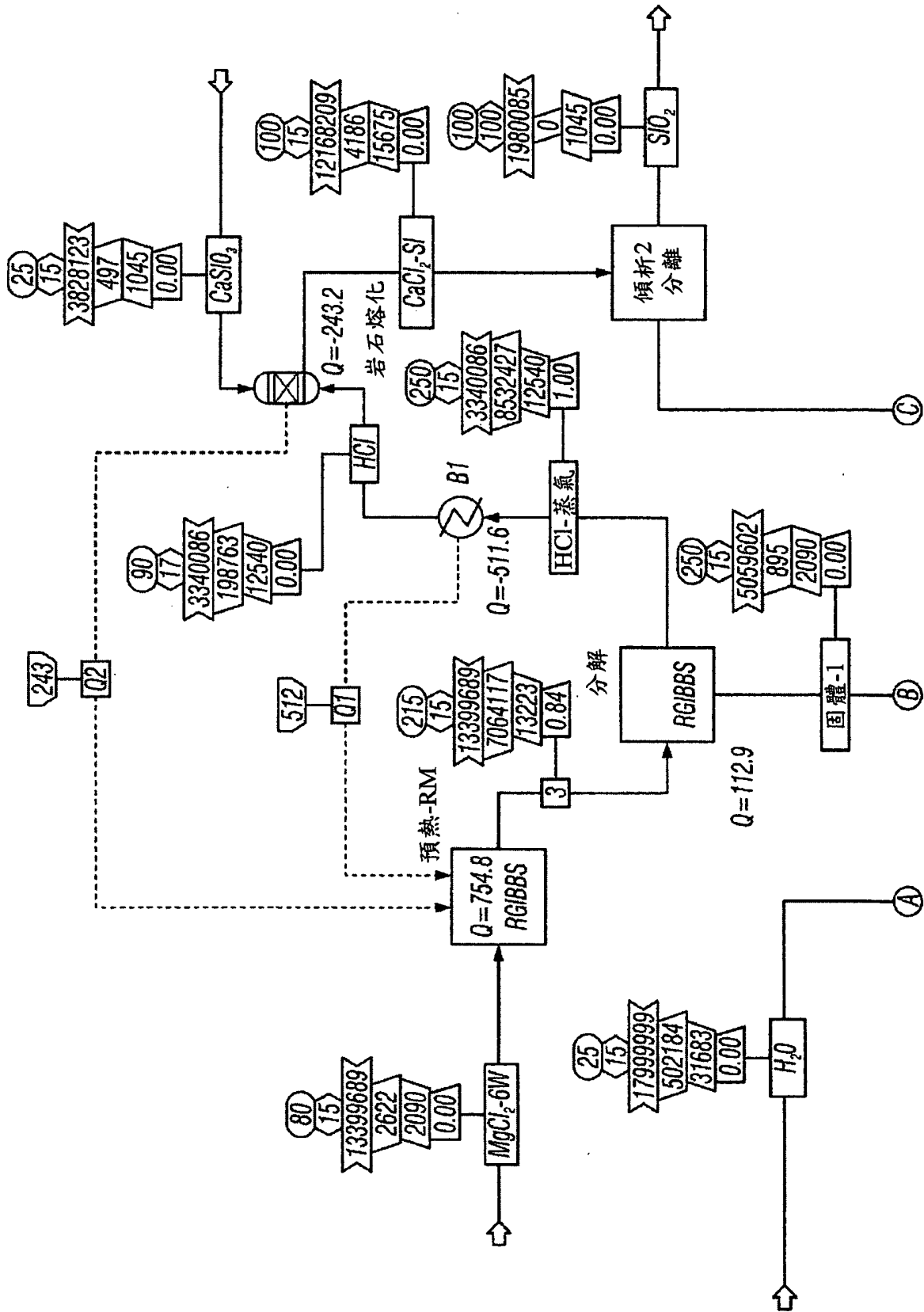


圖34

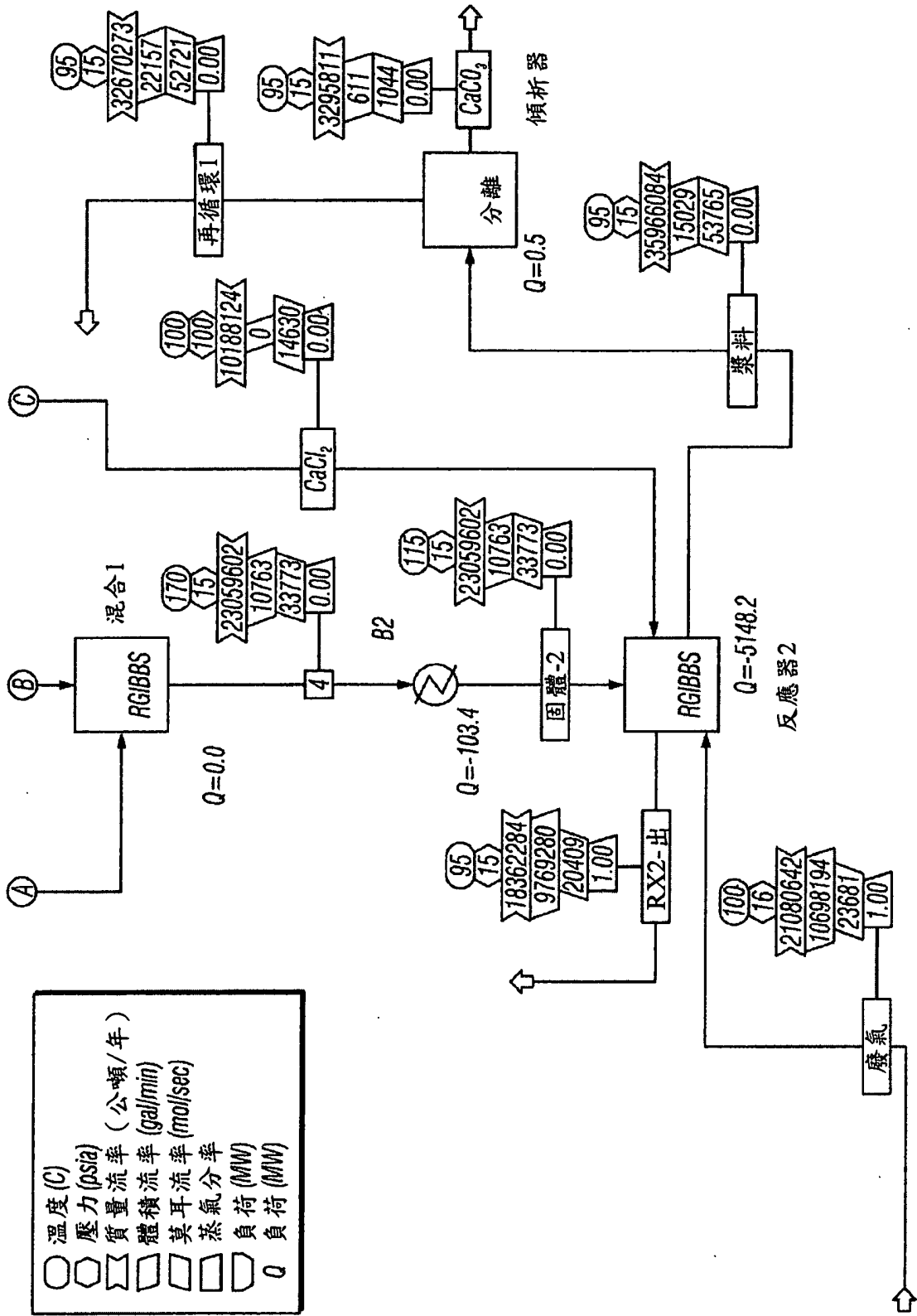


圖34 (續)

**四、指定代表圖：**

(一)本案指定代表圖為：第(1)圖。

(二)本代表圖之元件符號簡單說明：

10            反應器

20            反應器

30            反應器

**五、本案若有化學式時，請揭示最能顯示發明特徵的化學式：**

(無)