

細菌에 의한 有用金屬鑛物 浸出研究의 現況

李 康 淳*

緒 論

鑛業의 諸分野에서 微生物이 重要な 役割을 하고 있다는 事實은 相當히 오래前부터 注目되어 왔었다.

最近의 研究로 石炭, 石油, 天然 Gas 等の 燃料鑛物鑛床의 形成 및 崩壞에 微生物이 關係하고 있음이 밝혀져 이들 微生物을 利用하여 石油의 二次回收나 燃料鑛物로부터의 脫硫研究, 石油, 天然 Gas 鑛床의 微生物探查研究等으로 發展하고 있으며 이들 研究以外에도 硫化鑛床의 形成이나 崩壞에 關係서도 微生物이 重要な 役割을 하고 있음이 地質學이나 鑛山學 分野의 系統的인 研究로서 밝혀지고 있다.

周知의 事實이거니와 鑛山에 있어서는 採掘한 鑛石을 選鑛하여 精鑛으로서 品位를 높인 後에 製鍊소에 보내져 그곳에서 製鍊하여 各種의 有用金屬이 만들어지고 있다. 選鑛後의 尾鑛은 廢滓로서 버려져 坑外에 堆積된다. 이들 廢滓中에도 微量의 有用金屬이 含有되어 있는 것이다. 또 採鑛에 있어서도 여러가지 事情에서 鑛床內의 鑛石을 全部 採掘할 수도 없는 것이며 低品位로서 採掘할 수 없는 鑛石도 있다.

따라서 이들 廢滓, 坑內殘鑛, 低品位鑛에서 어떠한 方法으로 遺利를 回收할 수 있다면 이들을 活用할 수 있는 것이다. 特히 우리나라와 같이 天然地下資源이 貧弱한 나라에서는 遺利의 效果的인 回收方法이 要望되고 있던바 外國에서 實用化되고 있는 無機營養細菌을 利用한 金屬鑛物이나 鑛石으로부터 有用金屬 浸出法 研究의 國際的인 動向과 그 作用機轉에 關係 體系的으로 簡單히 記述해볼가 한다.

各國에 있어서의 Bacterial Leaching 法の 研究概要

坑內水中에 棲息하고 있는 細菌이나 그 生理에 關係한 研究는 相當히 오래前부터 報告되고 있으나 이 細菌을

體系的으로 leaching 에 應用하여 有用金屬의 回收를 效果的으로 實施하는 bacterial leaching 法은 比較的 새로운 것으로서 10數年의 歷史를 가지는데 지나지 않는다. (1922年 Rudolfs 가 閃亞鉛鑛에서 亞鉛을 浸出시키는데 細菌의 影響을 研究하였다는 記錄은 있으나 이때 어떠한 細菌이 어느 程度의 影響을 미치는지에 關한 자세한 點은 밝혀지 못하였다.) 從來發表되어 있는 많은 研究들은 그 大部分이 研究室에 있어서의 室內實驗에 依해 얻어진 結果들로서 이것을 bacterial leaching 法으로서 實操業에 應用한 內容이나 成績에 關係서는 現在까지 詳細한 報告는 別로 없고 斷片的으로 情報가 傳해지고 있을 뿐이다. 따라서 下記의 內容들도 實驗室의 成果를 主體로 하고 있으며 또 制限된 紙面으로 各研究者의 研究 全貌를 紹介할 수 없어 여기서는 各國에 있어서의 研究를 要約하여 記述하기로 한다.

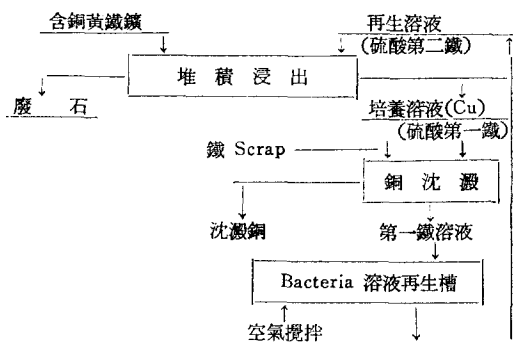
美 國 ;

美國에 있어서의 bacterial leaching 에 關한 研究는 Kennecott Copper Corporation 에서의 研究를 第1로 例據할 수 있다. 이 會社는 Salt Lake City 에 있는 Utah 大學構內에 Research Center 를 가지고 있어 bacterial leaching 에 關係서는 이 研究所의 Extractive Metallurgy 部門에서 담당하고 있다. 이 機關의 가장 큰 成果로는 1958 年 S. R. Zimmerley 等에 依한 特許(Cyclic Leaching Process Employing Iron Oxidizing Bacteria)로서 이 特許는 銅, Molybdenum, 亞鉛, Titanium 및 Chromite 等の 鑛石을 浸出할 때 消費되는 浸出液을 細菌에 依하여 再生하여 反復 使用하는 Cyclic Process 에 關한 것이다. (第 1 圖)

Kennecott Copper Corporation 에서는 이 特許의 方法을 Bingham Canyon 및 Ohio 銅鑛山의 廢石堆積場에서 銅浸出에 應用하고 있다.

이 方法으로 Bingham Canyon 鑛山에서는 1961 年度에 9,438 t, 1962年度에 16,678 t의 銅을 回收하고 있으며

* 原子加研究所



第1圖 硫酸第一鐵溶液的再生에 細菌을 利用하여 沈澱銅을 採取하는 系統圖

1965年度에 72,000 t의 沈澱銅을 採取²⁾하고 있다.

Salt Lake City 近郊에 있는 Brigham Young University 의 化學教授인 L. C. Bryner 는 bacterial leaching 에 關한 研究로서는 美國에서도 Pioneer 로 活躍하고 있는 學者로서 Kennecott Research Center 의 研究에도 많은 影響을 주고 있으며 Bryner 教授의 研究特徵은 細菌自體에 關한 基礎的인 面보다 오히려 bacterial leaching 의 實用面에 置重한 基礎的인 諸問題를 實驗室의 規模에서 研究하는 點이라 할 수 있다.

卽 T. ferrooxidans 및 T. thiooxidans 라 生覺되는 細菌으로 黃鐵礦이나 各種 硫化銅礦物의 浸出研究, 日數와 浸出量의 關係, 浸出量에 미치는 pH 值의 影響, 養分으로서의 Ammonium Ion 의 最適量等에 關한 優秀한 成果를 發表³⁾하고 繼續하여 같은 細菌을 使用하여 低品位 Molybdenum 礦의 浸出⁴⁾, Silica Gel 固形培地에서 細菌의 同定研究을 하고 또 同教授의 指導下에 黃鐵礦, 黃銅礦 및 硫化銅礦物의 bacterial leaching⁵⁾에 있어 溫度 및 其他 條件의 影響⁶⁾에 關한 研究들이 있다.

U. S. Bureau of Mines 에서 J. A. Sutton 및 J. D. Corrick 등이 中心이 되어 T. thiooxidans 를 使用하여 各種 銅礦物, 銅鐵石, 銅, 鉛, 亞鉛礦, Cobalt 礦 및 Mangan 礦等에 對한 浸出實驗을 實施하여 T. thiooxidans 는 鐵石에서 銅이나 Cobalt 를 浸出시키는데 有效하며 銅礦物中에서도 珪酸鹽, 炭酸鹽 및 酸化銅의 形態가 硫化銅礦物보다 細菌에 依한 浸出이 容易하며 T. thiooxidans 에 依한 浸出機轉은 細菌에 依해 生成된 硫酸에 依한 浸出이란 點을 提示⁷⁾하고 또 F. ferrooxidans 및 T. thiooxidans 등의 數種細菌에 依한 含銅 硫化礦物의 浸出에 關한 研究를 하여 이들 細菌에 依한 浸出時 Alkali 性脈石礦物의 妨害作用, 浸出機轉에 關한 研究도 發表⁸⁾하고 있다.

Syracuse Univ. 의 M. P. Silverman (現在는 U. S. Bureau of Mines에 移籍) 등은 F. ferrooxidans 의 大

量增殖法에 對한 研究를 하여 9K 培地를 發表⁹⁾하고 있다.

Canada:

Canada 에 있어서의 bacterial leaching 研究는 美國에서 보다 늦게 始作되으나 現在 British Columbia Univ. 의 B. C. Research Counsel 에서 活發하게 研究가 進行되고 있으며 興味있는 研究成果가 報告되고 있다. 그 中에서도 獨創的이라 生覺되는 것은 界面活性劑添加의 影響에 關한 研究成果¹⁰⁾들이며 이 研究에서 使用한 細菌은 T. ferrooxidans 로서 高品位 黃銅礦의 浸出實驗을 하여 이때 陰 Ion, 陽 Ion, 및 中性의 各種界面活性劑를 添加하여 그 效果를 檢討하였다. 그 結果 界面活性劑로서는 中性活性劑인 Tween 20, 40, 60, 80 및 Trio X-100, 陽 Ion 活性劑로는 Hyamine 2389, 및 Quak TT 5386 이 銅의 浸出에 效果的으로 作用함을 밝히고 또 그 機轉에 있어 活性劑 自身은 銅을 浸出하는 能力을 지니지 않으며 다만 이를 活性劑의 添加에 依하여 黃銅礦表面이 濕度를 維持하여 礦物表面에의 細菌接觸을 促進함을 推論하고 Tween 20 에 對해서는 銅礦의 量에對한 重量 百分率로하여 0.003~0.004% 의 比率로 添加했을 때가 가장 效果的으로서 Tween 20 을 0.003% 添加한 接種試料은 이를 加하지 않은 接種試料에 比하여 約 3倍의 銅浸出量을 얻었다고 報告하고 있다.

Ottawa 에 있는 Department of Mines and Technical Surveys Mines Branch 에서 實施한 Elliot Lake Ore의 Uranium 礦의 bacterial leaching 의 實驗에 있어서 接種試料은 對照試料에 比하여 全體 Uranium 含量의 56% 를 浸出하는데 成功하고 있다.

소련:

소련에 있어서의 bacterial leaching 研究는 Moscow 에 있는 科學 Academy 內의 微生物研究所에서 主로 研究되고 있다. 1962 年 이 研究所의 N. N. Lyalikova¹¹⁾ 등은 T. ferrooxidans 를 使用하여 黃鐵礦 및 黃銅礦을 含有하는 Degtyarka 鐵床의 鐵石에 對해서 bacterial leaching 의 基礎試驗을 實施하여 接種試料에 있어서의 溶銅量은 對照試料에 比해 8배에 達하고 있음을 報告하고 있다. 또 Lyalikova 등은 Severo-Karpushinskii 鐵山 및 其他의 鐵山에 있어서 bacterial leaching 을 應用하여 鐵床內浸出法을 試圖하여 이때 浸出反應液으로 清水를 使用한 實驗과 沈澱銅採取後의 尾水를 使用한 實驗을 比較한 結果 後者가 越等히 溶銅量이 많음을 報告하고 이 事實에 對해서 尾水中에는 多量의 硫酸第二鐵과 硫酸이 含有되어 있으며 또 細菌이 重要な 役

割을 하고있기 때문이라고 說明하고 이것은 Krangvar-deiskii 鑛床의 沈澱銅採取裝置에서는 T. ferrooxidans 가 1 ml 當 10,000 菌體가存在하고 Degtyarka 鑛床의 銅精鑛中에는 1 gr當 1,000,000 菌體가 存在하고 있기 때문이며 또 硝酸鹽類를 含有하고 있는 酸性溶液으로 細菌의 發育에 適當한 條件을 만들어 주면 一層더 浸出過程을 促進시킬 수 있을 것이라 記述하고 있다.

日 本 :

日本에 있어서의 研究現況을 보면 岡山大學의 今井¹²⁾ 등은 T. thiooxidans 를 對象으로 하여 分離, 同定, 菌의 發育條件, Energy 効率 및 生理學의 特性에 關해 研究하고 있어서 細菌에 依한 硫黃의 酸化機轉 및 energy 轉換의 機轉을 밝히고 있으며 이들 細菌을 利用하여 低品位鑛에서 Mangan 의 浸出에 좋은 成果를 發表¹³⁾하고 있다.

三菱金屬鑛系의 中央研究所에서 bacterial leaching 에 關해 깊은 關心을 가지고 研究하고 있으며 鐵酸化細菌 및 硫黃酸化細菌의 同定과 그 特性研究¹⁴⁾를 하고 있다.

工業技術院 醱酵研究所에서도 bacterial leaching을 研究하고 있으며 日本에서는 처음으로 T. ferrooxidans 를 同定하는데 成功하고 京都大學工學部資源工學教室에서는 大阪市水道局水質試驗所 및 京大理學部 등과 協力하여 小坂, 土畑, 上北, 吉野 및 別子等の 銅鑛山의 坑內水에서 Thiobacillus 및 Ferrobacillus 屬等이 棲息하고 있음을 確認하고 이들 細菌을 利用하여 銅鑛物이나 銅鑛石으로부터 銅浸出 및 鑛石에서 Mangan의 浸出을 研究¹⁵⁾하여 相當한 成果를 올리고 있다. 또 同和鑛業 및 田中鑛業에서도 傘下의 小坂鑛山이나 土畑鑛山에서 bacterial leaching 을 實地現場化하고 있으며 日本에서는 1965년에 bacterial leaching 研究會를 組織하여 系統的인 bacterial leaching 에 關한 基礎的인 研究와 더불어 보다 나은 實用化研究에 박차를 가하고 있다. 이 때까지 日本坑內水에서 分離되어 報告된 細菌은 第一表와 같다. (第一表)

韓 國 :

우리나라에 있어서 bacterial leaching 이 可能的인 有用鑛物의 매장量은 相當한 것으로 알려져 있으나 商工部 發行인 鑛山現況과 開發方向에서 발췌한 銅鑛의 매장量은 總 2,036,000 톤으로 平均品位가 Cu 0.76% 이다. 이것은 大部分이 低品位이며 이 이외에도 低品位 銅鑛石은 相當量 있을 것으로 알려져 있다.

이 低品位銅鑛石을 長項製煉所에서 處理하여 電氣銅 屯當 生産價格을 計算할 때 約 36 萬圓(原鑛品位 Cu

第一表 日本坑內水에서 分離된 細菌

坑內水中의 細菌	鑛 山 名	報 告 書
Thiobacillus concretionarius	同和鑛業小坂鑛山	八 木 (1961)
	田中鑛業土畑鑛山	
	日本鑛業上北鑛山	
	三菱金屬鑛業小眞木鑛山	
Thiobacillus thiooxidans	三菱金屬鑛業小眞木鑛山	渡邊, 內田, 古谷 (1965)
Ferrobacillus ferrooxidans	同和鑛業小坂鑛山	八 木 (1961)
	田中鑛業土畑鑛山	
	日本鑛業上北鑛山	
	三菱金屬鑛業小眞木鑛山	
Thiobacillus ferrooxidans	———	渡邊, 內田, 古谷 (1965)
	———	栗 原 (1966)

1.0% 選鑛實收率 50%, 熔煉, 精煉 實收率 100% 로 辦 매이다.)

그러나 前述한 日本土畑鑛業所에서 細菌浸出法에 依한 產銅屯當原價는 62,304圓(日貨)에 不過하다.

이러한 點을 보더라도 우리나라에서 細菌에 依한 有用鑛石의 處理 方法의 研究가 時急하며 많은關係人士들에 依하여 實用化의 必要性이 痛感되고 있다.

著者の 研究室에서는 韓國에서 처음으로 低品位銅鑛石의 bacterial leaching 에 關한 研究를 하고 있으며 今年度에는 그 일환으로 國內 坑內水中의 細菌特性에 關해 金屬燃料綜合研究所 吳在賢博士와 韓國科學技術研究所 梁在炫博士 등과 共同研究를 進行中에 있으며 現在까지의 結果로는 우리나라에서도 有用鑛物의 bacterial leaching의 可能性이 있고 매우 希望的인 將來를 約束할 수 있는 成果를 거두고 있다.

其 他 :

以上 例據한 나라 外에 Portugal 에서는 Urgeria 에 있는 Uranium 鑛山에서 bacterial leaching 法을 應用하여 Uranium 의 60~80% 를 採取하고 있다는 報告¹⁶⁾도 있고 Italy, Australia 및 南阿連邦等에서도 bacterial leaching 의 研究를 하고 있다고 전해지고 있다.

Bacterial Leaching 의 機轉 :

金屬鑛物이나 鑛石으로부터 有用金屬의 浸出이 特殊한 細菌의 作用에 依하여 助長됨은 明白하나 浸出에 있어서 細菌의 存在가 왜 有効한가 또 浸出過程中에 細菌이 어떠한 役割을 하는가 등의 浸出의 機轉에 關해서는 아직 밝혀지지 않은 點이 많다. 現在까지 報告되고 있는 文獻들을 綜合整理하여 본다면 다음 두 가지로 나눌 수 있다. 卽 그 하나는 細菌自體가 直接鑛物이나

鑛石中の有用金屬에 作用하여 溶出作用을 하는 것이 아니고 有用金屬의 溶出은 化學的인 反應에 依하여 이루어지며 이때 溶出에 必要한 溶液條件에 細菌이 觸媒的으로 매우 有効하게 作用한다는 說과¹⁷⁾ 이에對해서 細菌自體가 鑛物이나 鑛石中の 有用金屬에 直接作用하여 溶出作用을 한다고 生覺하는 說¹⁸⁾이다.

以下 簡單하게 그 內容을 說明해보기로 한다.

化學的反應說

T. thiooxidans나 T. concretivorus같은 細菌은 硫黃元素를 酸化하는 能力을 가지고 있으며 그 結果 이들이 棲息하고 있는 溶液中에 H_2SO_4 를 生成한다. 또 F. ferrooxidans나 T. ferrooxidans 등의 鐵酸化細菌은 $FeSO_4$ 를 酸化하여 $Fe_2(SO_4)_3$ 을 生成하는 能力을 가지고 있으므로 이들 細菌이 棲息하는 溶液에는 $Fe_2(SO_4)_3$ 가 많아진다. H_2SO_4 溶液이나 $Fe_2(SO_4)_3$ 溶液은 一般的으로 硫化鑛物이나 其他 鑛物의 化學的 浸出法에 있어서 有効한 溶劑로서 普遍的으로 많이 利用되는 것이다. 따라서 本說은 bacterial leaching에 있어서 生成된 H_2SO_4 나 $Fe_2(SO_4)_3$ 가 直接溶劑가 되며 化學的反應이 일어나 有用金屬이 溶出되는 說로서 自然酸化에 依해 H_2SO_4 나 $Fe_2(SO_4)_3$ 가 坑內水中에서 生成되기도 하나 그 生成速度가 極히 緩慢하며 이때 細菌이 關與하면 그 速度는 觸媒的으로 加速되며 이 原理가 效果的인 浸出作用을 하는 根本要因이라 生覺하는 것이다.

細菌의 直接作用說

酸性의 硫酸第二鐵溶液에 依하여 硫化銅鑛이 浸出된다는 事實이 알려지기는 相當히 오래 되었으나 萬一 條件만 具備된다면 第二鐵 Ion이 浸出速度를 增進시킬 수 있음에 比하여 細菌에 依한 浸出은 보다 直接的인 作用인 것으로 生覺되고있다. 卽 鐵酸化細菌은 Fe^{+2} 를 Fe^{+3} 로 酸化할 수 있을 뿐만아니라 Cu나 S를 溶解할 수가 있고, 같은 作用으로 黃銅鑛, Nickel 鑛이나 其他 金屬硫化物을 直接 溶解시킬 수 있는 것으로 生覺되고있다.

黃銅鑛에 對한 實驗結果에 依하면 Fe^{+3} 濃도가 0.5g/l 이상일때보다 그 以下일때 銅이나 硫酸鹽이 急速히 遊離된다.

萬一 黃銅鑛에 대한 細菌의 作用이 間接的인 것이고 Fe^{+3} 만이 有効한 浸出劑로 作用한다면 이같은 結果는 없는것으로 해석되고 또 T. thiooxidans의 作用을 받는 硫黃結晶이 細菌의 直接的인 浸蝕作用을 나타내는 寫眞攝影의 報告等으로 보아 이 細菌은 硫黃을 直接浸蝕하여 酸化한다는 說이다.

以上에서 記述한 bacterial leaching에 있어 細菌이 直接硫黃이나 金屬에 作用하여 浸出을 促進한다고 생각

하는 學者들도 많으나 T. thiooxidans의 硫黃에 對한 作用은 別途로 生覺한다 하더라도 一般的으로 細菌類가 直接 金屬에 作用하는지 與否에 關해서는 今後의 研究結果들에 期待해볼 수 밖에 없다.

우리나라에 있어서 Bacterial Leaching의

今後 課題

以上에서 bacterial leaching에 關한 研究現況을 概說하였거니와 結論的으로 우리나라에 있어서 bacterial leaching 研究에 對한 今後의 課題에 關해 著者의 意見을 整理해 볼가 한다.

bacterial leaching에 關한 今後의 課題로서는 實用化의 促進問題라 生覺된다.

前述한바와 같이 bacterial leaching에 關與하는 細菌自體의 各種研究나 또 이들 細菌을 利用한 實驗室의 인 浸出에 關한 研究은 이미 外國에서 活潑하게 實驗되어 여러가지 成果를 거두어 우리에게 有益한 資料를 提供하고 있다. 우리나라에서는 이들 知識을 最大限으로 利用함은 勿論 實用化라는 見地에서 要望되는 基礎的인 研究로 bacterial leaching에 依한 浸出機轉의 보다 詳細한 解明과 關與하는 細菌의 大量增殖法에 關한 研究을 通하여 現在 우리가 가지고 있는 知識以上으로 보다 明確한 機轉을 解明할 수 있다면 實用化의 方策 수립이 容易하며 또 細菌의 大量增殖의 研究는 實用化의 成否를 左右하는 效果的인 要件이 될것으로 생각되고 同時에 bacterial leaching의 實用化로 向한 應用的인 研究도 以上の 基礎的인 研究과 併行하여 研究할 必要性이 있을것으로 生覺된다.

우리나라에 있어서 有用鑛物의 매장량은 相當한것으로 알려져 있으나 그 大部分이 低品位鑛이 많아 從來의 採鑛, 選鑛 및 製鍊方式으로는 經濟性이 薄弱하여 活潑한 資源開發을 期待할 수 없는 形便이라 貧鑛處理開發의 研究는 必要不可缺한 것으로서 現在로서는 細菌을 利用한 bacterial leaching法이 가장 有望視되고 있는 것이다.

著者의 研究室에서는 現在 低品位有用鑛物 開發의 目的으로 國內鑛山에서 bacterial leaching에 關與하는 細菌을 分離하는 研究를 進行中에 있으며 또 國內鑛山의 坑內水中에서 問題의 細菌이 生育하고 있음을 確認하였다. 이것은 우리들이 모르고 있는 사이에 bacterial leaching이 進行되고 있는 것을 暗示하는 것으로서 現在의 自然條件下에서 行해지고 있는 leaching을 보다 迅速하게 問題의 細菌類의 增殖을 可能하게 하는 最適環境을 鑛床內에 人工的으로 만들어 주는 課題가 남아 있으나 bacterial leaching은 어느 鑛床이

나 鑛床條件에 對해서 普遍的으로 適用할 수 있는 것이 아니고 個個의 鑛床條件에 應한 最適이라고 生覺되는 方法을 獨自의 立場에서 檢討되어야 할 性格임으로 bacterial leaching 法을 實用化하기 爲하여는 細菌學者와 鑛山學者間의 效果의인 共同의 目的下에 研究를 한다면 우리나라에서도 머지않은 將來에 bacterial leaching 法이 實用化 될것임을 確信하는 바이다.

引用文獻

- 1) S. R. Zimmerley, D. G. Wilson & J. D. Prater: U. S. Patent 2, 829, 946, April 8 (1958)
- 2) G. O. Argall: World mining, Jan., 40~41(1964)
- 3) L. C. Bryner, J. V. Beck, D. B. Davis & G. D. Wilson: Industrial and Engineering Chem., 46, 2, 587~2, 592 (1954)
- 4) L. C. Bryner & R. Anderson: ibid., 49, 1, 721~1, 724 (1957)
- 5) L. A. Decker: Master's thesis, Brigham Young Univ. (1959)
- 6) E. R. Palmer: Master's thesis, Brigham Young Univ. (1961)
- 7). 8). J. A. Sutton & J. O. Corrick: U. S. Bureau of mines, R. I. 5, 839 (1961), R. I. 6, 423 (1964).
- 9) M. P. Silverman. & D. G. Lundgren: Jour. of Bacterial, 77, 642~647 (1958), 78, 326~331.
- 10) M. P. Silverman, Martin H. Rogoff & I. Wender: Appl. Microbiol., 9, 491~496 (1961)
- 11) D. W. Duncan & P. C. Trusselli: Canadian Metall. Quarterley, 3, 43~55 (1964)
- 12) 今井和民, 奥積昌世, 片桐英郎: 酵素化學シンポジウム, 第17集, 132~143(昭 37)
- 13) 田野達男, 今井和民: 日本農藝化學會誌, 37, 576~579(昭 38)
- 14) 渡邊壓美, 內田武司, 古谷進: 陸 水學雜誌, 26, 152~164(昭 40)
- 15) 伊藤一郎, 若園吉一, 近藤正義, 八木正二, 香月祐彦: 日本鑛業會誌, 76, 524~529(昭 35) 伊藤一郎, 若園吉一, 高島哲雄: 水曜會誌, 15, 233~236(昭 39)
- 16) J. W. Franklin: Eng. and Min. Jour., 160, 157 (1959)
- 17) J. A. Sutton & J. D. Corrick: Mining. Eng., 15, 37~40 (1963)
- 18) W. E. Razzell: Canadian Min. & Metall. Bulletin, March, 190~191 (1962)