

高溫製氫和海水淡化的概念設計

工業技術研究院能源與環境研究所前研究員 / 呂錫民

關鍵字：核能製氫 (nuclear hydrogen production)；可用能 (exergy)；能源效率 (energy efficiency)；海水淡化 (seawater desalination)；成本估算 (cost estimation)

本研究提出模組化核能反應器用於製氫和淡化海水的概念設計。首先使用四步驟銅-氯 (Cu-Cl) 循環於製氫，接著耦合Brayton循環與燃氣渦輪機模組化氫反應器 (GT-MHR) 核系統發電，並使用GT-MHR系統的一小部分熱能來達到和維持Cu-Cl循環所需溫度，最後通過多級閃蒸 (MSF) 技術，將氫分解反應產生的熱量進行海水淡化。為了開發所提系統的計算模型，化學反應模擬器被使用。該概念設計的總體能源效率和可用能效率的計算結果分別為32.47%和52.20%，可產生0.2190 kg/s的氫氣和淡化4.9492 kg/s的海水。使用HEEP®估計產生氫氣的成本為2.77 \$/kgH₂。展望未來，配合高溫源（如第四代核反應器）的模組化，熱化學水解反應（如Cu-Cl循環），除了能夠滿足氫經濟概念的最高境界：氫、熱、電三相共生之外，餘熱尚可用於海水淡化，在有特殊能源及飲水需求下，如半沙漠地區和臺灣偏遠離島，該方法尤其適合使用。

一、前言

第四代核反應器是未來替代能源最可行的方案之一。在經驗積累之下，一些核系統具有很高的安全標準，除了滿足核廢料安全性和高燃燒要求之外，一些所謂的第四代反應器還可以很高的溫度運行，儼然成為當前工業界有關高溫技術的「當紅炸子雞」（Elder and Allen, 2009）。自從90年代以來，高溫核反應器（Very High-temperature Nuclear Reactor, VHTR）一直是「氫經濟概念（Hydrogen Economy Concept）」的絕佳選項（Smitkova et al., 2011）。製氫是氫經濟概念研究最多的議題。替代性製氫方法必須具有高效率、低環境影響和高生產率。因此，針對傳統方法（如，蒸汽重整和傳統電解），若干替代方法被開發。

製氫的熱化學循環在20世紀70年代蓬勃發展，建立不少大規模生產的施行方案，其



中Cu-Cl循環（General Atomics，Savannah River National Laboratory等）是美國開發的化學技術之一，當中有項反應要求是最高溫度需達550-600°C。這就是為什麼高溫源（例如VHTR）與其有所關聯的原因。這些高溫化學反應的存在使得重新利用排放熱量成為可能，因為它可以提高整個過程的效率。另外，在Cu-Cl循環的特定情況下，有研究建議可將餘熱用於海水淡化。（Locatelli et al., 2017）

舉例來說，在某些特定能源需求地點（例如半沙漠地區），第四代核反應器的模組化是特別有利的。因此，巴西、印度和中國等國家對此類技術表現出高度的興趣。另外，不少國際性工業機構也在研究中小型核反應器的模組化，以達到氫、熱、電三相共生及海水淡化的多功能目標（Locatelli et al., 2014）。該項核技術成功關鍵在於能源消耗、經濟社會和技術效率等方面的支持。幾個最負盛名的核氫生產研究小組利用化學反應模擬器開發若干概念設計。這類化學反應模擬器可對複雜系統（例如Cu-Cl循環）進行評估（Shin et al., 2012; O'Brien et al., 2010; Chukwu et al., 2008）。藉由流程圖的規劃，建構未來實際工廠藍圖，這些流程圖同時還能執行優化分析、效率計算和工廠規模確定。

本研究的主要目的在於：第一，開發和驗證計算模型，構建和分析概念設計，這是基於Cu-Cl循環且有海水淡化功能的製氫設

施，其中先進核反應器為主要能量來源，而化學反應模擬器Aspen Plus[®]則用於構建計算模型。第二，評估總體能源效率和可用能效率²，並分析主要循環成分，以獲得可用能和能源效率，同時提出簡約的成本估算，藉由HEEP方法計算製氫成本。

第2章簡要描述概念設計中的擬議系統，並對計算模型中的編程參數進行描述。第3章分別對每個子系統進行分析，估計每種情況下主要組件的可用能效率和能源效率，同樣在本章中，技統的總體效率和製氫成本被評算。第4章總結本論文的主要研究成果。

本概念設計係由四個子系統組成：燃氣渦輪機模組化氫氣反應器（Gas Turbine Modular Helium Reactor, GT-MHR）、Brayton循環、Cu-Cl循環和多級閃蒸（Multi-stage Flash, MSF）脫鹽。在該系統中，GT-MHR反應器產生的熱能分別供給Brayton循環及Cu-Cl循環，以進行發電與製氫，然後Cu-Cl熱化學循環的餘熱則進行海水淡化。

¹ Aspen Plus[®]（Advanced System for Process Engineering Plus）為美國Aspen Tech公司所開發的一套化工程序設計模擬軟體。目前最新版本為V11。

² 以熱力學定義，可用能（exergy）是在促使系統與熱源達成平衡的過程中，透過最大熵（entropy）的達成，獲取最大的潛在有用功。在理想狀態（熵 = 1）時，可用能效率可達到100%，當系統與環境達成平衡時則為零。能源效率（energy efficiency, η ）可由系統輸出能量除以輸入能量而得，可用能效率（exergy efficiency, ψ ）是系統運用可用能的衡量，相反地，可用能破壞率（exergy destruction rate, $\dot{E}x_d$ ）是資源退化的評估，其可指出系統中破壞可用能的元素。

二、系統說明

(一) GT-MHR

高溫核反應器是高溫反應器的後繼者，高溫核反應器研究始於1960年代初，是以包覆著燃料顆粒的方式運作。目前，在全球核工業發展下一代商用反應器（VHTR）之際，高溫製氫是最重要的應用之一。

Dragon反應器率先使用TRISO燃料顆粒（arbeitsgemeinschaft versuchsreaktor, AVR），目的在於測試其他燃料的使用、尋找更長的運行時間、以及更輕鬆的燃料測量和分析。同樣，Fort St. Vrain（FSV）原型機使用棱柱型燃料，以90 GWd/t速率燃燒鈦燃料，可讓蒸汽渦輪機的總熱能生產率達到39%（Yan and Hino, 2011）。在上世紀末，第一批高溫試驗反應器投入運轉，使用TRISO燃料的主要高溫反應器就有包括HTR-PM。該核電廠從2012年開始建造，原先預估在2018年底進入營運。

觀察目前世界上現有GT-MHR，燃氣渦輪機工廠設計是最重要的研究項目之一（IAEA, 2013）。GT-MHR開發案正在許多國家積極進行，使得高溫氣體反應器（HTGR）的能力和資源一直優化（Richards et al., 2006）。基本上，GT-MHR被認為是一個模組化的核反應器，每個模組容量約

有600MWth，核心出口最高溫度為950°C。（IAEA, 2013）

GT-MHR電廠的燃氣渦輪機動力轉換循環效率很高，循環熱效率約有48%，在電力生產市場中比任何化石或核電廠都具有工廠競爭力。與具有蒸汽循環的其他NPP相比，直接封閉式燃氣渦輪機循環的功率轉換被大大簡化，並減少了所需的設備和系統。

不包括機房在內的該電廠，其他主要組件包括：蒸汽發生器、蒸汽管線、冷凝器、除氧器等。電廠如此簡化及最低安全限度的目的在於，降低GT-MHR的土木建設、營運及維護的成本。除了具有更高的發電效率外，帶有燃氣渦輪機循環的GT-MHR具有更高的熱力學潛力以及餘熱利用上的設計機會。

依據參考文獻，GT-MHR的製氫應用已有數項研究在進行，例如硫碘和高溫電解（Linares and Moratilla, 2007），但沒有GT-MHR與Cu-Cl循環相互配合的製氫案例。

(二) Cu-Cl 製氫系統

在高溫技術中，研究最多的項目是氫氣的生產。儘管氫是宇宙最豐富的元素，但自20世紀70年代以來，產氫技術一直是能源界研究的議題，目標在於尋求大規模且高效



的產氫方法，主要驅動力來自「氫經濟概念（Hydrogen Economy Concept）」的引入，亦即，以氫代替石油成為全球能源系統的基礎。（Linares and Moratilla, 2007）

要言之，氫經濟概念由四大領域組成：生產、運輸、儲存和應用。目前它們處於不同的發展水平；但是，最熱門的領域在於應用，無論是運輸工具或其他中大型發電項目，氫應用具有可接受的發展水平，尤其是汽車工業，氫能車已成運輸革命的明日之星（Mazloomi and Gomes, 2012）。氫經濟中的運輸和儲存部分也在發展，但速度比不上應用，儘管有些技術已接近商業化階段。目前，實現氫經濟的關鍵在於產氫技術，因為當今氫原料的最大產量來自天然氣重整，但該方法具有許多缺點，包括：能源效率低、污染氣體排放水平高、以及對化石燃料的依

賴性強，替代性產氫方法必須開發出來，其中又以高溫產氫技術最受倚重。（Linares and Moratilla, 2007）

科學界數十年來一致認為，必須找到生產氫氣的替代方法，以克服當前技術缺點。因此，從70年代初以來，就有學者在研究所謂的熱化學水離解技術，透過幾種化學反應來解離水分子，以成為產氫的關鍵製程，其中研究最多的是封閉式Cu-Cl循環。從理論上講，該製程僅需添加熱量和 water，如圖1所示。

循環設計中有其他選擇，具體取決於化學反應步驟的數量。變型四步驟遵循圖1中概述的化學反應。Cu-Cl循環四步驟包括：水解反應、氧分解反應、乾燥反應和製氫電解反應。其中還需要一個乾燥氯化銅的中間步驟，但這不被認為是分解步驟，因為它僅為

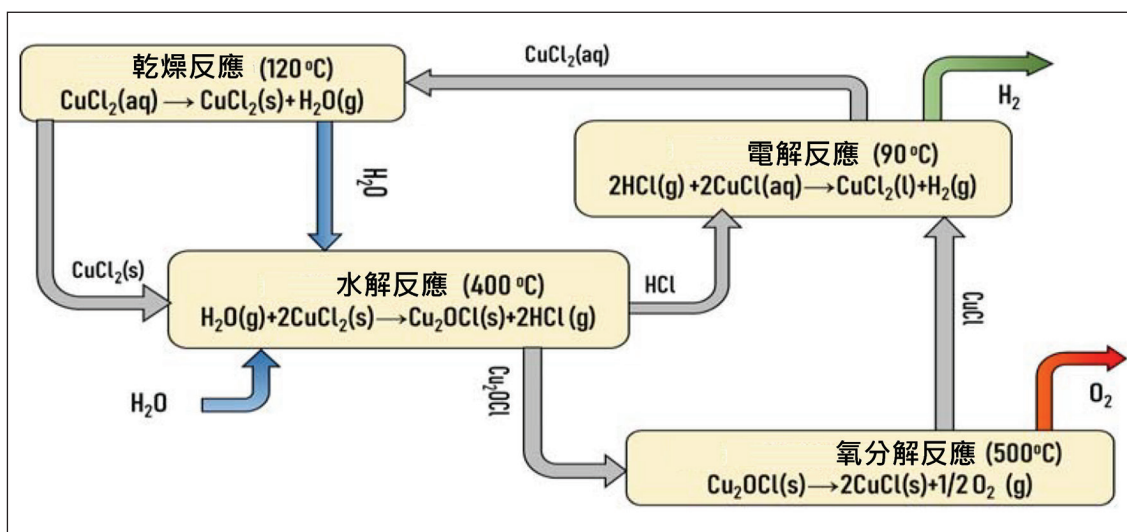


圖 1 Cu-Cl 循環四步驟

接下來的反應準備了反應物。(Al-Zareer et al., 2017)

該循環涉及最高溫度接近500°C的放熱和吸熱反應。Cu-Cl循環的主要優點有：

1. 製程最高溫度為 500°C，使得可與更多核反應器甚至太陽能等其他能源整合。
2. 製程中的化學成分成本不高，也不會有發生重大化學事故的威脅。
3. 製程中的所有步驟均經過實驗測試，包括化學反應效率。(Pope et al., 2016; Naterer et al., 2008; Ferrandon et al., 2010)
4. 與其他建議的循環相比，該製程中的固體處理量較小。

該方法的主要缺點在於：電解反應所需的電能過高、乾燥步驟對產氫的影響、以及對固體反應物的處理(Orhan et al., 2012)。但是，隨著Cu-Cl循環整合到核電反應器(例如GT-MHR)，電解成本高的缺點被最小化。Cu-Cl循環提出另一種提高效率的可能性，那就是氧分解反應產生的餘熱可用於海水淡化。(Al-Zareer et al., 2017)

模組化反應器的應用可能性，包括用於電力和氫氣熱電共生的GT-MHR，這從該反應器的設計階段就已揭示(Richards et al., 2005)。原則上，由於工作溫度範圍緣故，此類核系統的整合是有可能的，但是需要進行補充研究，以符合並達到氫經濟概念中大規模實施所需的效率水平。

(三) 海水淡化系統

海水淡化已有數百年歷史，人們對海水應用一直感到興趣。但直到數年前，由於材料、技術和系統的成熟，業界才有可行替代方法或可接受的效率來淡化海水。表1摘錄研究最多的技術及其優缺點。(El-Ghonemy, 2017)

其中所提出海水淡化技術使用較多的方法為多級閃蒸(MSF)，因為它的能源需求較低，非常適合熱電共生系統中的餘熱利用(Wu et al., 2012)。該方法係以閃蒸(Flash)為基礎，在驟沸情況下，海水被蒸發，從而降低與溫度升高相反的壓力。在每個階段中釋放的冷凝熱會在下一階段中增加進水溫度。海水淡化廠由一個熱輸入和幾個蒸餾部分組成，並在後者處釋放熱量。

該輸入能量是Cu-Cl循環中氧分解反應所釋放的熱量。每個階段的蒸發器由19-28個階段組成，工作溫度在90-120°C之間。在這些階段的每個階段，壓力都保持在低於飽和溫度壓力之下。(Khawaji et al., 2008)

(四) GT-MHR 與 Cu-Cl 和 MSF 系統的耦合

擬議的概念設計由一個GT-MHR模組化反應器組成，該反應器負責電網電力的生產，並為Cu-Cl循環提供必要的能量(熱和



表 1 主要的海水淡化技術

技術	優勢	劣勢
多級閃蒸 (MSF)	<ul style="list-style-type: none"> 給水鹽度靈活 產水純度高 生產力高 能源需求低 	<ul style="list-style-type: none"> 轉換率低 (30-40%) 需要在入口處進行預處理 轉換成本高 建設成本高
多效脫鹽	<ul style="list-style-type: none"> 產能高 投資成本低 純度高 (<30 ppm) 能量需求與純度無關 	<ul style="list-style-type: none"> 取決於可用電力 施工期長 水質難以控制 高的材料要求
蒸氣壓縮	<ul style="list-style-type: none"> 純度高 (<30 ppm) 高操作負荷 施工期短 靈活的操作和生產 	<ul style="list-style-type: none"> 運營成本高 能耗高 缺乏水質控制
加濕除濕	<ul style="list-style-type: none"> 操作溫度低 能源需求低 投資成本低 適合搭用再生能源或剩餘能源 	<ul style="list-style-type: none"> 生產力低 改善潛力有限 取決於進水口溫度
逆滲透	<ul style="list-style-type: none"> 適用於海水 根據水質的靈活度 能源需求低 操作簡單 	<ul style="list-style-type: none"> 水質低 運營成本高 操作壓力高 施工期長
電滲析	<ul style="list-style-type: none"> 運營成本降低 靈活的電力來源 高轉換率 (80%) 純度受進水水質的影響 	<ul style="list-style-type: none"> 生產水平較低 需要處理 能耗低

電)，如圖2所示。來自 Cu_2OCl_2 分解反應的產物將供給脫鹽系統。提議系統的所有參數匯總在表2。

GT-MHR的模組化特性使能量轉換循環可放在與由交叉容器連接的反應器的相鄰容器中。根據對GT-MHR反應器的最新調整，來自反應器容器的額定氮流量為321 kg/s，該交叉容器可分為兩部分，一部分為279 kg/s用於相鄰容器中的Brayton循環，另一部分為42 kg/s用於Cu-Cl循環 (Richards et al., 2006)。

在能量轉換循環容器中，假設渦輪機效率為98%，通過Brayton循環可產生292 MWe電力 (IAEA, 2013)。儘管這些能量一部分將用於多個Cu-Cl循環組件，例如電解反應器，但大部分能量將併入電網。

另一方面，流量為42 kg/s的氮氣被帶到IHX型熱交換器，其中熱量被轉移到另一氮氣迴路，大多數作者建議使用第二條氮氣迴路以提高製程安全性 (Elder and Allen, 2009)，主要原因在於此一氮流動可將化學反應周期維持在自然發生的建議溫度範圍內。

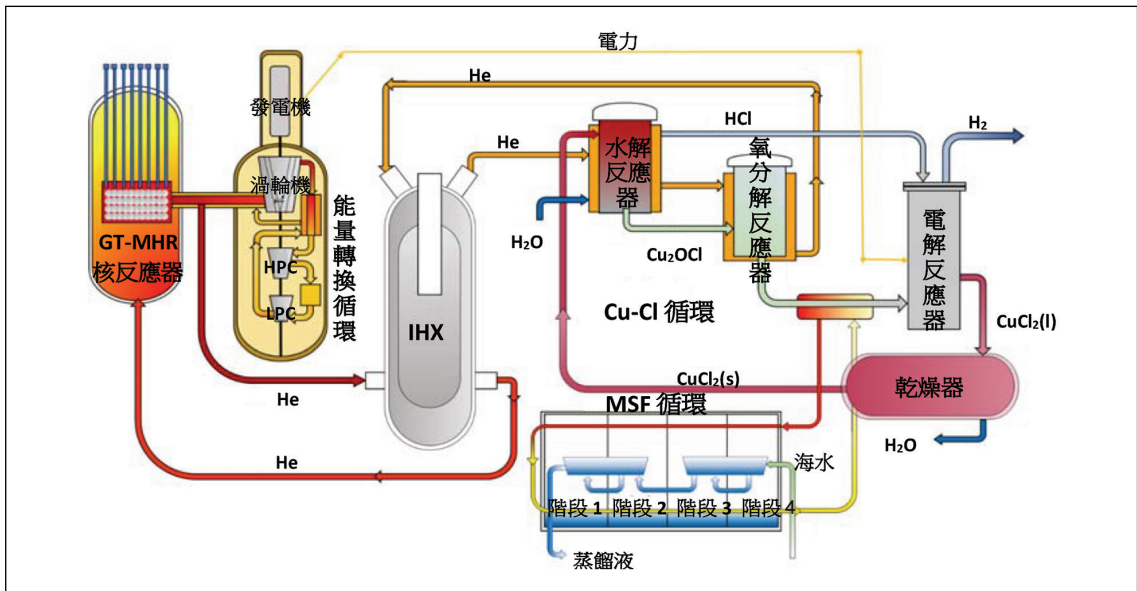


圖 2 用於製氫和海水淡化集成系統的 GT-MHR 與 Cu-Cl 技術說明

表 2 擬議系統的主要參數

子系統	參數	數值
GT-MHR (Richards et al., 2006)	核心出口的氦氣溫度	950°C
	核心入口的氦氣溫度	590°C
	核反應器的工作壓力	7.07 MPa
	氦氣流量	321 Kg/s
IHX (Richards et al., 2006)	功率	58.7 MWth
	UA	4.09 W/°C
	LMTD	143.5°C
	主迴路溫度	950/679°C
	次迴路溫度	292/917°C
	主迴路壓力	7.0/6.93 MPa
Brayton 循環 (Richards et al., 2006)	次迴路壓力	6.0/5.94 MPa
	產生電能	292 MWe
	燃氣渦輪機機械效率	0.98
Cu-Cl (Al-Zareer et al., 2017)	進入燃氣渦輪機的氦氣流量	279 kg/s
	水解反應器工作溫度	400°C
	水解反應器工作壓力	0.20265 MPa
	氧分解反應器溫度	500°C
	氧分解反應器壓力	0.101325 MPa
	電解反應器工作溫度	90°C
	電解反應器工作壓力	0.101325 MPa
	電解反應器功率要求	5.1 kJ/molH ₂
	乾燥機工作溫度	120°C



氧分解反應具有餘熱，可通過回收再利用，如使用MSF的海水淡化系統。在MSF系統中，四個閃蒸分離器以90°C溫度運行，系統的海水流量為5.57 kg/s，依據Ma et al. (2013)，鹽度設為500 ppm。

三、擬議概念設計分析

三種不同系統（Brayton氣體循環、製氫和脫鹽）的整合是一項複雜的任務。本文主要目標之一是獲得及分析完整的製程。為了分析提出的概念系統，使用化學反應模擬器Aspen Plus®建立計算模型（I. Aspen Technology, 2000）。由於單元操作和化學成分的多樣性，該模型是科學界研究製氫系統最認可的工具之一。此外，它具有廣泛的數據庫和化學模型，適用於解決諸如Cu-Cl循環模擬和MSF脫鹽的問題。使用Aspen Plus®的一個缺點是在Cu-Cl循環中，無法安裝所啟用化學成分的特性及相關性，因為它們未包含在數據庫中。在這種情況下，這些數據是從Al-Zareer et al. (2017)發表的論文中取得。

在構建Aspen Plus®系統流程圖時，我們採用以下幾個假設³：

1. 模擬組件處於穩定狀態並以額定參數運行

³ 本質上，Aspen Plus®應用目的在於設計化工程序，以質量、能量和可用能平衡三大定律，最佳化熱力學效率，可視為一概念設計軟體，實際工程中的流體力學問題，例如，動能與重力變化、管道摩擦、壓降、熱損等因素，是不會影響本研究的設計結果。

2. 忽略動能和重力的變化
3. 忽略製程中組件、管道和接頭的熱損失
4. 不考慮管道中的壓降

獲得正確製程描述的關鍵因素在於，為模型選擇一套適當的屬性組。Aspen Plus®針對此類問題所建議的解決方法是，氣態物質使用Peng-Robinson，固體化合物使用solids（Al-Zareer et al., 2017）。實施流程圖的假設和屬性的正確選擇在於，Aspen Plus®建議系統中要有前後一致符合的模型。

依據Aspen Plus®所開發的創新概念設計如圖3所示，在該完整的模型流程圖中，包括三個子系統：供能的Brayton循環、製氫的Cu-Cl循環、及脫鹽的海水淡化。假設模型是在穩定狀態中進行，根據質量、能量和可用能的三大平衡定律，可以計算出詳細的能源和可用能效率，詳細公式如下所示：

$$\sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} = 0 \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{in} - \dot{W}_{out} = \sum_{out} \dot{m}(h_{pr} - h_0 + h_f) - \sum_{in} \dot{m}(h_{pr} - h_0 + h_f) \quad (2)$$

$$\dot{E}_{x_{Q_{in}}} - \dot{E}_{x_{Q_{out}}} + \dot{E}_{x_{W_{in}}} - \dot{E}_{x_{W_{out}}} = \sum_{out} \dot{m}_{out} ex_{out} - \sum_{in} \dot{m}_{in} ex_{in} + \dot{E}_{x_d} \quad (3)$$

這裡的 \dot{m} 用來表示流量， \dot{W} 表示功率， \dot{Q} 表示傳熱率， \dot{E}_{x_d} 表示可用能破壞率， ex 表示比可用能， $\dot{E}_{x_{Q_{in}}}$ 表示傳熱率（公式為

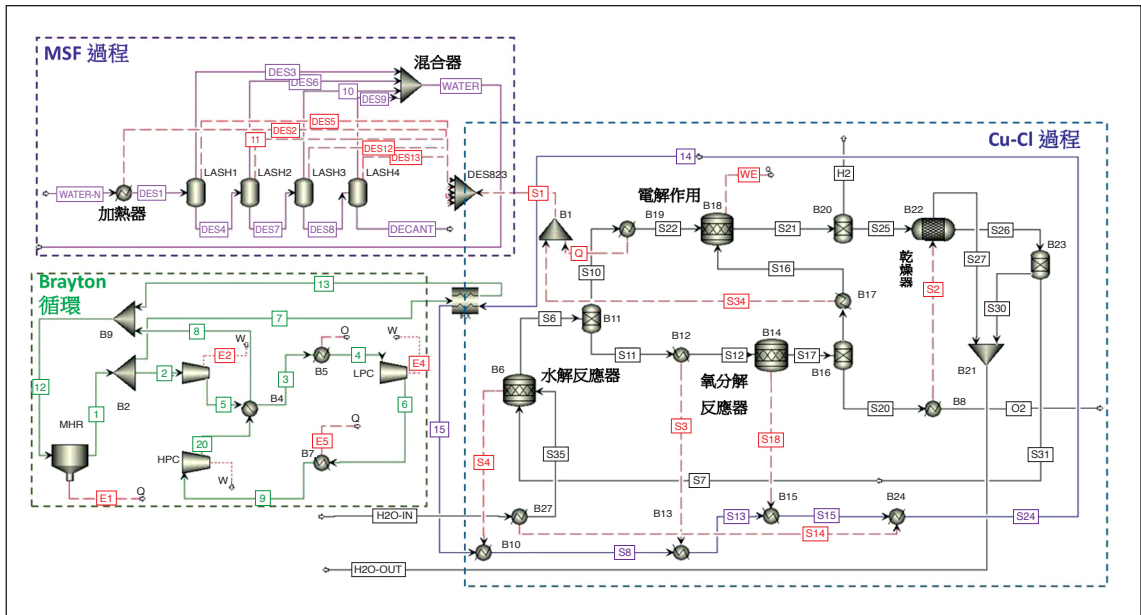


圖 3 Aspen Plus 流程圖：用於以核能為基礎的 GT-MHR 集成電力，通過四步驟 Cu-Cl 循環產生氫氣和鹼水脫鹽

$\dot{E}x_Q = \left[1 - \frac{T_o}{T_f}\right] \dot{Q}$ 的可用能含量 (Al-Zareer et al., 2017), h 是比焓。

使用這些平衡方程式可以確定每個子系統組件的能量和可用能效率。這使整個製程效率得到精確計算，並確定提議模型中每個子系統的關鍵組件。

(一) Brayton 循環子系統的分析

分析的第一個子系統是與 GT-MHR 耦合的 Brayton 氣體循環，如圖 4 所示。利用平衡方程式(1)-(3)可以得到表 3，其中整理出的方程式可以定義子系統中最重要組件的可用能效率 (ψ) 和可用能破壞率 ($\dot{E}x$)。

根據公式 (4) 計算 Brayton 循環的理想熱效率 ($\eta_{Brayton}$)：

$$\eta_{Brayton} = 1 - \frac{T_f}{T_o} = 1 - \frac{587}{950} = 38.21\% \quad (4)$$

為了計算動力轉換循環的能源效率 (η_{PCS}) 和可用能效率 (ψ_{PCS})，使用的方程式為：

$$\eta_{PCS} = \frac{W_{GT}}{\dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_8 h_8} = \frac{292 \text{ MWe}}{(1348 - 822.77) \text{ MW}} = 53.53\% \quad (5)$$

$$\psi_{PCS} = \frac{W_{GT}}{\dot{m}_2 ex_2 - \dot{m}_8 ex_8} = \frac{292 \text{ MWe}}{(1470.16 - 1087) \text{ MW}} = 76.22\% \quad (6)$$

對於這些具有類似特徵的 Brayton 循環，

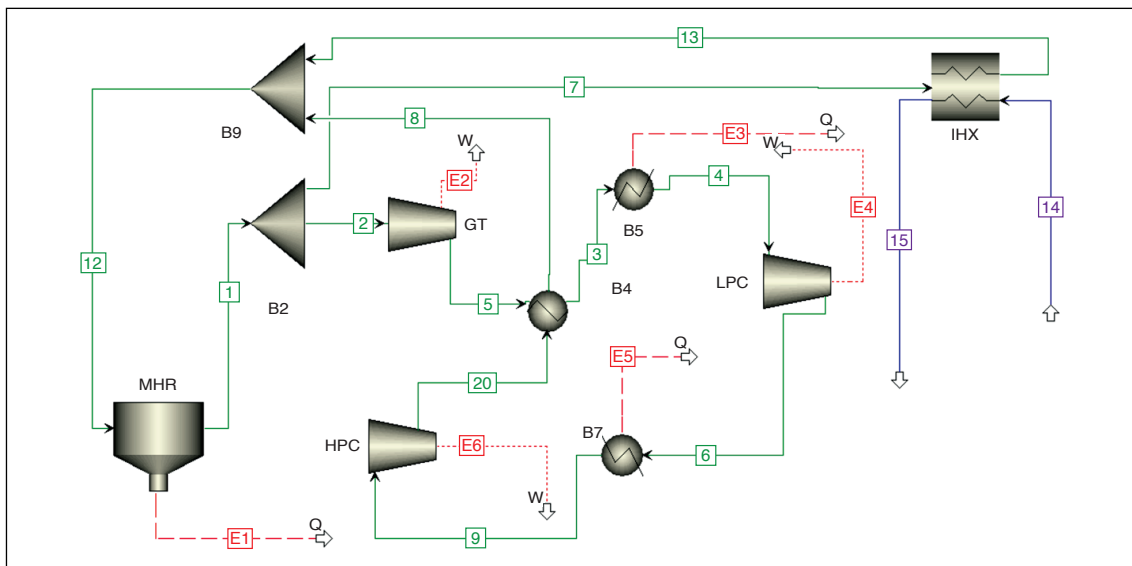


圖 4 結合 GT-MHR 中 Brayton 氣體循環的 Aspen plus 模型

表 3 在 Brayton 循環中各組件的可用能效率和可用能破壞率

組件	可用能效率	可用能破壞率
燃氣渦輪機 (GT)	$\psi_{GT} = \frac{\dot{m}_6 ex_6 + W_{GT}}{\dot{m}_2 ex_2}$	$\dot{E}x_{d,GT} = \dot{m}_2 ex_2 - \dot{m}_6 ex_6 + W_{GT}$
低壓壓縮機 (LPC)	$\psi_{LPC} = \frac{\dot{m}_6 ex_6}{\dot{m}_4 ex_4 + W_{LPC}}$	$\dot{E}x_{d,LPC} = (\dot{m}_4 ex_4 + \dot{W}_{LPC}) - \dot{m}_6 ex_6$
高壓壓縮機 (HPC)	$\psi_{HPC} = \frac{\dot{m}_{20} ex_{20}}{\dot{m}_9 ex_9 + W_{HPC}}$	$\dot{E}x_{d,HPC} = (\dot{m}_9 ex_9 + \dot{W}_{HPC}) - \dot{m}_{20} ex_{20}$
中冷器 1 (B5)	$\psi_{B5} = \frac{\dot{m}_3 ex_3}{\dot{m}_4 ex_4 + \dot{E}x_{Q_{E5}}}$	$\dot{E}x_{d,B5} = (\dot{m}_4 ex_4 + \dot{E}x_{Q_{E5}}) - \dot{m}_3 ex_3$
中冷器 2 (B7)	$\psi_{B7} = \frac{\dot{m}_6 ex_6}{\dot{m}_9 ex_9 + \dot{E}x_{Q_{E5}}}$	$\dot{E}x_{d,B7} = (\dot{m}_9 ex_9 + \dot{E}x_{Q_{E5}}) - \dot{m}_6 ex_6$
熱交換器 (B4)	$\psi_{B4} = \frac{\dot{m}_{20} ex_{20} - \dot{m}_8 ex_8}{\dot{m}_5 ex_5 + \dot{m}_3 ex_3}$	$\dot{E}x_{d,B4} = (\dot{m}_5 ex_5 + \dot{m}_3 ex_3) - (\dot{m}_{20} ex_{20} - \dot{m}_8 ex_8)$
中間熱交換器 (IHx)	$\psi_{IHx} = \frac{\dot{m}_{15} ex_{15} - \dot{m}_{14} ex_{14}}{\dot{m}_7 ex_7 + \dot{m}_{13} ex_{13}}$	$\dot{E}x_{d,IHx} = (\dot{m}_7 ex_7 + \dot{m}_{13} ex_{13}) - (\dot{m}_{15} ex_{15} - \dot{m}_{14} ex_{14})$

獲得的效率值與其他作者的預期及報告相符 (Li et al., 2012)。使用表4中彙整的方程式，可以計算出每個組件的可用能效率 (ψ) 和可用能破壞率 (\dot{E}_x)。獲得的結果如圖5所示。

對於Brayton循環的可用能效率，結果顯示值高於80%。Brayton循環的燃氣渦輪機和熱交換器是具有最高可用能破壞率的組件，也是由於壓力和溫度的突然變化，而具有更大可用能交互作用的組件 (Al-Zareer et al., 2017)。

(二) Cu-Cl 循環子系統的分析

在Cu-Cl循環中，將分析化學反應器和熱交換器，因為它們是子系統效率的主要貢獻

者 (Al-Zareer et al., 2017)。在該子系統中，考慮的是反應器於電解過程中所消耗的電功 (W_e)，根據氫氣產量可以方程式表示：
$$W_e = 55 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \dot{m}_{H_2}$$
 (Al-Zareer et al., 2017)。

圖6表示計算Cu-Cl子系統能源及可用能效率的模型。表4為計算該子系統效率的方程式。

使用表4中的方程式，可以獲得圖7中每個組件的可用能效率，以及圖8中所有可用能破壞率。

在這種情況下，Cu-Cl循環的化學反應器 (B22, B18, B14和B6) 的可用能效率在60%至80%之間。比較其他類似研究，如Al-Zareer et al. (2017)，耦合至2400 MWth超

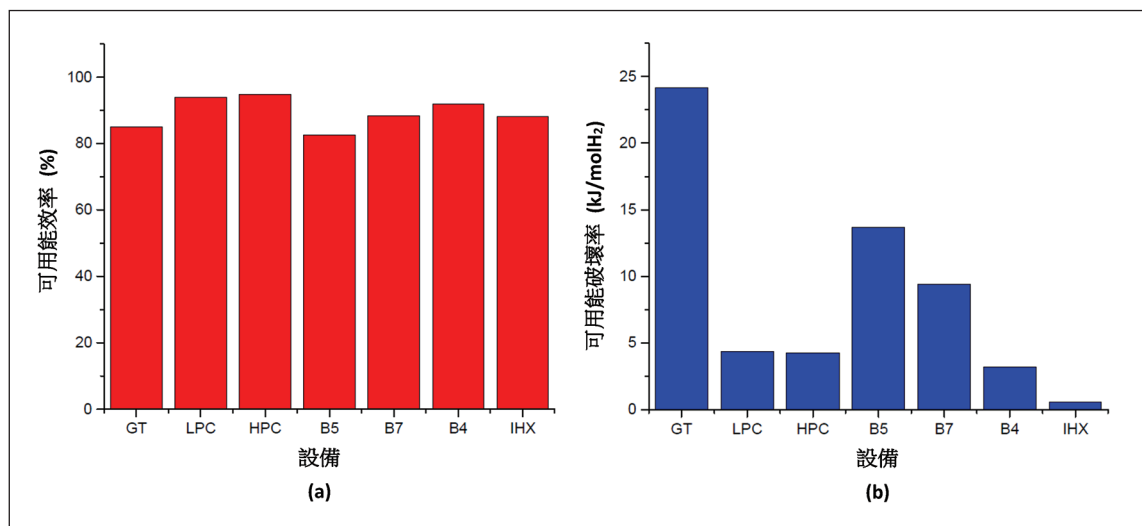


圖5 Brayton 氣體循環的主要組件的 (a) 可用能效率，和 (b) 可用能破壞率

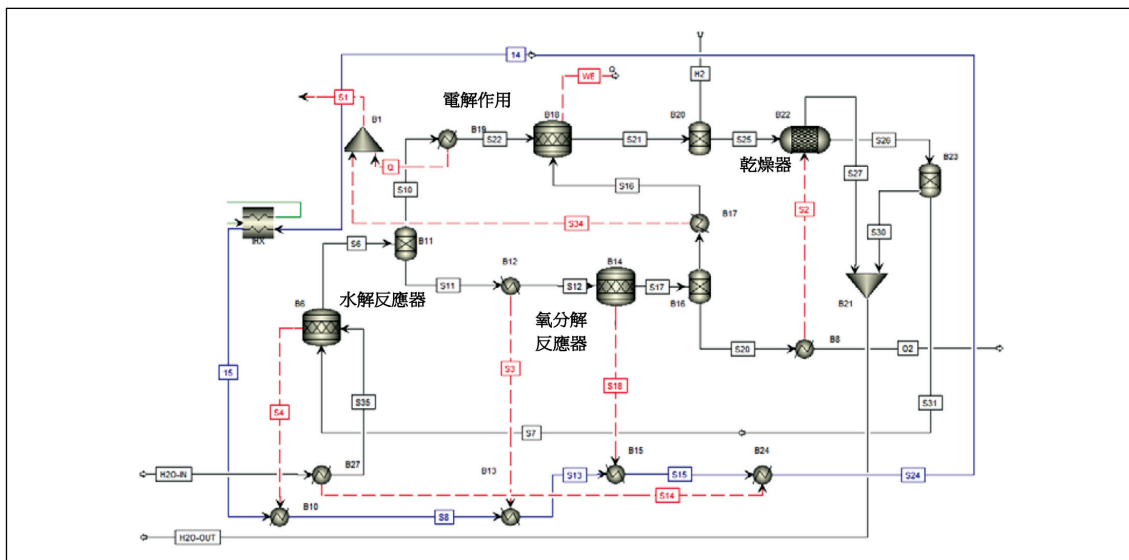


圖 6 在 Aspen Plus 模型中四步驟製氫 Cu-Cl 循環通過 IHX 型熱交換器與 Brayton 循環結合

表 4 Cu-Cl 循環的主要組件的能源和可用能效率

組件	可用能效率
水解反應器加熱器 (B10)	$\psi_{B10} = \frac{\dot{E}x_{Q_{s4}}}{\dot{m}_{s15}ex_{s15} - \dot{m}_{s8}ex_{s8}}$
氧氣分解加熱器 (B15)	$\psi_{B15} = \frac{\dot{E}x_{Q_{s18}}}{\dot{m}_{s13}ex_{s13} - \dot{m}_{s15}ex_{s15}}$
水預熱器 (B24)	$\psi_{B24} = \frac{\dot{E}x_{Q_{s14}}}{\dot{m}_{s15}ex_{s15} - \dot{m}_{s24}ex_{s24}}$
水解反應器 (B6)	$\psi_{B6} = \frac{\dot{m}_{s6}ex_{s6}}{\dot{m}_{s35}ex_{s35} + \dot{m}_{s7}ex_{s7} + \dot{E}x_{Q_{s4}}}$
氧分解反應器 (B14)	$\psi_{B14} = \frac{\dot{m}_{s17}ex_{s17}}{\dot{m}_{s12}ex_{s12} + \dot{E}x_{Q_{s18}}}$
電解反應器 (B18)	$\psi_{B18} = \frac{\dot{m}_{s21}ex_{s21}}{\dot{m}_{s22}ex_{s22} + \dot{m}_{s16}ex_{s16} + W_e}$
乾燥器 (B22)	$\psi_{B22} = \frac{\dot{m}_{s26}ex_{s26} + \dot{m}_{s27}ex_{s27}}{\dot{m}_{s25}ex_{s25} + \dot{E}x_{Q_{s2}}}$

組件	可用能破壞率
水解反應器加熱器 (B10)	$\dot{E}x_{d,B10} = (\dot{m}_{s15}ex_{s15} - \dot{m}_{s8}ex_{s8}) - \dot{E}x_{\dot{Q}_{s4}}$
氧氣分解加熱器 (B15)	$\dot{E}x_{d,B15} = (\dot{m}_{s13}ex_{s13} - \dot{m}_{s15}ex_{s15}) - \dot{E}x_{\dot{Q}_{s18}}$
水預熱器 (B24)	$\dot{E}x_{d,B24} = (\dot{m}_{s15}ex_{s15} - \dot{m}_{s24}ex_{s24}) - \dot{E}x_{\dot{Q}_{s14}}$
水解反應器 (B6)	$\dot{E}x_{d,B6} = (\dot{m}_{s35}ex_{s35} + \dot{m}_{s7}ex_{s7} + \dot{E}x_{\dot{Q}_{s4}}) - \dot{m}_{s6}ex_{s6}$
氧分解反應器 (B14)	$\dot{E}x_{d,B14} = (\dot{m}_{s12}ex_{s12} + \dot{E}x_{\dot{Q}_{s18}}) - \dot{m}_{s17}ex_{s17}$
電解反應器 (B18)	$\dot{E}x_{d,B18} = (\dot{m}_{s22}ex_{s22} + \dot{m}_{s16}ex_{s16} + W_E) - \dot{m}_{s21}ex_{s21}$
乾燥器 (B22)	$\dot{E}x_{d,B22} = (\dot{m}_{s25}ex_{s25} + \dot{E}x_{\dot{Q}_{s2}}) - (\dot{m}_{s26}ex_{s26} + \dot{m}_{s27}ex_{s27})$

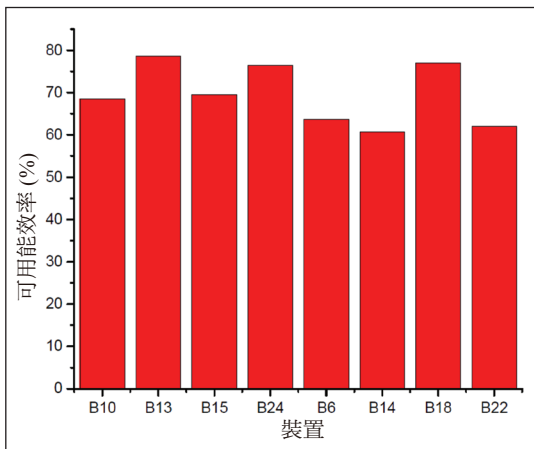


圖7 Aspen Plus® 中建議的 Cu-Cl 流程圖的可用能效率

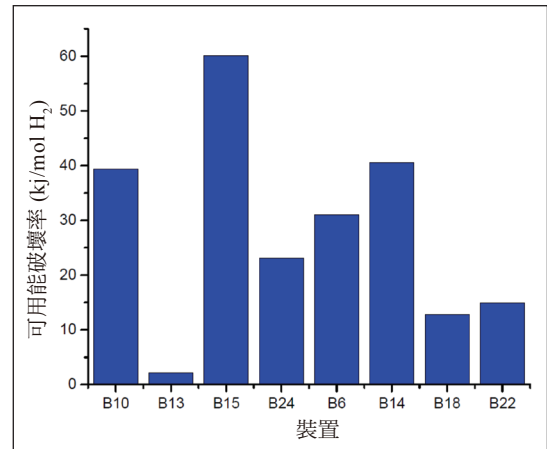


圖8 AspenPlus® 中建議的 Cu-Cl 流程圖的可用能破壞率

臨界水核反應器 (SCWR) 的 Cu-Cl 循環, 亦有相似的結果。在提出的模型中, 還可以確認具有最高可用能破壞率的組件。

在這種情況下, 得到氧分解反應器 (B15) 的熱交換器及反應器本身 (B14) 的最高可用能破壞率, 分別是 60 和 42



kJ/molH₂，這些結果是符合預期的，因為在子系統中較高溫度組件的相互作用之下，從而產生更大的熱能需求，其中關鍵原因在於，Cu₂OCl分解反應溫度需保持500°C的要求。另外值得注意的是水解反應器的加熱器的可用能破壞率（39 kJ/molH₂），很顯然地，在高溫（450°C）與大流量功耗（15）下，該分段產生了相對高的焓值。

該子系統中的另一個關鍵組件是乾燥器（B22），因為水分會大大提高其可用能破壞率（Al-Zareer et al., 2017）。在建議的模型中，根據建議尺寸，可得到一個優化值。

根據Huang and T-Raissi（2005），熱化學循環的整體效率（ η_{Cu-Cl} ）可定義為，生成氫含能量與製程總耗能之間的比率。此後，可以根據下列公式，計算Cu-Cl循環的總能源（ η_{Cu-Cl} ）和可用能（ ψ_{Cu-Cl} ）效率：

$$\eta_{Cu-cl} = \frac{\dot{m}_{H_2} LHV_{H_2}}{\dot{m}_{15} h_{15} - \dot{m}_{s24} h_{s24} + W_e} = 45.33\% \quad (7)$$

$$\psi_{Cu-cl} = \frac{\dot{m}_{H_2} ex_{H_2}}{\dot{m}_{15} ex_{15} + \dot{m}_{s24} ex_{s24} + W_e} = 73.626\% \quad (8)$$

其中LHV_{H₂}是氫的低熱值（119.96 MJ/kg），而ex_{H₂}是氫的比熱能（236.09 kJ/mol）。本章的效率值位於其他作者的理論和模擬結果範圍內（Ozbilen et al., 2016; Sayyaadi and Saeedi Boroujeni, 2017）。

（三）MSF 對脫鹽子系統的分析

海水淡化系統由四個串聯的閃蒸分離器組成，用以處理流量為5.57 kg/s的海水，其中鹽度為500 ppm（Ma et al., 2013）。Aspen Plus®開發的質量平衡或流程如圖9所示。

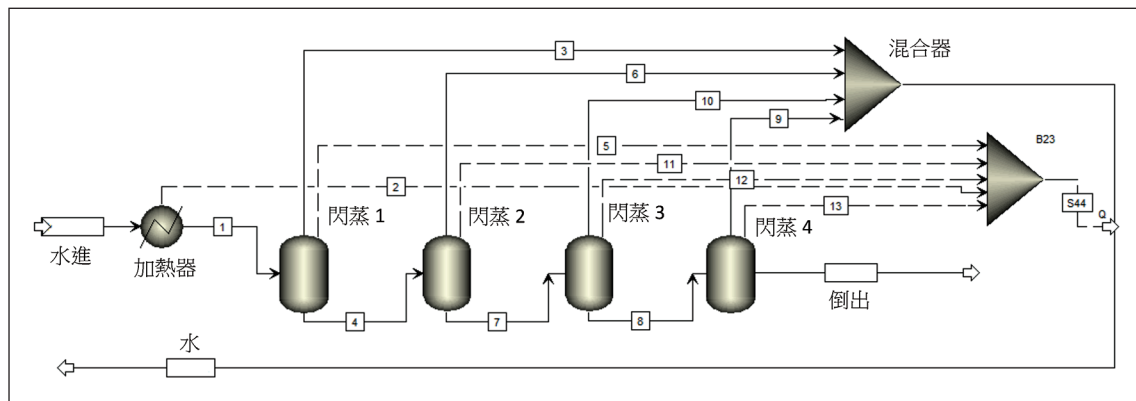


圖 9 用於多級閃蒸脫鹽系統的 Aspen Plus 模型

表5顯示海水淡化子系統組件的可用能效率和可用能破壞率的方程式。

圖10顯示組件的(a)能源效率、(b)可用能效率、以及(c)可用能破壞率。

在這種情況下，可以確定該系統的最高破壞率發生在閃蒸分離器3 (0.27 kJ/

molH₂)。閃蒸4的可用能破壞率具有較低的值，這歸因於少量海水淡化的低能耗。閃蒸分離器的能源效率超過80%，這保證了部分能效達到66.99%。

(四) 總體系統分析

1. 效率計算

表 5 顯示用 MSF 方法對海水淡化系統各組件的可用能效率和可用能破壞率的方程式

組件	可用能效率
加熱器	$\psi_{Heater} = \frac{\dot{m}_1 ex_1}{\dot{m}_{Water-in} ex_{Water-in} + \dot{E}x_{\dot{Q}_2}}$
閃蒸 1	$\psi_{Flash1} = \frac{\dot{m}_3 ex_3 + \dot{m}_4 ex_4}{\dot{m}_1 ex_1 + \dot{E}x_{\dot{Q}_5}}$
閃蒸 2	$\psi_{Flash2} = \frac{\dot{m}_6 ex_6 + \dot{m}_7 ex_7}{\dot{m}_4 ex_4 + \dot{E}x_{\dot{Q}_{11}}}$
閃蒸 3	$\psi_{Flash3} = \frac{\dot{m}_8 ex_8 + \dot{m}_{10} ex_{10}}{\dot{m}_7 ex_7 + \dot{E}x_{\dot{Q}_{12}}}$
閃蒸 4	$\psi_{Flash4} = \frac{\dot{m}_9 ex_9 + \dot{m}_{decant} ex_{decant}}{\dot{m}_8 ex_8 + \dot{E}x_{\dot{Q}_{18}}}$
組件	可用能破壞率
加熱器	$\dot{E}x_{d,Heater} = (\dot{m}_{Water-in} ex_{Water-in} + \dot{E}x_{\dot{Q}_2}) - \dot{m}_1 ex_1$
閃蒸 1	$\dot{E}x_{d,Flasher1} = (\dot{m}_1 ex_1 + \dot{E}x_{\dot{Q}_5}) - (\dot{m}_3 ex_3 + \dot{m}_4 ex_4)$
閃蒸 2	$\dot{E}x_{d,Flasher2} = (\dot{m}_4 ex_4 + \dot{E}x_{\dot{Q}_{11}}) - (\dot{m}_6 ex_6 + \dot{m}_7 ex_7)$
閃蒸 3	$\dot{E}x_{d,Flasher3} = (\dot{m}_7 ex_7 + \dot{E}x_{\dot{Q}_{12}}) - (\dot{m}_8 ex_8 + \dot{m}_{10} ex_{10})$
閃蒸 4	$\dot{E}x_{d,Flasher4} = (\dot{m}_8 ex_8 + \dot{E}x_{\dot{Q}_{18}}) - (\dot{m}_9 ex_9 + \dot{m}_{decant} ex_{decant})$

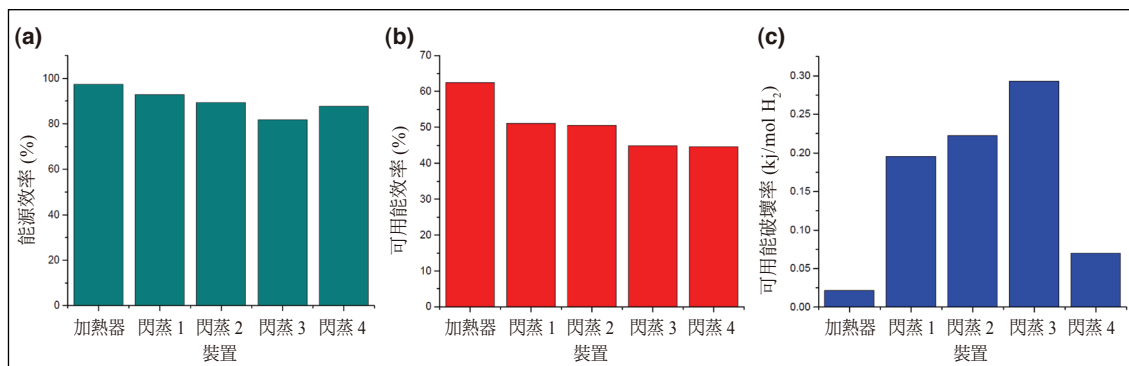


圖 10 在四步驟 Cu-Cl 循環中，利用餘熱進行多級閃蒸脫鹽過程的 (a) 能源效率；(b) 可用能效率；和，(c) 可用能破壞率。

本研究建立一模型，使用Brayton循環產生能量，並將GT-MHR與Cu-Cl循環結合在一起，然後執行詳細的定量分析。對子系統進行分析後，總體能源效率 ($\eta_{overall}$) 和可用能效率 ($\psi_{overall}$) 的計算公式為：

$$\eta_{overall} = \frac{\dot{m}_{H_2}LHV_{H_2} + W_{GT} - W_e - W_{LPC} - W_{HPC}}{\dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_{12} h_{12}} = 32.47\% \quad (9)$$

$$\psi_{overall} = \frac{\dot{m}_{H_2}LHV_{H_2} + W_{GT} - W_e - W_{LPC} - W_{HPC}}{\dot{m}_1 ex_1 - \dot{m}_{12} ex_{12}} = 52.20\% \quad (10)$$

其中 \dot{m}_{H_2} 是在Cu-Cl循環中獲得的氫氣流量， W_{GT} 是在燃氣渦輪機中產生的功率， W_e 是在電解器中消耗的功率， W_{LPC} 和 W_{HPC} 是Brayton循環中專用於低壓和高壓壓縮機的功率。表6彙總Aspen Plus®在完整模擬過程中所獲得的結果。

提出模型的總氫產量為0.219 kg/s，總體效率為32.47%。針對GT-MHR的功率水平，

該製程符合預期結果。子系統的部分效率也在Cu-Cl循環的預期範圍內，充分確定具有較高可用能破壞率的組件。脫鹽系統使用氧分解反應器的排出熱量，淡化4.94 kg/s的海水，效率為66.99%。

2. 成本估算

在得出以核反應器製氫的詳細模型之後，進行相關的成本估算十分重要。這種成本估算是本研究的特定目標之一，藉此可與其他製氫技術比較。為了估算這類成本，國際原子能總署 (IAEA) 曾經使用HEEP®軟體，評鑑各種氫經濟發展計劃的效益 (Khamis and Malshe, 2010)。由於GT-MHR技術仍處於概念設計階段，如果使用類似核技術數據，某些成本可能沒有十分明確的定義。此外，本成本估算還不包括會影響最終成本的海水淡化子系統。表7和表8顯示裝有GT-MHR反應器的核電廠和製氫廠的成本數據。表10則為所有可行海水淡化技術的成本效益分析表。

表 6 製氫過程的總體可用能和能源效率以及該模型的主要運行參數

參數	值
氫氣總生產率 (\dot{m}_{H_2})	0.2190 kg/s
產生的氫氣溫度 (T_{H_2})	25°C
產生的氫氣壓力 (P_{H_2})	0.1013 MPa
產生的淨功率 (W_{net})	292 MW
系統總體能源效率 (η_{ove})	32.47%
系統總體可用能效率 (ψ_{ove})	52.20%
系統總體可用能破壞率 ($\dot{E}_{x_d,ove}$)	530.07 MW
Cu-Cl 循環能源效率 (η_{cu-cl})	45.33%
Cu-Cl 循環可用能效率 (ψ_{cu-cl})	73.62%
Cu-Cl 循環電力消耗 (W_e)	5.87 MWe
能量轉換系統能源效率 (η_{PCS})	53.53%
能量轉換系統可用能效率 (ψ_{PCS})	76.22%
脫鹽熱能消耗 (Q_{des})	12.8 MW
脫鹽系統能源效率 (η_{des})	66.99%
脫鹽系統可用能效率 (ψ_{des})	77.14%
淡化水生產率 ($\dot{m}_{H_2O,des}$)	4.9492 kg/s
進入脫鹽系統的鹹水流量 (\dot{m}_{Brine})	5.5721 kg/s

表 7 估算核電廠生產氫氣的詳細成本資料

參數	值	單位
額定熱功率	600	MWth
製氫熱量	59.15	MWth
額定電能	292	MWe
台數	1	
初始燃料負載	100,000	千克
每年燃料進給	100,000	公斤
隔夜資本成本	459e+6	USD
電力投資成本比例	10	%
燃料費	250	美元 / 千克
運維成本佔資本成本比率	2.3	%
報廢成本佔資本成本比率	0	%



表 8 製氫廠的詳細成本估算

參數	值	單位
單位氫氣產量	6.91e+6	kg/年
熱量消耗	58.21	MWth
所需電量	5.97	MWe
隔夜資本成本	1.01e+8	USD
另一項運維成本佔資本成本的比率	4.46	%
報廢成本佔資本成本的比率	2	%

表 9 生產氫氣和核電廠的成本分析

	資金成本 債務 / 權益 (\$/kg)	運維 (\$/kg)	燃料成本 (\$/kg)	總計 (\$/kg)
核電廠	0.47/0.01	0.16	0.4	1.04
Cu-Cl 廠	0.98/0.01	0.72	-	1.73
熱能成本	0.005/0	0.002	0.005	0.0012
電力成本明細	0.011/0	0.004	0.009	0.023
總計	1.460/.02	0.89	0.4	2.77

表 10 海水淡化技術的成本效益分析

技術	MSF	MEE	MVC	RO
典型平均產能 (m ³ /d)	25,000	10,000	3,000	6,000
最大平均產能 (m ³ /d)	50,000	20,000	5,000	10,000
熱能消耗 (kWh/m ³)	80	60	-	-
電能消耗 (kWh/m ³)	4	2	7	5
等效電能消耗 (kWh/m ³)	15	7	7	5
廠房成本 (\$/(m ³ /d))	1,300	1,200	1,000	1,000
生產成本 (\$/m ³)	1.1	0.8	0.7	0.7

註：多級閃蒸 (MSF)；多效蒸發 (MEE)；機械蒸汽壓縮 (MVC)；逆滲透 (RO)。
資料來源：Fiorenza et al. (2003)

在表8中，依據Ozbilen et al. (2016) 方法，匯整此類技術的典型財務數據。表9和圖11顯示與GT-MHR耦合的Cu-Cl循環的成本。

由上述概念設計分析可得出產氫總成本為2.77美元/千克，其在營運和維護 (O & M) 方面的貢獻為0.89美元/千克，由此得知，該成本對氫經濟概念的實現，具有實質

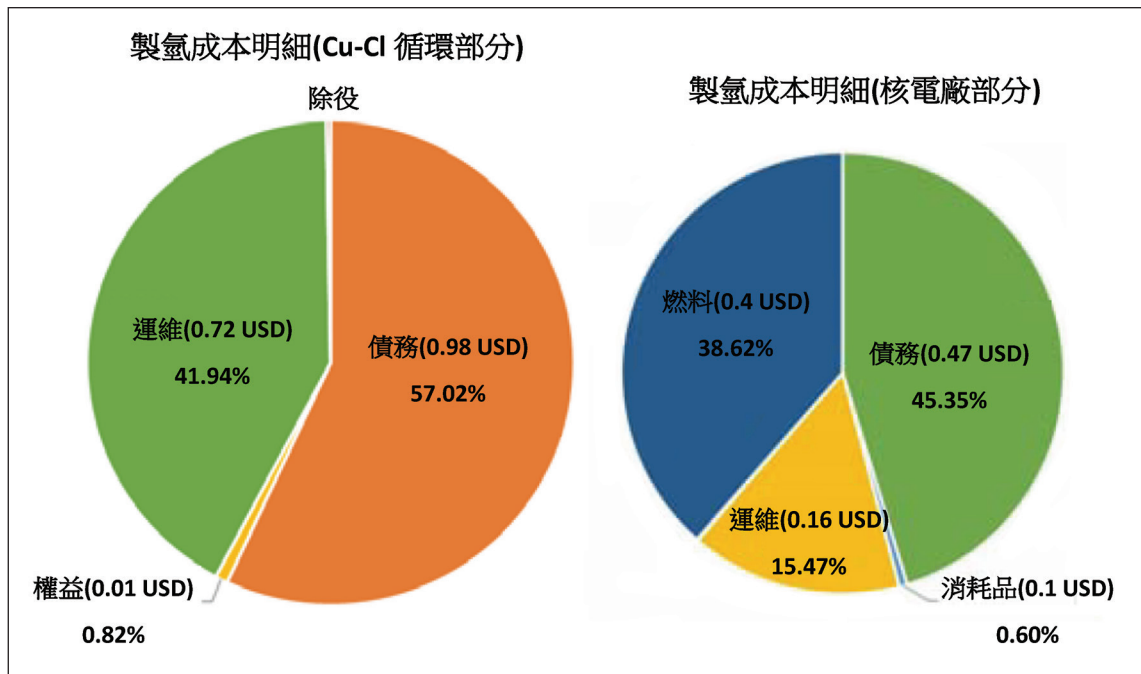


圖 11 製氫成本明細 (美元 / 千克)

上的關鍵地位。

然而，該貢獻值對Cu-Cl循環而言是特有的，因為在循環中處理固體會使該部分更加昂貴。但是，與其他具有類似功率的核反應器系統相比，本研究所獲得的總成本值位在其研究範圍內。另外，本研究亦有考慮其他研究對其他反應器和製氫技術的方法使用。(Sorgulu and Dincer, 2017; Rodríguez et al., 2018)

四、結論

在本研究中，提出一種新的概念設計，

其使用先進核反應器為能源，通過Cu-Cl循環製氫，並完成海水淡化。此外藉由主要循環組件分析，獲得可用能及能源效率。最後提出簡短的成本估算，基本上是藉由HEEP方法來計算產氫的成本。

在Aspen Plus®中開發一個模型，以評估製氫的可用能，並藉由GT-MHR核反應器為能源，從Cu-Cl循環中製氫。同時建議未來可使用其中一個製程的餘熱，通過MSF技術來淡化海水。最後，針對提出模型獲得能源和可用能的計算方程式。

對於建議的模型，使用Cu-Cl循環得到的



產氫量為0.2190 kg/s，能源效率為45.33%。對應於最高能量需求，Cu-Cl循環的最高可用能破壞率發生在氧分解反應器。通過Brayton氣體循環產生292 MWe的電力，其中5.87 MWe用於熱化學反應的電解步驟。氧分解反應的殘熱用於淡化5.5721 kg/s的海水，並以66.99%效率獲得4.9492 kg/s的水，成本貢獻為0.0011 \$/kg（依據表10的MSF生產成本）。總體製程的能源效率和可用能效率分別為32.47%和52.20%；使用GT-MHR概念設計對製氫程序進行成本估算，結果得到2.77 \$/kgH₂的數值，其中對Cu-Cl廠的O & M成本貢獻為0.72 \$/kg；這些數值都在參考文獻的預期範圍內⁴。

通過提議子系統的能源/可用能效率分析以及每個組件的可用能破壞率計算，我們得出結論：結合GT-MHR技術與Cu-Cl循環的製氫製程是可行的。此外，我們還證明使用製程中的餘熱可以淡化海水，另外，生產氫的成本是與所選取反應器的功率水平相互對應的。

針對上述獲得的結果，我們確認本研究的所有特定目標均已達成，而擬定系統也能滿足氫經濟概念的高效要求，在有特殊能源及飲用水需求下，例如臺灣的偏遠離島地

區，該方法確實可行。

參考文獻

1. Al-Zareer, M., Dincer, I. and Rosen, M.A. (2017) "Development and assessment of a novel integrated nuclear plant for electricity and hydrogen production," *Energy Convers. Manag.*, Vol. 134, pp.221–234.
2. Aspen Technology (2000) *Aspen Plus® Aspen Plus User Guide*, Vol. 10, pp.936.
3. Chukwu, C., Naterer, G.F. and Rosen, M.A. (2008) "Process simulation of nuclear-based thermochemical hydrogen production with a copper-chlorine cycle," *Can. Nucl. Soc.*, May, Vol. 1, No. 1, pp.9–19.
4. Elder, R. and Allen, R. (2009) "Nuclear heat for hydrogen production: coupling a very high/high temperature reactor to a hydrogen production plant," *Prog. Nucl. Energy*, Vol. 51, No. 3, pp.500–525.
5. El-Ghonemy, A.M.K. (2017) "Performance test of a sea water multi-stage flash distillation plant: case study," *Alexandria Eng. J.*, December, pp.2401–2413.
6. Ferrandon, M.S., Lewis, M., Alvarez, F. and Shafirovich, E. (2010) "Hydrolysis of CuCl₂ in the Cu-Cl thermochemical cycle for hydrogen production: experimental studies using a spray reactor with an ultrasonic atomizer," *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 35, No. 5, pp.1895–1904.
7. Fiorenza, G., Sharma, V. K. and Braccio G. (2003) "Techno-economic evaluation of a solar powered water desalination plant," *Energy Conversion and Management*, Vol. 44, No. 14, pp. 2217–2240.
8. Huang, C. and T-Raissi, A. (2005) "Analysis of sulfur-iodine thermochemical cycle for solar hydrogen production: part I: decomposition of sulfuric acid," *Sol. Energy*, Vol. 78, No. 5, pp.632–646.
9. IAEA (2013) *Evaluation of High Temperature Gas Cooled Reactor Performance: Benchmark Analysis Related to the PBMR-400, PBMM, GT-MHR, HTR-10 and the ASTRA Critical Facility*, Vol. 53, No. 9.
10. Khamis, I. and Malshe, U.D. (2010) "HEEP: a new tool for the economic evaluation of hydrogen economy," *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 35, No. 16, pp.8398–8406.
11. Khawaji, A.D., Kutubkhanah, I.K. and Wie, J.M. (2008) "Advances in seawater desalination technologies," *Desalination*, Vol. 221, Nos. 1–3, pp.47–69.
12. Li, P.-J., Hung, T.-C., Pei, B.-S., Lin, J.-R., Chieng, C.-C. and Yu, G.-P. (2012) "A thermodynamic analysis of high temperature gas-cooled reactors for optimal waste heat recovery and hydrogen production," *Appl. Energy*, Vol. 99, pp.183–191.
13. Linares, J.I. and Moratilla, B.Y. (2007) *El Hidrógeno y la Energía*, Rev. Av. la Ing. Locatelli, G., Bingham,

⁴ 例如，在 Al-Zareer et al. (2017) 中，產氫率為 2.02 kg/s (700 bar)，發電量 553 MW，能源效率 31.6%，可用能效率 56.2%。在 Sayyaadi and Saeedi Boroujeni (2017) 中，能源效率為 49.83%，可用能效率為 58.23%，產氫成本為 6.33 \$/kgH₂。

- C. and Mancini, M. (2014) "Small modular reactors: a comprehensive overview of their economics and strategic aspects," *Prog. Nucl. Energy*, Vol. 73, pp.75–85.
14. Locatelli, G., Fiordaliso, A., Boarin, S. and Ricotti, M.E. (2017) "Cogeneration: an option to facilitate load following in small modular reactors," *Prog. Nucl. Energy*, Vol. 97, pp.153–161.
 15. Ma, Z.Q., Huo, S.H. and Su, M. (2013) "Simulation with Aspen Plus and performance analysis of LT-MED seawater desalination system," *Appl. Mech. Mater.*, Vols. 397–400, pp.948–956.
 16. Mazloomi, K. and Gomes, C. (2012) "Hydrogen as an energy carrier: prospects and challenges," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 16, No. 5, pp.3024–3033.
 17. Naterer, G.F., Daggupati, V.N., Marin, G., Gabriel, K.S. and Wang, Z.L. (2008) "Thermochemical hydrogen production with a copper-chlorine cycle, II: flashing and drying of aqueous cupric chloride," *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 33, No. 20, pp.5451–5459.
 18. O'Brien, J.E., McKellar, M.G., Harvego, E. and Stoots, C.M. (2010) "High-temperature electrolysis for large-scale hydrogen and syngas production from nuclear energy – summary of system simulation and economic analyses," *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 35, No. 10, pp.4808–4819.
 19. Orhan, M.F., Dinçer, I. and Rosen, M.A. (2012) "Efficiency comparison of various design schemes for copper-chlorine (Cu-Cl) hydrogen production processes using Aspen Plus software," *Energy Convers. Manag.*, Vol. 63, pp.70–86.
 20. Ozbilen, A., Dincer, I. and Rosen, M.A. (2016) "Development of a four-step Cu-Cl cycle for hydrogen production – part II: multi-objective optimization," *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 41, No. 19, pp.7826–7834.
 21. Pope, K., Wang, Z. and Naterer, G.F. (2016) "Process integration of material flows of copper chlorides in the thermochemical Cu-Cl cycle," *Chem. Eng. Res. Des.*, Vol. 109, pp.273–281.
 22. Richards, M., Shenoy, A., Schultz, K., Brown, L., Harvego, E., McKellar, M., Coupey, J.P., Reza, S.M.M., Okamoto, F. and Handa, N. (2006) "H₂-MHR conceptual designs based on the sulphur iodine process and high-temperature electrolysis," *Int. J. Nucl. Hydrog. Prod. Appl.*, Vol. 1, No. 1, p.36.
 23. Richards, M., Shenoy, A., Schultz, K., Brown, L., Harvego, E., McKellar, M., Okamoto, F., Handa, N., Coupey, J. and Reza, S.M.M. (2005) "Conceptual designs for MHR-based hydrogen production systems," *Lloydia (Cincinnati)*, Vol. 1, No. 190, pp.1–6.
 24. Rodríguez, D.G., De Oliveira Lira, C.A.B., Parra, R.G., Hernandez, R.C.G., and Valdes, R.D.I.T. (2018) "Computational model of a sulfur-iodine thermochemical water splitting system coupled to a VHTR for nuclear hydrogen production," *Energy*, Vol. 147, pp.1165–1176.
 25. Sayyaadi, H. and Saeedi Boroujeni, M. (2017) "Conceptual design, process integration, and optimization of a solar Cu[*sbnd*]Cl thermochemical hydrogen production plant," *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 42, No. 5, pp.2771–2789.
 26. Shin, Y., Lee, K., Kim, Y., Chang, J., Cho, W. and Bae, K. (2012) "A sulfur-iodine flowsheet using precipitation, electro dialysis, and membrane separation to produce hydrogen," *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 37, No. 21, pp.16604–16614.
 27. Smitkova, M., Janiček, F. and Riccardi, J. (2011) "Life cycle analysis of processes for hydrogen production," *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 36, No. 13, pp.7844–7851.
 28. Sorgulu, F. and Dincer, I. (2017) "Cost evaluation of two potential nuclear power plants for hydrogen production," *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 43, No. 23, pp.2–9.
 29. Wu, L., Xiao, S. and Gao, C. (2012) "Simulation of multi-stage flash (MSF) desalination process," *Advances in Materials Physics and Chemistry*, Vol. 2012, No. 2, pp.200–205.
 30. Yan, X.L. and Hino, R. (2011) *Nuclear Hydrogen Production Handbook: Green Chemistry and Chemical Engineering*, Ohio University, Athens, CRC Press, Taylor and Francis Group, LLC, Ohio, USA.
 31. Yildiz, B. and Kazimi, M.S. (2006) "Efficiency of hydrogen production systems using alternative nuclear energy technologies," *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 31, No. 1, pp.77–92.



專門術語與命名法

符號		下標	
\dot{m}	流量	in	表示流體進口
\dot{W}	功率	out	表示流體出口
\dot{Q}	傳熱率	PT	表示標稱壓力和溫度
\dot{E}_{x_d}	可用能破壞率	o	表示初始流體條件
ex	比速率	f	表示最終流體條件
h	比焓	首字母縮寫	
W_e	電功率	GT	燃氣渦輪機 (Gas Turbine)
P	壓力	MHR	模組化氦反應器 (Modular Helium Reactor)
T	溫度	MSF	多級閃蒸 (Multi-stage Flash)
ex_{H_2}	氫比可用能	LHV	低熱值 (Low Heating Value)
希臘字母		PCS	能量轉換系統 (Power Conversion Cycle)
ψ	可用能效率 (Exergy Efficiency)	LPC	低壓壓縮機 (Low Pressure Compressor)
η	能源效率 (Energy Efficiency)	HPC	高壓壓縮機 (High Pressure Compressor)