

地熱에너지資源의 利用과 展望

李 昌 植 *

I. 序 論

1973年末에 始作된 에너지危機는 化石燃料가 地球上에 偏在하여 있다는 制約과 그 賦存量이 有限하다는 점에서 더욱 큰 에너지問題로 되고 있다. 1960年 後半에서부터 거론되어 온 에너지 枯渴問題는 에너지技術의 研究開發과 새로운 에너지源의 開發에 더욱 拍車를 가하게 되었다. 지금 까지의 에너지變遷過程을 살펴보면 1850年代에는 使用에너지의 約 90%가 薪炭이었으나 1930年代에는 薪炭이 10%, 石炭이 65%, 石油 및 天然가스가 約 20%, 水力이 5% 程度의 分布를 보였다. 그러나 오늘날에 와서는 1次 에너지가 約 0.6%, 石炭이 約 35%, 石油, 天然가스가 57%, 나머지가 水力, 原子力, 地熱에 依한 에너지라고 볼 수 있다. 이와 같

이 地球上에서 얻을 수 있는 에너지資源은 極히 限定되어 있으므로 앞으로의 에너지源은 水力, 地熱, 太陽에너지, 原子動力 등에 크게 依存될 것으로 생각된다. 그러므로 여기서는 各種 에너지資源量과 地熱에너지의 現況과 展望을 알아보고, 地熱에너지 動力變換過程의 概要를 地熱發電사이클과 地熱發電用 터어빈을 중심으로 하여 다루기로 한다.

II. 에너지 資源量

2-1 地球의 에너지 資源量

化石燃料의 埋藏量은 過去의 發見記錄, 地質圖, 探索所要經費 및 試錐孔의 깊이와 發見量에 依하여 推定되며 이 推定量中 現在의 技術로서 採取可能한 確認埋藏量을 原油 1 l 를 9,000 kcal (=石炭 1.38 kg = 天然가스 0.097 m³)로 假定하여 推定하면 表 1 과 같다.

表 1. 地球의 에너지 資源量

區 分	資 源 量
現在의 主要에너지源의 確認埋藏量	石油, 天然가스..... 13×10^{17} kcal ⁽⁸⁾ 石炭..... 50×10^{17} kcal ⁽¹⁾ 우라늄..... $\sim 2 \times 10^{17}$ kcal ⁽⁹⁾
量的으로는 많지 않으나 現在의 技術로서 利用할 수 있는 에너지源의 潛在能力	水力..... $< 2 \times 10^{16}$ kcal/year ⁽²⁾ 潮力..... $< 5.3 \times 10^{14}$ kcal/year ⁽³⁾ 地熱..... $< 5 \times 10^{14}$ kcal/year ⁽⁴⁾
原理적으로 有望한 앞으로의 主要 에너지	核分裂에너지..... $>$ 化石燃料全體의 ⁽⁵⁾ 10^4 倍 核融合에너지..... $>$ 化石燃料全體의 ⁽⁶⁾ 10^7 倍 太陽輻射에너지..... 28,750 kcal/m ² (大氣圈外面) ⁷ 5,000 kcal/m ² (地表1日平均) ⁷

2-2 地熱에너지源

지름이 約 12,700 km인 地球는 그 內部에 巨

대한 熱에너지를 保有하고 있다.

地球上의 熱에너지는 地球內部的 放射線元素

* 正會員, 漢陽大學校 工科大學

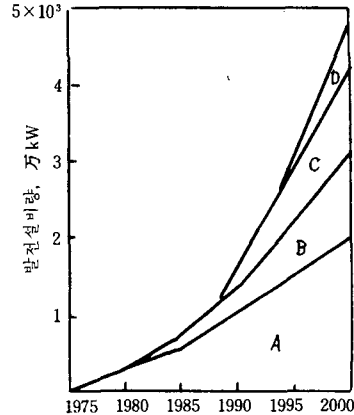
의 原子核崩壞熱과 같은 內部生成 熱에 너지와 地下埋藏 마그마(magma)溜에 依한 熱源으로 나누어 생각할 수 있다. 放射線元素에 依한 熱生成量은 주로 傳導에 依하여 地表面에 傳達되며 그 熱量은 平均 1m²當 0.063W이다. 이것은 太陽의 平均輻射에너지의 約 0.5×10⁻⁴배이다. 現在 地球의 表面側 100~200 km의 上部맨틀層은 1년에 數cm로부터 10cm의 速度로 對流運動을 하고 있다. 따라서 地域에 따라서는 火山活動이 活發하여 地球內部로부터 傳해지는 熱流束이 크게 發生하고 있다. 이와 같은 곳에서는 岩石이 高溫이 되어서 溶融된 狀態로 되어 있는 마그마가 存在한다. 이와 같이 溫度 1,000 °C 前後의 마그마가 地下 몇 km로부터 10數 km 되는 곳에 定着한 것을 마그마溜라 한다. 地表面으로부터 浸透한 天水는 이 마그마溜로부터의 熱을 받아 地下深部に 熱水가 貯藏되어 있는 地熱貯溜層이 形成되고 이것이 地熱資源이 된다.

地質學的으로 보면 地熱資源은 貯溜層으로부터 天然蒸氣만이 噴出하는 天然蒸氣資源, 火山性 高溫熱水資源, 高溫岩體資源, 火山資源 등으로 分類된다.

地熱에너지資源 埋藏量의 評價는 마그마溜의 殘存熱量法, 地熱地域面積法, 自然放熱量法 등에 依하여 이루어지며, 지금까지의 評價結果에 依하면 天然蒸氣 및 火山性 高溫熱水에 依한 것이 5,000 萬kW, 앞으로 技術開發로 利用可能하다고 생각되는 中低溫熱水, 超深度熱流體, 高溫 및 火山熱 등에 依한 資源을 合하면 1.4億kW 정도이다.⁽¹⁰⁾

이들 地熱資源을 發電方法에 따라 나누어 보면 天然蒸氣에 依한 現存의 地熱發電과 이것을 改良한 天然蒸氣發電, 高溫 및 中低溫熱水의 熱量을 利用하여 飽和壓力이 높은 媒體를 使用하는 Rankine 사이클 發電(2流體 사이클), 超深度 地熱流體를 使用하는 發電과 火山 高溫岩體를 利用하는 人工熱水發電 등이 있다. 이들 發電 地熱源에 依한 地熱發電開發豫測을 圖示하면 그림 1과 같다. 이 線圖에서 알 수 있는 바와

같이 앞으로 約 10年間은 天然蒸氣를 使用하는 發電이 主體가 되고 있으나 漸次로 2流體사이클⁽¹¹⁾의 形式이 많이 使用될 것으로 생각된다.



A : 天然蒸氣, B : 熱水, C : 超深度流體, D : 高溫岩體

그림 1. 地熱發電開發豫測

2-3 地熱發電用 流體

地熱發電에 使用되는 流體는 地下의 高溫貯溜層에 들어있는 蒸氣와 熱水로 되어 있는 高溫流體를 地上으로 引出한 것이다. 貯溜層의 構造에 따라 蒸氣와 熱水가 分離되어 나오고 또 地上으로 뽑아내는 過程에 過熱되어 發電에 알맞는 熱氣를 얻는 경우와 蒸氣를 거의 포함하지 않는 熱水를 얻는 경우가 있다. 지금까지의 地熱發電에는 주로 前者의 地熱流體를 使用하고 있으며 美國의 Geysers 發電所, 日本의 松川發電所 등 現存하는 地熱發電所의 70%程度은 이 地熱流體를 使用하고 있다. 이와 같은 蒸氣를 얻는 경우에는 從來의 火力發電所나 原子力發電所에 使用되는 蒸氣터어빈의 技術을 利用할 수 있다.

그러나 地熱에너지源중 이와 같은 良質의 蒸氣는 10%程度로 豫想되며, 平均的으로 地熱流體는 蒸氣와 熱水의 重量比로 表示되는 氣水比는 1:4 정도이다. 따라서 앞으로의 長期에너지 需給計劃 중에서 相當한 部分이 地熱發電에 期待하기 위해서는 良質의 蒸氣로부터 熱水까지의

廣範圍한 地熱流體의 取扱이 必要하다.

地熱流體는 一般으로 蒸氣, 熱水 및 CO₂ 등의 不凝縮가스를 포함하고 있으며, 빗물 등의 자연수와 마그마로부터의 自然水가 高温의 貯溜層에 저장되어 있는 사이에 여러 가지 物質이 溶解되어 混入되는 경우가 많다.

火力, 原子力發電에 使用되는 流體는 純水이나 地熱發電에 使用되는 流體는 氣相으로서는 不凝縮가스를 포함한 蒸氣, 液相으로는 KCl, NaCl, H₂SiO₃, CaCl₂ 등을 함유하는 熱水이다. 이와 같은 地熱流體를 取扱하기 위해서는 熱工學的으로는 不凝縮가스를 함유하지 않는 凝縮器의 構造, 熱水의 温度降下에 따른 CaCO₃, SiO₂ 등의 스케일이 管路壁에 凝結하지 않는 플랜트의 構成 등의 特有한 問題가 있다. 地熱發電에 使用되는 流體는 物理的, 地質學的 性質로부터 다음과 같이 分類된다.

- ① pH가 크고 不凝縮가스가 그다지 많지 않은 乾燥 또는 熱水가 작은 증기
 - ② 不凝縮가스가 많은 熱氣
 - ③ pH가 크고 熱水가 主成分인 경우
 - ④ pH가 작고 熱水가 主成分인 경우
- 이들 중 現在까지 發電에 利用되는 것은 ①의 경우이다.

Ⅲ. 地熱發電 사이클

3-1 터어빈

地熱流體의 에너지를 動力으로 變換하기 위하여 地熱井으로부터 蒸氣熱水を 플레싱시켜서 얻은 蒸氣를 사용하여 4~6段의 軸流反動 또는 衝動터어빈이 사용되고 있다. 稼動中の 地熱發電所 터어빈이 入口温度는 130~170°C, 壓力은 그 飽和壓力인 2~7ata 이고, 出口壓力은 0.1 ata 정도이다. 火力이나 原子力의 터어빈에서 증기는 入口에서 過熱狀態이고 膨脹하여도 飽和域에 약간 들어갈 程度이다. 그러나 地熱蒸氣를 使用하는 터어빈에서 蒸氣는 飽和狀態이므로 膨脹할 때 漸次로 液相의 微小夜滴으로 되어 터어빈의 損失이 많아진다. 따라서 이러한

濕分에 依한 損失로 터어빈의 效率은 5~10% 낮아진다. 다시 濕도가 큰 蒸氣, 즉 地熱流井으로부터 氣水化가 작은 地熱流體를 그대로 터어빈에서 膨脹시키는 이른바 total flow turbine 에서는 現存의 火力·原子力用터어빈의 技術로는 터어빈效率이 매우 낮게 된다. 예를 들면 濕分에 依한 損失이 작은 衝動터어빈에서는 液滴의 加速時間이 길어지도록 그림 2와 같이 流路가 긴 特殊한 노즐을 使用하여 濕도가 큰 蒸氣를 使用하는 터어빈의 實驗이 이루어지고 있으나 그 效率은 매우 낮은 것으로 나타났다.

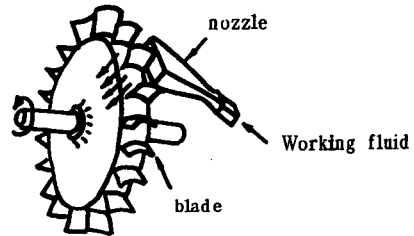


그림 2. Total flow turbine

그러나 total flow turbine 에서는 熱工學的으로 매우 흥미있는 內容을 가지고 있어서 他形式과 比較하여 보기로 한다. 現在의 地熱發電技術로서는 飽和域에 있는 蒸氣는 플레싱에 依하여 熱水의 一部를 蒸氣로 바꾸고 既存 蒸氣터어빈에 依하여 發電하고 있다. 즉, 生産井으로부터의 蒸氣를 터어빈高壓段에 보내고, 一段플레싱에 依하여 얻어지는 蒸氣를 中壓段에, 그리고 氣水比가 작은 경우는 一段플레셔로서 남은 熱水를 다시 플레싱하여 蒸氣를 만들고 低壓段으로 보내어 出力을 增大시키고 있다. 터어빈效率을 100으로 하여 濕蒸氣로부터 蒸氣만을 分離한 경우와 分離와 一段플레시, 分離와 2段플레시한 경우의 出力을 total flow turbine의 出力과의 比를 表示하면 그림 3과 같다.

그림 3에서 알 수 있는 바와 같이 앞으로의 地熱流體는 氣水比가 작은 것이 많은 것으로 생각되므로 total flow turbine 또는 터어빈形式 以外의 膨脹機의 開發이 必要하다. 그러므로 美國 등의 先進國에서는 二相加速노즐의 研究가

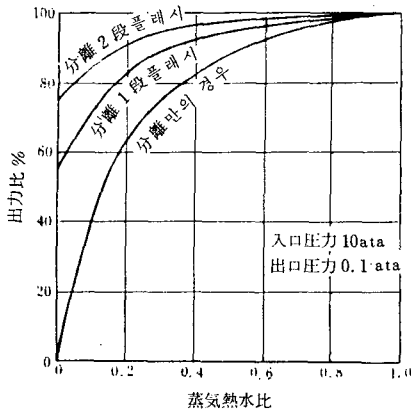


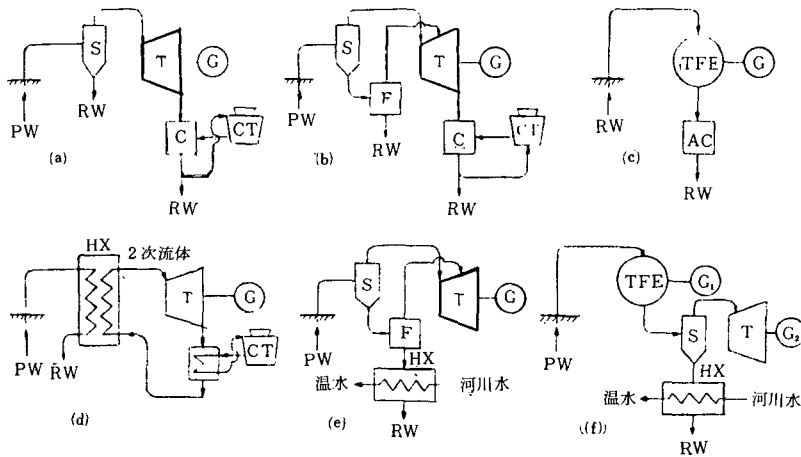
그림 3. 氣水比와 出力化

이루어지고 있으며 容積型膨脹機도 檢討되고 있다.

3-2 地熱發電 사이클의 熱力學的考察

地熱發電에 使用되는 사이클은 氣水比, 流體의 pH, 溫度, 不凝縮가스의 含有量 등에 따라 서 몇 가지 方法으로 分類되고 있다.

氣水比가 크고 溫度가 높으며 pH 값도 크고 不凝縮가스의 含有量의 몇 %以下일 때에는 復水式 터어빈이 使用되고 있다. 그림 4는 地熱發電사이클에 使用될 수 있는 各種 사이클을 表示한 것이다.(12)



PW: 生産井, RW: 還元井, S: 氣水分離器, F: 플래시, T: 터어빈, TFE: total flow 膨脹機, G: 發電機, C: 凝縮器, AC: 空冷凝縮器, CT: 冷水塔, HX: 熱交換器.

그림 4. 地熱發電 사이클

氣水比가 크고 乾蒸氣가 많을 때에는 그림 4 - (a)의 사이클이 使用되고, 氣水가 0.2~0.3 정도까지는 그림 (b)의 사이클이 使用된다. 現在의 地熱發電사이클은 거의 모두가 (a), (b)의 것을 사용하고 있다. 그러나 앞으로 열효율이 높은 total flow 膨脹機가 개발될 경우에는 (c)의 사이클이 될 것이다. 또 地熱流體가 거의 熱水이고, pH 값이 3以下로서 腐蝕性이 있거나 또는 多量의 不凝縮가스를 含有한 경우에는 低沸點의 熱媒體를 가열 증발시켜 그 蒸氣를

사용하여 Rankine 사이클로서 發電하는 (d)와 같은 2流體 사이클이 使用된다. 이 사이클은 地熱流體와 熱媒體의 2가지 流體가 使用된다. 그림의 (e)는 플래싱에 의하여 分離된 熱水에 너지를 地域暖冷房 또는 農業用溫室 등에 利用하는 發電·多目的사이클이다. 더욱 高壓의 地熱流體가 얻어질 때에는 膨脹比가 작은 total flow 膨脹機를 高壓側에 使用하고 그 排氣로부터 蒸氣를 分離하여 터어빈을 馳動하고 熱水를 多目的으로 使用한 경우 (f)이다.

地熱發電所는 火力, 原子力發電所와 달리 山間地方에 設置되는 경우가 大部分이다. 그림 5는 分離 1 段플래시 地熱發電의 原理를 나타낸 것이다. (그림 4-(b)). 冷水塔에서 冷却된 冷却水는 大氣溫度보다 높고 또 不凝縮가스의 영

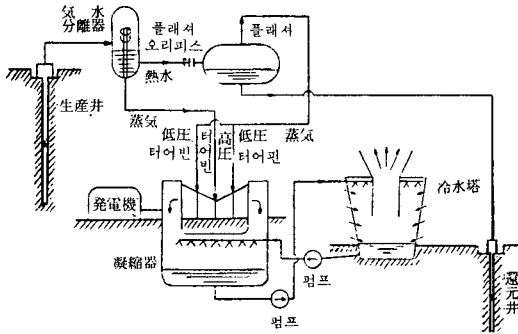


그림 5. 分離 1 段플래시 地熱發電原理圖

향을 받아서 터빈 排壓은 火力·原子力用 터빈보다 높은 보통 0.1 ata 정도이다. 不凝縮가스를 응축기로부터 뽑아내기 위하여 압축기, 증기 이젝터(steam ejector) 등이 사용되나 발전 용량이 많아지거나 不凝縮가스량이 많아지면 이 가스를 除去하는데 큰 動力이 必要하게 된다. 그림 4-(d)에 表示한 2 流體사이클은 氣水比가 大端히 작거나 熱水만을 地熱流體로 하거나 또는 그림 4-(b) 또는 (c)의 사이클에 利用할 수 없는 熱水の 熱에너지를 有效하게 利用할 수 있기 때문에 各國에서 注目하고 파 일렛 플랜트 등에서 그 性能을 檢討하고 있다.

지금 溫度 T_1 °K 인 熱水가 2 流體사이클을 하는 原動所로 들어가서 外部에 대하여 일 W 를 하고 溫度 T_2 °K로 나올 경우 外氣溫度가 T_0 이고, 冷媒의 凝縮溫度가 T_0 보다 높은 T_c 일 경우에 對하여 생각하여 보기로 한다. 이 때 T_c 와 T_0 의 差는 冷却水를 만드는 冷水塔 또는 空冷凝縮器의 性能으로부터 求할 수 있다. 따라서 2 流體사이클에서의 有效일을 생각할 때에는 T_0 代身에 T_c 를 使用할 수 있다.

熱水の 物性値는 거의 물과 같으므로 比熱을 c 라 하면 溫度 T_1 에서 T_2 까지의 最大일 L_m 은

다음 式으로 表示된다.

$$L_m = c(T_1 - T_2) + T_c(S_1 - S_2) \quad (1)$$

여기서 添字 1, 2는 2 流體사이클의 入口, 出口의 狀態를 表示한다. 또 엔트로피 S 는

$$S_1 - S_2 = c \ln \frac{T_1}{T_2} \quad (2)$$

따라서 式 (1)은

$$L_m = c(T_1 - T_2) - c T_c \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \quad (3)$$

로 表示된다.

또한 基準溫度를 凝縮溫度 T_0 로 取하면 最大 有效일은 다음 式으로 表示된다.

$$L_{max} = c(T_1 - T_2) - c T_0 \ln \left(\frac{T_1}{T_0} \right) \quad (4)$$

流量을 G 라 하면 有效에너지의 利用比率 ξ 는 實際의 出力을 H 라 하면

$$\xi = \frac{H}{G L_{max}} \quad (5)$$

로 表示된다.

熱水만을 2 流體사이클의 熱源으로 使用할 경우 ξ 는 펌프, 터빈, 加熱, 蒸發器, 冷却, 凝縮器에서의 熱傳導, 摩擦 등의 排可逆現象이 損失로 因하여 1 보다 작으며 값은 그림 6 과 같이 熱媒體의 種類에 따라 다르다.

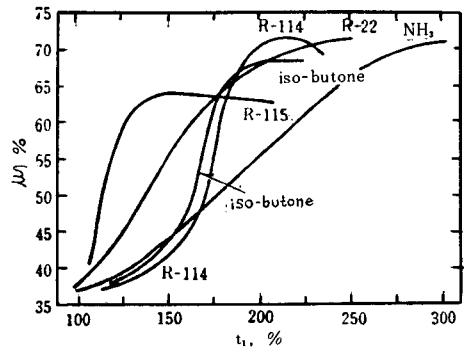


그림 6. 熱媒體와 有效率

3-3 地熱에너지를 利用한 地熱發電 現況

지금까지의 地熱發電現況을 살펴보면 日本의 경우 地熱發電所數가 7 個所 정도이며 發電定格 出力은 218,000 kW 程度이고, 蒸氣條件은 壓力이 1.5~6.5 kg/cm²g 이고, 蒸氣의 溫度는 127~164°C 程度이다. 地熱發電의 發電經費는 火力, 原子力發電所와 거의 같으나 그 內容으로 보면 현저한 差異가 있다. 卽, 充分한 容量을 갖는

地下의 地熱流體貯溜層을 探查하고, 必要한 流量을 保有한 生産井을 굴착하는 등 所要經費의 利用도가 火力發電의 경우와는 相異하다.

地熱發電所는 그 容量이 커질수록 生産井, 還元井, 集合管 등의 地熱發電特有的 機器에 對한 所要經費는 增加한다. 이것은 容量이 커질수록 各井을 깊이 굴착하여야 하며 이들 서로간의 干涉이 일어나지 않도록 充分한 間隔을 가져야 하므로 더욱 그러하다. 그림 7은 地熱發電所의 出力과 建設經費와의 關係를 나타낸 것이다. 이 線圖에서 알 수 있는 바와 같이 地熱發電所의 特有機器에 利用되는 裝備의 建設費는 出力의 增加와 더불어 많아지나 發電裝置의 費用은 오히려 감소되는 傾向을 보이고 있다.

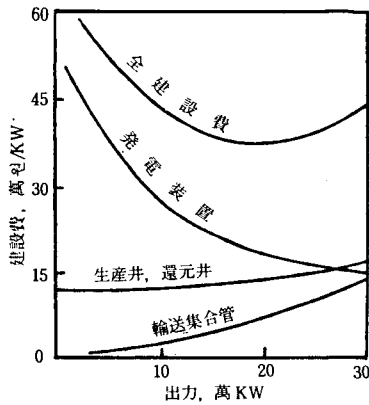


그림 7. 地熱發電所의 出力과 建設費

IV. 結 語

지금까지 살펴본 바와 같이 地熱에 依한 에너지는 앞으로 地質學的 環境이나 條件에 따라 開發될 수 있는 새로운 에너지源이라고 볼 수 있으며 이를 實用化하고 原動所사이클의 效率을 增大시키기 爲하여는 氣水比가 작은 熱水를 利用할 수 있는 total flow turbine 이나 膨脹機 등의 開發이 先行되어야 할 것으로 믿는다. 또

한 앞으로의 地熱發電사이클의 性能을 向上시키기 爲해서는 生産井에서 發電集合機器 內의 地熱流體의 2相流 流動, 熱交換器 및 還元井에서 熱水의 溫度低下에 의한 SiO₂ 등을 함유한 스케일의 析出防止, 流路閉塞防止技術 등의 熱工學分野의 研究開發이 先行되어야 할 것이다.

또한 地熱資源의 效用을 높이기 위하여는 貯溜層과 生産井出口의 壓力低下를 막고, 發展에 利用되는 最高溫度를 높여서 最大일을 크게 하여 出力을 增大시켜야 한다. 그러므로 앞으로 地熱資源을 開發하려면 무엇보다 2相流 流動을 考慮한 에너지 移動現象과 最適發電條件을 求하기 위한 地下系의 熱工學的檢討가 이루어져야 할 것이다.

參 考 文 獻

1. B.J.Skinner ; Earth resources, Prentice-Hall (1969)
2. M.K.Hubbert : Energy Resources, NAS 1962. - 2857 GW.
3. NAS-NRC : Resources and Man, Freeman 1969 - 64 GW.
4. D.E.White : Geothermal Energy, U. S. Geol. Survey Circ. 519 (1965) - 60 GW.
5. C.S.Starr : Science, Jul. 1971.
6. J.L.Tuck : Los Alamos Scientific Lab. Report, LA-DC 9515 (1970)
7. F.Daniels : Direct Use of the Sun's Energy, Yale Univ. Press (1964).
8. World Oil, Aug 1972.
9. US Energy Outlook 1971.
10. 角清愛 : 地學雜誌 85 (1976). 10.
11. Van Wylen and Sonntag : Fundamentals of Classical Thermodynamics, p. 354. John Wiley & Sons, Inc.
12. 森康夫 : 地熱發電と 熱工學, 機械の研究 第 31 卷 1 號 pp. 113-118.