

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 台灣車籠埔鑽井岩芯和流體的物理、化學性質和微生物 (I)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC93-2119-M-002-028-

執行期間：93年08月01日至94年12月31日

執行單位：國立臺灣大學地質科學系暨研究所

計畫主持人：宋聖榮

共同主持人：鄧茂華，詹瑜璋，楊燦堯，陳文山，陳于高，李德貴，李建成，  
李元希，王珮玲

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 95 年 3 月 30 日

台灣車籠埔鑽井岩芯和流體的物理、化學性質和微生物

計畫類別： 個別型計畫  整合型計畫

計畫編號：NSC 93-2119-M-002-028

執行期間：93 年 08 月 01 日 至 94 年 12 月 31 日

計畫主持人：宋聖榮

共同主持人：王珮玲、鄧茂華、陳于高、陳文山、楊燦堯、李元希、  
李德貴、詹瑜璋、李建成

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告  完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、  
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年  二年後可公開查詢

執行單位：國 立 台 灣 大 學

中 華 民 國 95 年 3 月 30 日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 台灣車籠埔鑽井岩芯和流體的物理、化學性質和微生物

### Physical and Chemical Properties and Microbiologic Analysis of Core Materials and Fluids in the TCDP

計畫編號：NSC 93-2119-M-002-028

執行期限：93 年 8 月 1 日至 94 年 12 月 31 日

主持人：宋聖榮 國立臺灣大學地質學系

#### 一、中文摘要

台灣車籠埔斷層深鑽計畫從 2004 年初開鑽，至 2004 年底完成 A 井 2000 公尺的岩芯取樣，又從 2005 年 5 月中旬完成 B 井從 950 公尺至 1350 公尺的鑽探和岩芯取樣。A 井的岩芯描述顯示，車籠埔斷層深鑽共發現有六個主要斷層帶，由地表斷層露頭和淺層震測結果、A 井溫度監測結果、井測資料和在 1111.29 公尺處發現有新鮮的假玄武玻璃，結果顯示集集大地震的滑動帶位於 1111.29 公尺左右的斷層帶。斷層泥的黏土礦物組成主要是伊萊石、高嶺土、綠泥石和膨脹土等。其中，在 1111.19 ~ 1111.31 公尺處為黑色的超磨碎岩，其高嶺土和綠泥石含量幾乎消失，伊萊石也大量減少，而膨脹土則大量增加。由黏土礦物的熱破壞實驗，顯示 921 集集大地震斷層帶中的摩擦溫度可能高於 950°C。從斷層帶內含有假玄武玻璃，且大部分都已轉變為膨脹土，顯示造成 921 集集大地震大位移的機制可能為摩擦融熔和熱水壓作用所形成的。

**關鍵詞：**斷層岩石、車籠埔斷層、台灣車籠埔斷層深鑽計畫、地質微生物、氣體連續監測

#### Abstract

We have finished drilling the TCDP hole-A which it has the cuttings from 0 to 431.34 m and cores from 431.34 to 2003.26 m deep in the end of 2004. Meanwhile, the Hole-B with a branch was cored between 950 m to 1350 m in May, 2005. At least six fault zones have been identified in the cores. Based on the surface trail of rupture, regional geology, shallow seismic reflection, well logging, thermal measurement and core examinations, the slip zone of 1999 Chi-Chi earthquake may be occurred in the black material of fault zone FZ1111 around the depth of 1111.29 m. It is composed of 12 cm thick ultracataclasites with slickenline. The XRD and TEM analyses show that the black materials consist of amorphous phase, pseudotachylyte and rich in smectite which reach as high as 85% of total clays. However, the smectite-rich gouges can not find in other parts of the FZ1111 and the other fault zones. The smectite-rich gouge may be resulted from the devitrification of pseudotachylyte, produced by frictional melting after the rapid slip of

the seismic earthquake. Co-existence, thus, of pseudotachylyte and smectite-rich in the black materials of FZ1111 indicate that the mechanism of large displacement seismic faulting occurred in 1999 Chi-Chi earthquake may be due to the lubrication of thermal pressurization following the frictional melting.

#### 二、緣由與目的

由斷層所引發的地震，是目前人類已知的自然災害中，破壞性最大、影響範圍最廣、最無法預測和掌握的災害。翻開過去人類所遭遇過的地震災害紀錄中，如東京大地震、舊金山大地震、唐山大地震、墨西哥大地震、神戶大地震，以及集集大地震，所造成人類的生命和財產的損失，是其他自然災害所無法相比的。地震之所以可怕，在於他的不可預測性，以及到目前為止，對於地震發生的原因和發震帶的性質都不甚了解的緣故。一般而言，破壞性大地震的發震帶大都發生在上、中部地殼內（約 15 公里深度內）（Sibson, 1986; Scholz, 1988），而目前的科技無法直接探測那麼深地殼內的岩石性質，要研究發震帶的岩石性質和特性，唯有等他們抬升到地表淺處或露出地表後，才得以研究，但此時斷層帶上的岩石或多或少遭受到後來流體作用的影響，而改變原有的性質。為盡量減少流體對斷層帶岩石的影響，在大地震後直接鑽取不等深度斷層帶上的岩石，研究其組成和特性，以及流體的性質等，可以提供資料以了解該地區斷層的特性和力學行為、斷層帶上岩石的成因，以及引發地震的可能機制。

日本 1995 年曾發生規模 7.2 的 Kobe 地震，其是由 Nojima 斷層活動所引發的，地震過後，日本國家地球科學和災害防治研究所（National Research Institute for Earth Sciences and Disaster Prevention, NIED）規劃鑽取三口深井，分別為 1001 公尺，1313 公尺和 1838 公尺深的岩芯，以研究斷層帶的各種特性，獲得不錯的研究成果，業已出版專輯（Ando, 2001; Tanaka and Hinoki, 2001; Ohtani and Tanaka, 2001; Fujimoto and Tanaka, 2001; Kobayashi and Hirano, 2001; Matsuda and Arai, 2001; Arai and Okusawa,

2001; Uda and Lin, 2001; Tagami and Hasebe, 2001; Fukuchi and Imai, 2001)。1999 年車籠埔斷層發生劇烈的逆衝活動，提供了台灣學界從地表露頭到不等深度的鑽井岩芯，研究斷層帶上的演變過程和引發地震可能機制等種種問題的絕佳機會。另 Nojima 斷層帶的圍岩為堅硬的花崗岩，而車籠埔斷層帶的圍岩為較鬆軟的泥岩或粉砂岩，故鑽井取岩芯研究車籠埔斷層帶的特性結果，可與日本 Nojima 斷層帶上的性質相比較，進一步探討斷層帶的圍岩，對於形成斷層帶上的岩石種類、構造和地震成因的影響。

台灣車籠埔鑽井計劃 (Taiwan Chelungpu Drilling Project, TCDP) 在過去兩、三年中，受到國際大陸科學深鑽計劃 (International Continental Scientific Drilling Program, ICDP) 和 2001 年東亞地體構造國際研討會 (International Symposium of East Asian Tectonics, iSEAT) 的支援下，舉辦多次研討會討論車籠埔鑽井計劃的可行性和科學目標，再配合日本科學會 (Japan Science Technology Agency, JSTA) 和台灣國科會 (National Science Council of Taiwan, NSC) 合作於車籠埔斷層北段及南段各鑽一口約 300~400 公尺淺井的結果，獲得台灣車籠埔鑽井計劃的科學目標明確、可行性相當高的結論。故車籠埔斷層深鑽研芯的取得，可用以檢驗 Scholz (1988) 斷層剪切帶的模式，更進一步的了解車籠埔斷層帶上與斷層有關的岩石形成機制，並評估流體在斷層作用的角色。

台灣車籠埔斷層鑽探計畫已於 2004 年元月開始 A 井的鑽井取樣，目前已鑽至 1850 公尺左右 (2004 年 11 月底)，預計於 2004 年 12 月底完成 2000 公尺的岩心取樣。初步鑽井結果顯示，在深度 1111 公尺、1153 公尺、1222 公尺和 1241 公尺左右，各鑽獲斷層帶岩石。其中，深度 1111 公尺和 1153 公尺為逆衝斷層，1222 公尺為正斷層，而 1241 公尺為後逆衝斷層 (back thrust fault)，而從初步的證據顯示，最有可能引發 921 集集地震的車籠埔斷層剪切帶坐落於深度 1111 公尺的斷層帶上，不過還有待未來進一步的研究確定。在確認鑽穿車籠埔斷層帶後，於 2004 年 7-8 月向國際邀約研究車籠埔鑽探岩芯計劃書，總共收到 27 個來自台灣、日本、美國和法國的研究計劃書，並於同年 10 月 18-19 日在中油苗栗探採研究中心，舉辦國際岩芯分樣研討會 (Sampling Party Workshop; 研討會內容如表二)，且於 11 月底完成斷層帶和上部圍岩 (450~1300 公尺) 的分樣工作。

另外，從 2005 年二月中開始 B 井的鑽井取樣，預計利用 4 個月的時間，於 2005 年六月完成 B 井 1300 公尺的鑽井和取樣。B 井從地表至 900 公尺只鑽進不取樣，從 900~1300 公尺則全程取岩芯，所

鑽獲的 400 公尺岩芯，將與日本 JAMSTEC 合作，直接送至日本 Kochi 大學岩芯實驗室作一系列非破壞性的測量，包括有 X-光斷層掃描 (X-ray CT scanner)、磁感率-密度-孔隙度等 (Multi-Sensor Track (MST))、X-光螢光掃描儀掃描 (XRF Scanner)、以及其他的物理性質等，這對了解岩芯的物理和化學性質有莫大的幫助。B 井岩芯完成非破壞性分析實驗後，將再送回台灣進行分樣給各研究者進行分析研究。

完成 A 井和 B 井的岩芯採樣後，兩井將保留並進行一系列的實驗，包括井測實驗 (logging)、兩井灌水實驗測量地層原地孔隙度和滲透性 (cross-hole experiments)、水力爆破實驗測量原地應力 (hydro-fracturing test)、抽取地層水以分析流體成分、以及後續的各種監測研究 (包括有井下地震儀、井下應變計、井下溫度和斷層帶流體成份變化等)。

本計畫的主要目的是針對台灣車籠埔斷層鑽井計畫所獲得的岩芯，分析岩芯中斷層帶岩石和圍岩的物理和化學性質，以及流體的成分，以了解車籠埔斷層的特性和力學行為、斷層帶上岩石的成因，並進一步測試上述三個假設，了解控制車籠埔斷層北段快速滑移的機制、車籠埔斷層是否為一條弱斷層，斷層的物理性質、化學性質及斷層狀態會隨著地震循環改變，以及推測引發地震的可能機制。並進一步的進行斷層帶上流體成分的長期監測工作。

### 三、結果與討論

#### 1、921 集集大地震車籠埔斷層滑動帶的認定

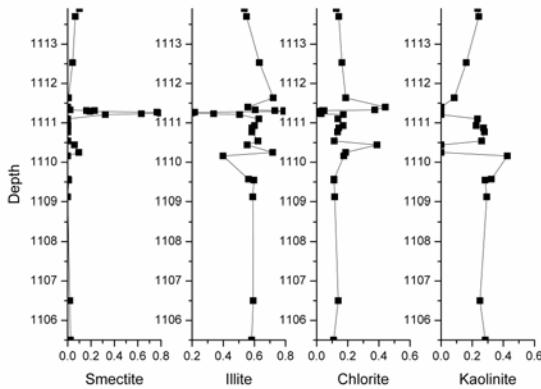
車籠埔斷層深鑽共發現有六個主要斷層帶，分別為深度 1111 公尺、1153 公尺、1220 公尺、1580 公尺、1712 公尺和 1812 公尺等。其中，由四個證據顯示發生於 1999 年 9 月 21 日的集集大地震之滑動帶 (slip zone)，是位於鑽井 A 井的深度為 1111 公尺。這四個證據為 (A) 從地表斷層露頭和淺層震測結果顯示，可能的滑動帶位於 900 公尺至 1220 公尺之間；(B) A 井溫度監測結果顯示，在深度 1111 公尺附近有一溫度異常，可能是斷層發生後的摩擦餘熱；(C) 由井測資料顯示，在 1111 公尺附近有明顯的電阻率和滲透率降低、最低的密度、 $V_p$  和  $V_s$ 、以及較高的  $V_p/V_s$  & Poisson's ratio；(D) 在 1111.29 公尺處發現有新鮮的假玄武玻璃 (pseudotachylyte)，顯示為最近的地震斷層所形成的。綜合上述結果顯示集集大地震的滑動帶位於 1111.29 公尺左右的斷層帶。

#### 2、車籠埔斷層帶的特性

圖一是台灣車籠埔斷層帶的黏土礦物分布，顯示斷層泥的黏土礦物組成主要是伊萊石 (illite)、高

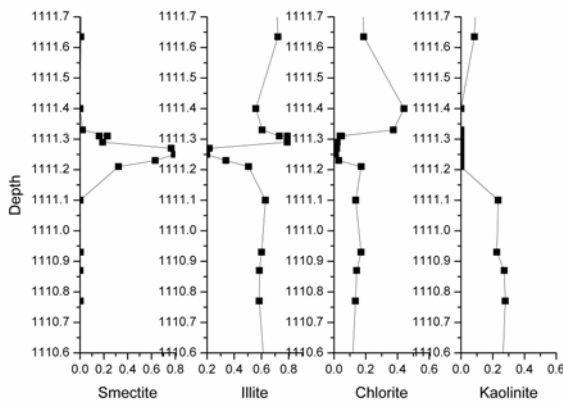
嶺土(kaolinite)、綠泥石(chlorite)和膨脹土(smectite)

圖一：車籠埔斷層帶黏土礦物分布圖。



等。其中，在 1111.19~1111.31 公尺處為黑色的超磨碎岩(ultra-cataclasite)，其高嶺土和綠泥石含量幾乎消失，伊萊石也大量減少(圖二)，而膨脹土則大量增加。由黏土礦物的熱破壞實驗，顯示 921 集集大地震斷層帶中的摩擦溫度可能高於 950°C。

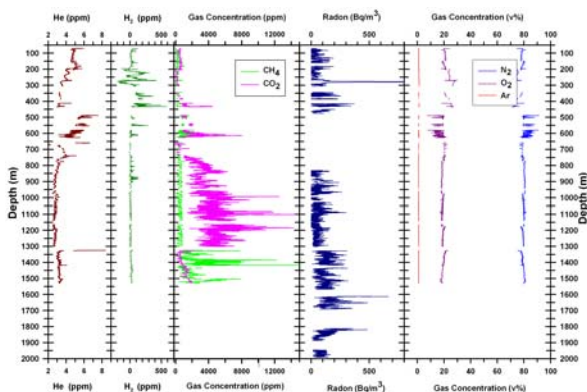
圖二：車籠埔斷層帶黑色超磨碎岩的黏土礦物分布圖。



### 3、氣體連續監測

氣體監測結果如圖三。

圖三：氣體監測結果。



### 4、地質微生物學研究

地質微生物的研究結果如表一所示。

### 四、參考文獻

- Ando, M. (2001). "Geological and geophysical studies of the Nojima Fault from drilling: An outline of the Nojima Fault Zone Probe." *Island Arc* 10(3-4): 206-214.
- Arai, T., T. Okusawa, et al. (2001). "Behavior of gases in the Nojima Fault Zone revealed from the chemical composition and carbon isotope ratio of gases extracted from DPRI 1800 m drill core." *Island Arc* 10(3-4): 430-438.
- Bonilla, M.G. (1975) A review of recently active faults in Taiwan: U. S. Geological Survey Open File Report, no.75-41, 58p.
- Fujimoto, K., H. Tanaka, et al. (2001). "Alteration and mass transfer inferred from the Hirabayashi GSJ drill penetrating the Nojima Fault, Japan." *Island Arc* 10(3-4): 401-410.
- Fukuchi, T. and N. Imai (2001). "ESR and ICP analyses of the DPRI 500 m drill core samples penetrating through the Nojima Fault, Japan." *Island Arc* 10(3-4): 465-478.
- Knipe, R.J. (1989) Deformation mechanisms-recognition from natural tectonics: *J. Structural Geology* 11, 127-146.
- Kobayashi, K., S. Hirano, et al. (2001) "Distribution of fault rocks in the fracture zone of the Nojima Fault at a depth of 1140 m: Observations from the Hirabayashi NIED drill." *Island Arc* 10(3-4): 411-421.
- Magloughlin, J.F. and Spray, J.G. (1992) Frictional melting processes and products in geological materials: introduction and discussion: *Tectonophysics* 204, 197-204.
- Matsuda, T., T. Arai, et al. (2001). "Examination of mineral assemblage and chemical composition in the fracture zone of the Nojima Fault at a depth of 1140 m: Analyses of the Hirabayashi NIED drill cores." *Island Arc* 10(3-4): 422-429.
- Ohtani, T., H. Tanaka, et al. (2001). "Internal structure of the Nojima Fault zone from the Hirabayashi GSJ drill core." *Island Arc* 10(3-4): 392-400.
- Schmid, S.M. (1983) Microfabric studies as indicators of deformation mechanisms and flow laws operative in mountain building: In Hsu, K.J. ed., *Mountain Building Processes*: New York, Academic Press, 95-110.
- Scholz, C.H. (1988) The brittle-plastic transition and the depth of seismic faulting: *Geologische Rundschau* 77, 319-328.
- Scholz, C.H. (1990) *The mechanics of earthquakes and faulting*: New York, Cambridge

- University Press, 439p.
- Sibson, R.H. (1975) Generation of pseudotachylyte by ancient seismic faulting: *Geophysical J. Royal Astronomical Soc.* 43, 775-794.
- Sibson, R.H. (1977) Fault rocks and fault mechanisms: *J. Geological Soc. London* 133, 191-213.
- Sibson, R.H. (1986) Earthquakes and rock deformation in crustal fault zones: *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences* 14, 149-175.
- Sibson, R.H. (1989) Earthquake faulting as a structural process: *J. Structural Geology* 11, 1-14.
- Tagami, T., N. Hasebe, et al. (2001). "Thermal anomaly around the Nojima Fault as detected by fission-track analysis of Ogura 500 m borehole samples." *Island Arc* 10(3-4): 457-464.
- Tanaka, H., S. I. Hinoki, et al. (2001). "Deformation mechanisms and fluid behavior in a shallow, brittle fault zone during coseismic and interseismic periods: Results from drill core penetrating the Nojima Fault, Japan." *Island Arc* 10(3-4): 381-391.
- Williams, P.F., Goodwin, L.B. and Raiser, S. (1994) Ductile deformation processes: In Hancock, P.L., ed. *Continental Deformation*: Oxford, Pergamon Press, 1-27.
- Yamano, M. and S. Goto (2001). "Long-term temperature monitoring in a borehole drilled into the Nojima Fault, southwest Japan." *Island Arc* 10(3-4): 326-335.
- Uda, S. I., A. M. Lin, et al. (2001). "Crack-filling clays and weathered cracks in the DPRI 1800 m core near the Nojima Fault, Japan: Evidence for deep surface- water circulation near an active fault." *Island Arc* 10(3-4): 439-446.

表一：Summary of 16S rDNA clone libraries for samples from 1565 to 1997 m

1565 m	1675 m	1810 m	1906m	1997m	Closest sequence	Access No.	Similarity (%)	Occurrence for closest sequence
Silt-stone	Sand-stone	gauge	Sand-stone	Sand-stone				
15					Aquiflexum balticum	AJ744861	92	Baltic sea
1					Uncultured alpha proteobacterium clone AKYH397	AY922127	94	seawater
12					Uncultured bacterium partial 16S rRNA gene, clone Gitt-KF-184	AJ532698	94	uranium mining waste piles
1					Uncultured alpha proteobacterium clone BIfdii32	AJ318134	97	industrial biofilter
4					Uncultured bacterium clone PL-34B1	AY570621	99	low temperature biodegraded oil reservoir
3					Flectobacillus sp. 'starch-degrading 2'	AY308840	99	waste water treatment
2					Uncultured hydrocarbon seep bacterium BPC009	AF154099	100	hydrocarbon seep sediment
2					Paracoccus sp. BOG6	AJ580352	98	kenyan hot springs
3					Uncultured bacterium clone B25	AF407718	90	Australia's Great Artesian Basin
3					Uncultured bacterium clone Hot Creek 38	AY168745	98	Arsenite Oxidizing Biofilms
3					Uncultured bacterium clone BE16FW031401IDW-SAK44	DQ088755	99	South African Beatrix mine
1					Mycobacterium sp. HE5	AJ012738	94	forest soil
2					Uncultured bacterium clone DR938CH110701SACH3	DQ230962	99	South African Driefontein mine
		5			Formivibrio citricus	Y17602	94	fermentation of S-citramalate, citrate, mesaconate, and pyruvate
		1			Uncultured bacterium clone TTMF126	AY741686	99	borehole water in a deep South African gold mine
		1			Pelobacter venetianus	U41562	91	dissimilatory Fe(III)-reducing bacteria
		1			Rhizobium sp. TKW1	AY631059	98	degradation of a metal lubricant
2	2	4			Parvibaculum lavamentivorans	AY387398	98	anaerobic heterotroph capable of degradation of linear alkylbenzenesulfonate
		2			Hydrogenophaga atypica	AJ585992	97	activated sludge
		12			Propionibacter pelophilus	AF016690	99	fermentative bacteria from estuarine mud
		5			Schlegelia thermodepolymerans	AY152824	99	thermophilic bacterium that degrades
		7			Uncultured Bacteroidetes clone LiUU-11-119	AY509352	88	cyanobacterial blooms in four Swedish lakes
		1			Sinorhizobium fredii strain USDA257	AY260150	93	nodulate soybean
		1			Uncultured bacterium clone 47mm70	AY796047	94	South African gold mine borehole water
		2			Uncultured bacterium clone KNA6-NB06	AB179662	96	bacteria from groundwater passing 0.2 um filter
5		1			Unknown marine alpha proteobacterium JP57	AY007683	98	isolates of surface picoplankton from German bight
	1	1			Alpha proteobacterium TH-G33	AJ786000	96	cultivable cells from sediments of Taihu lake

	2	Uncultured bacterium clone RB9C2	AF407393	94	monochlorobenzene contaminated groundwater
	1	Uncultured bacterium clone 013B04_B_SD_P15	CR933129	91	anaerobic sludge digester
<b>25</b>		Uncultured delta proteobacterium clone MAB1	DQ069214	99	South Africa gold mine
<b>14</b>		Bacterium ROME95Asa	AY998140	98	deep subsurface sandstone
<b>14</b>		Uncultured bacterium clone EUB7	AY693824	96	anaerobic sludge digester
	2	Pseudomonas sp. BRW3	AF025351	99	
	3	Hongiella marincola strain SW-26	AY533664	93	Korean East Sea
	2	Uncultured delta proteobacterium clone SRB5	DQ069227	98	South Africa gold mine
	<b>30</b>	<b>29</b> Uncultured low G+C Gram-positive bacterium clone ML635J-11	AF507880	92	Mono Lake, USA
	2	2 Desulfotomaculum reducens	U95951	93	SRB can reduce Cr, U, Mn, Fe
	3	Alkalibacter saccharofermentans	AY312403	95	a soda lake in the Transbaikal region of Russia
	2	1 Uncultured bacterium clone DR9IPCB16SCT7	AY604051	96	South African dolomite Aquifer 896 meters
	5	3 Uncultured bacterium clone R82	AF407695	95	Australia's Great Artesian Basin
	3	1 Uncultured bacterium clone R82	AF407695	95	Australia's Great Artesian Basin
	3	<b>12</b> Desulfovibrio sp. A2	AY770382	99	zinc-smelter wastewater effluents
	3	1 Clostridium termitidis	X71854	94	polysaccharolytic clostridia
	1	Uncultured bacterium clone SHA-107	AJ306739	96	dechlorination sludge
	1	1 uncultured delta proteobacterium clone K2-52	AY371186	95	Hawaiian Archipelago
<b>30</b>	<b>40</b>	Uncultured archaeon clone PL-36A11	AY570657	98	low-temperature, biodegraded Canadian oil field
	<b>23</b>	Uncultured archaeon clone IRBA16	DQ068084	98	South Africa gold mine
	<b>52</b>	Methanobolus oregonensis	U20152	98	alkaline, saline aquifer
	2	Unidentified archaeon clone vadinDC69	U81774	97	anaerobic digester