

ENEA

Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

**Le ricerche condotte dall'ENEA fra il 1976 e il 1991 sul
confinamento geologico delle scorie radioattive a lunga vita
e ad alta attività**

Francesco Zarlenga





Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Le ricerche condotte dall'ENEA fra il 1976 e il 1991 sul
confinamento geologico delle scorie radioattive a lunga vita e ad
alta attività

Francesco Zarlenga

LE RICERCHE CONDOTTE DALL'ENEA FRA IL 1976 E IL 1991 SUL CONFINAMENTO GEOLOGICO
DELLE SCORIE RADIOATTIVE A LUNGA VITA E AD ALTA ATTIVITÀ

Francesco Zarlenga (ENEA)

Febbraio 2009


Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione e fonti energetiche


Tema: Nuovo Nucleare da Fissione

Responsabile Tema: Stefano Monti, ENEA

 FPN	Sigla di identificazione FPN – LP4 - 005	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 2	di 21
--	--	------------------	----------------------	------------------	-----------------


INDICE

1	Premessa	3
2	INTRODUZIONE	4
3	LE ATTIVITA' DI RICERCA SVILUPPATE.....	5
3.1	I presupposti per il confinamento geologico	5
4	I criteri di selezione/esclusione dei bacini sedimentari italiani per l'inserimento di un sito di confinamento	13
ALLEGATO 1	Carta degli spessori delle formazioni argillose (peliti) nel settore di Avanfossa Adriatica	

 FPN	Sigla di identificazione FPN – LP4 - 005	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 3	di 21
--	--	------------------	----------------------	------------------	-----------------

1 PREMESSA

Anche se lo smaltimento geologico delle scorie radioattive a lunga vita, non rappresenta l'oggetto della LP4, si è ritenuto opportuno introdurre le attività svolte dall'ENEA in tale ambito, tra il 1976 ed il 1991. I risultati di tali ricerche rappresentano infatti un vasto patrimonio di conoscenze che altrimenti potrebbero risultare disperse nel tempo, in tal modo saranno comunque fruibili qualora il nostro paese optasse per una soluzione di questo tipo nel prossimo futuro. Inoltre esse rappresentano una solida base conoscitiva della complessa realtà geologica italiana e possono offrire informazioni utili anche per quanto riguarda il deposito superficiale per le scorie a bassa attività.

 FPN	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	FPN – LP4 - 005	0	L	4	21

2 INTRODUZIONE

Le attività del Dipartimento Ambiente dell'ENEA (PAS/SCAMB/GEOLOG) hanno avuto forte impulso nel corso degli anni '70-80 anche in relazione allo sviluppo di programmi comunitari, che comportavano, oltre a benefici di carattere economico, anche un'occasione di confronto con le ricerche sviluppate in altri Paesi dell'Unione Europea (Allora C.E.E.), sotto il coordinamento dell'Unione stessa (Benvegnù et alii, 1990).


La C.E.E. richiese inizialmente ai Paesi Membri di contribuire a realizzare un Catalogo Europeo sulle formazioni geologiche potenzialmente idonee allo smaltimento dei rifiuti radioattivi ad alta attività e lunga vita. In tale contesto l'ENEA diede incarico al Servizio Geologico Italiano (1977) di effettuare uno studio sulle formazioni argillose e granitiche presenti sul territorio, mentre curò in prima persona le formazioni saline (Mittempergher e Polizzano, 1980). I risultati di questi studi preliminari, effettuati nei vari Paesi Membri della Comunità, costituiscono l'oggetto di una voluminosa pubblicazione a cura dell'C.E.E. I requisiti richiesti dalla C.E.E. per una definizione di idoneità delle formazioni geologiche da indagare erano:

- ampia ed approfondita conoscenza del sottosuolo, con particolare riferimento alle caratteristiche sedimentologiche e chimico-fisiche delle formazioni profonde;
- stima dell'entità dei cambiamenti geologici che si sono verificati nel corso dell'ultimo mezzo milione di anni;
- previsione dei cambiamenti e valutazione della velocità dei processi geologici evolutivi entro i limiti dei 500.000 anni.

In tale contesto ed all'incirca in un decennio l'ENEA fu responsabile di 18 contratti di ricerca per un importo complessivo di 9,405 miliardi di lire dell'epoca.

La ripartizione delle competenze, anche in relazione alla geologia dei territori, indirizzò l'ENEA allo studio delle potenzialità offerte dalle formazioni argillose, largamente diffuse sul territorio nazionale. Le ricerche furono condotte sia direttamente dall'ENEA, sia mediante il coinvolgimento di altri Enti di ricerca e di Istituti Universitari che avevano maggiore competenza territoriale.

Nel complesso le ricerche condotte sono state illustrate in 61 Pubblicazioni e/o Rapporti, di cui 25 a valenza Geochimica-Mineralogica, 13 Geomorfologica Geologica-Idrogeologica; 17 di Ingegneria del sito e 6 di Impatto ambientale.

 FPN	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	FPN – LP4 - 005	0	L	5	21

3 LE ATTIVITA' DI RICERCA SVILUPPATE

3.1 I PRESUPPOSTI PER IL CONFINAMENTO GEOLOGICO

Il confinamento geologico, oltre a rappresentare un sistema passivo, fornisce anche uno schermo adeguato contro le eventuali radiazioni emesse dai rifiuti. In particolare le strutture geologiche più idonee sono quelle che presentano le seguenti caratteristiche:

- bassa permeabilità;
- sufficiente conduttività termica;
- plasticità che limiti i rischi di frattura;
- notevole capacità di fissazione chimico-fisica degli elementi che migrano;
- debole solubilità;
- proprietà meccaniche che facilitino la perforazione e la stabilità della cavità;
- sensibilità ridotta di tutte queste caratteristiche a variazioni delle condizioni ambientali.

Le argille rappresentano un litotipo che contiene intrinsecamente tutti i requisiti sopra esposti, mostrando un'elevata "capacità di barriera". Le ricerche condotte sulle argille, sia in situ che in laboratorio, hanno infatti mostrato: una scarsa mobilità geochimica dell'uranio; la resistenza alle sollecitazioni termiche e termomeccaniche estreme; la capacità di autosigillatura e l'impermeabilità di massa.

Partendo da questi presupposti sono state sviluppate una serie di ricerche atte a verificarne la validità. Le ricerche hanno pertanto preso in considerazione una serie di problematiche complesse di seguito solo sinteticamente specificate per questioni di spazio. Una esauriente trattazione è contenuta in Benvegnù et alii (1990).

I bacini sedimentari italiani

Per la conoscenza del loro assetto strutturale, degli spessori di argilla e delle eventuali intercalazioni sabbioso-ghiaiose, i bacini sui quali sono state sviluppate una prima serie di indagini conoscitive sono stati (Anselmi et alii, 1981; 1981; Brondi, 1984): Bacino della Valle del Po (Settore Appenninico); del Valdarno Inferiore; del Fiume Paglia e del Fiume Arbia; del Mugello; di Gubbio; della Valle Latina; Piana Costiera del Garigliano; Piana Costiera del Volturno; Avanfossa Marchigiano-Abruzzese-Molisana; Fossa Bradanica; Bacino del Fiume Crati; Crotonese; Occidentale siciliano; Centro-meridionale siciliano; terziario centro-settentrionale siciliano;

A completamento sono stati presi anche in considerazione i Complessi Cristallini dell'Ogliastra-Gallura; Costa Smeralda; Sarrabus e Sulcis, e le formazioni saline messiniane della Sicilia, Calabria, Campania e Toscana.

Le proprietà termiche delle argille

E' noto che i rifiuti radioattivi ad alta attività generano, durante il loro decadimento, notevoli quantità di calore che possono influenzare le proprietà fisico-chimiche delle argille e, di conseguenza le loro capacità d'isolamento nell'immediato dintorno dei rifiuti. I risultati delle ricerche, sviluppate per la comprensione del problema, hanno evidenziato in modo particolare (Blasi et alii, 1987; Bocola et alii, 1981; Burghignoli e

Paoliani, 1985; Tassoni e Gera, 1986) una marcata anisotropia della matrice argillosa, che risulta condurre meglio il calore in direzione parallela al piano di stratificazione, rispetto alla direzione ad esso ortogonale.

E' stata rilevata infatti una stretta correlazione tra le proprietà termiche ed il contenuto di acqua in peso in differenti campioni. Le relazioni trovate consistono nel fatto che all'aumentare del contenuto in acqua la conduttività e la diffusività termiche diminuiscono.

Le proprietà geochimiche

Rappresentano la capacità delle argille a rallentare o impedire la migrazione dei radionuclidi. In generale si può affermare che i radionuclidi tendono a migrare, nella fase liquida, negli interstizi dei micropori, nei quali è intrappolata l'acqua igroscopica o a fissarsi in modo più o meno irreversibile entro il reticolo cristallino dei minerali argillosi, oppure a precipitare sotto forma di sale o di ossido insolubile. In tale contesto le ricerche sono state indirizzate sulle acque interstiziali di campioni argillosi ottenuti per spremitura o per lavaggio (Brondi et alii, 1984). Oltre alla definizione chimica (a cloruri alcalini o a solfati alcalino-terrosi) si è visto come attraverso un'eluizione progressiva dei composti più mobili, nelle argille il chimismo delle acque vada arricchendosi in solfati di calcio e magnesio.

Sono stati quindi eseguiti esperimenti su colonne di scambio ionico, costituite da bentonite ed è stata dimostrata l'alta selettività della montmorillonite a trattenere il Cs e lo Sr. Successivamente sono stati studiati i coefficienti di distribuzione con acqua tipo, per vari radionuclidi (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am , etc) su argille di tipo illitico-smectitico-caolinitico in varie condizioni. Ciò ha portato a dimostrare che il rallentamento più o meno accentuato di tutti i radionuclidi, rispetto alla velocità dell'acqua di falda era dovuto quasi del tutto alle piccole quantità di materiali argillosi presenti nella sabbia.

Infine un'ultima sperimentazione è stata condotta su campioni di argille provenienti da diversi bacini italiani, dal Belgio e su due campioni standard costruiti in laboratorio, con due differenti tecniche: "a sorgente planare" e "da soluzione finita". I risultati raggiunti hanno evidenziato una stretta correlazione tra caratteristiche granulometriche e velocità di migrazione nelle argille. La velocità di migrazione per lo Iodio è pari a 10^{-6} cm²/sec ed è rallentata soltanto dalla presenza di solfuri, la velocità è più bassa per lo Sr essendo pari a 10^{-7} cm²/sec, mentre il Cs che risulta il più rallentato ha un coefficiente di diffusione pari a 10^{-9} cm²/sec (Brondi et alii, 1982).

Le caratteristiche geomeccaniche

Una delle principali alterazioni delle caratteristiche geomeccaniche di un'argilla può derivare dal calore prodotto e trasmesso dai rifiuti radioattivi che potrebbe ingenerare una variazione delle caratteristiche meccaniche o, a causa delle dilatazioni termiche possono instaurarsi aumenti della pressione interstiziale che si dissipano attraverso fenomeni di filtrazione idraulica. Entrambi gli effetti possono produrre una modificazione della capacità portante delle argille. Le ricerche, condotte per mezzo di un'apparecchiatura speciale, denominata HITEP (High Temperature and Pressure), ovvero una cella triassiale attrezzata con opportuni riscaldatori, sono state pertanto indirizzate alla verifica dell'espansione termica, la cedevolezza isotropa e deviatoria e la loro dipendenza dall'elasticità in presenza dell'alta temperatura.

I risultati di tali ricerche hanno evidenziato una dilatazione termica negativa sia in campo elastico, sia in campo plastico in presenza di sforzi isotropi costanti. In

parallelo sono stati sviluppati anche modelli matematici in grado di analizzare la complessità del comportamento meccanico ed idraulico delle argille ed il loro accoppiamento con i fenomeni termici (Baldi e Ascari, 1988).

Lo studio degli analoghi naturali

Per la verifica delle possibili pressioni naturali sul sistema rappresentato dalle argille, sono stati studiati degli analoghi naturali per ottenere delle risposte alle domande teoriche. Tre erano i quesiti principali a cui trovare risposta:

- cosa accade ad un'argilla quando è sottoposta all'influenza delle acque d'infiltrazione;
- cosa accade ad un'argilla quando è sottoposta all'azione di un'intrusione vulcanica;
- cosa accade ad uno strato argilloso in caso di fagliazione.

La degradazione fisica delle argille in ambiente subaereo è legata all'attacco ossidante delle acque meteoriche, che infiltrandosi attraverso gli strati sabbiosi diminuirebbero la loro capacità riduttiva e quindi la loro capacità di barriera nei confronti dei radionuclidi. Per verificare in natura come tali fenomenologie avvengano sono state esaminate diverse situazioni presenti sul territorio nazionale in sequenze argillo-sabbiose. Le ricerche condotte in più bacini sedimentari hanno evidenziato che solo la parte sommitale delle argille, di pochi mm, al contatto con banchi sabbiosi, è soggetta all'azione ossidante delle acque di infiltrazione, pertanto si deve concludere che esse mantengono il loro potere riducente nel tempo (Anselmi et alii, 1988; Benvegnù et alii, 1988).

Per lo studio dell'intrusione di ammassi vulcanici in formazioni argillose è stata presa in considerazione la situazione di Orciatico, che ha consentito di valutare gli effetti di forti riscaldamenti nelle argille. Qui infatti era ed è nota un'intrusione vulcanica "selagitica" in una formazione argillosa. I risultati raggiunti dalle ricerche sono sintetizzabili in:

- perdita della plasticità delle argille, per fenomeni di ricristallizzazione e microfratturazione;
- modificazioni chimiche con migrazioni di elementi particolarmente mobili come alcali e terre alcaline, in un raggio di 15 m dalla sorgente di calore;
- trasformazioni mineralogiche dei minerali originari (illite, vermiculite, intergrades cloritici e strati misti illite-smectite) in smectite, molto sviluppato nell'aureola metamorfica, e feldspati.

Lo studio di Orciatico, che rappresenta un caso estremo, non confrontabile con il calore sviluppato dai rifiuti radioattivi, evidenzia tuttavia che con particolari accorgimenti, come con l'utilizzo delle bentoniti, che si mantengono stabili sotto la pressione esercitata da una fonte di calore, il problema è di dimensioni davvero minime (Polizzano et alii, 1984; Benvegnù et alii, 1986; Polizzano et alii, 1986).

Infine sono state studiate le bande di ossidazione delle fratture nelle porzioni più superficiali degli strati argillosi in diversi contesti nazionali, per verificare gli effetti indotti in caso di fagliazione dalla circolazione delle acque nelle nuove fratturazioni. I risultati ottenuti indicano che si osservano modificazioni geochimiche nelle fessure ossidate rispetto alle argille in massa; in particolare si evince un maggior contenuto di Fe_2O_3 e di microelementi in traccia. Tali differenze geochimiche determinano nella

zona di ossidazione una maggiore ritenzione nei confronti di alcuni prodotti di fissione come il Cs e lo Sr, pari a circa il doppio di quella riscontrata nelle zone ridotte (Antonoli e Lenzi, 1984; Benvegnù et alii, 1988; Brondi e Polizzano, 1986).

I piani di faglia invece non sono risultati essere sede di processi di ossidazione da parte di acque superficiali.

Osservazione in superficie sulla permeabilità secondaria delle argille

Sono stati presi in considerazione due campi geotermici della Toscana meridionale (M. Amiata e Graben di Radicofani) per la verifica della capacità di isolamento a lungo termine dei rifiuti radioattivi nelle argille (Benvegnù et alii, 1988). In un campo geotermico infatti le fuoriuscite di fluidi avvengono soltanto nelle zone di attenuazione o di disomogeneità della copertura argillosa e in presenza di importanti faglie e fratture. Pertanto le osservazioni dirette sulle conseguenze della migrazione dei fluidi profondi, in corpi argillosi sufficientemente spessi e protrattesi oltretutto per tempi geologici, avrebbero consentito una migliore comprensione dei fenomeni. Gli indicatori prescelti per l'analisi sono stati i travertini ed il mercurio, i primi perché largamente rappresentati per le caratteristiche del substrato, mentre il secondo perché essendo un elemento termolabile, viene facilmente mobilizzato in profondità riprecipitando sotto forma di cinabro. I risultati raggiunti dalla ricerca sono sintetizzabili nel fatto che solo nelle aree marginali dei bacini, dove più intensa è la fratturazione e la fagliazione e minori sono gli spessori delle argille, si è riscontrata la presenza di tali prodotti. Nelle porzioni centrali invece dove questi disturbi sono assenti e gli spessori delle argille sono maggiori si è evidenziata una capacità tampone delle argille praticamente assoluta.

Osservazioni in galleria

Per verificare il comportamento delle argille in profondità sono state prese in considerazione diverse gallerie che le hanno attraversate a profondità maggiori di 150 m dal piano campagna. Le gallerie esaminate sono state: la Galleria di Castiglione in Teverina (direttissima Roma-Firenze); Galleria Carrito (autostrada Roma-L'Aquila); Galleria di scarico del Lago Disueri; Galleria Sperimentale ENEA di Pasquasia. Tutte le ricerche condotte hanno evidenziato che non si sono osservate venute di acqua lungo le linee di discontinuità, tutte rigidamente chiuse e non ossidate.

Accertamento dell'impermeabilità di massa in argilla per mezzo della distribuzione superficiale di gas di origine profonda

Per tali ricerche sono stati utilizzati due indicatori, l'⁴elio ed il ²²²radon, come traccianti di faglie e fratture in bacini argillosi (Ciotoli et alii, 1996; 2003; Polizzano et alii, 1987). Le esperienze condotte in Val d'Era e nel Bacino di Vasto hanno evidenziato che la distribuzione delle anomalie positive di He sono essenzialmente legate non alla permeabilità primaria delle argille, quanto alla presenza di faglie e fratture e quindi alla permeabilità secondaria.

Esperimenti di sigillatura dei fori in argilla

Partendo dall'assunto che per qualunque tipologia di deposito finale per le scorie radioattive debba essere assicurato il completo isolamento da eventuali infiltrazioni di acqua attraverso la sigillatura dei fori o dei pozzi di accesso, sono state condotte

ricerche atte a valutare l'efficacia della sigillatura e ad ottimizzare le miscele dei materiali sigillanti, mediante apparecchiature realizzate ex novo (Benvegnù et alii, 1987).

Le principali conclusioni della ricerca sono state diverse, sintetizzabili in:

- l'impiego di malte cementizie, maturate in differenti condizioni in assenza di carichi applicati, da luogo a discontinuità nelle zone di contatto con l'argilla, con conseguenze negative sulla permeabilità del sistema;
- una buona adesione tra la malta di cemento e l'argilla si verifica quando la maturazione del cemento avviene sotto carico; la permeabilità di un campione di argilla naturale circondato da argilla rimaneggiata è maggiore di quella misurata nell'argilla intatta, in relazione alla maggiore permeabilità dell'argilla rimaneggiata;
- la permeabilità dei campioni di argilla sigillati con miscele di argilla e bentonite in diverse proporzioni è molto prossima a quella dell'argilla indisturbata, quando il materiale sigillante è sottoposto ad una pressione almeno uguale a quella del restante provino, essendo minimo l'indice dei vuoti delle miscele;
- la permeabilità del sigillante diminuisce con l'aumento del contenuto di bentonite e della densità della miscela;
- risultati accettabili si ottengono anche con miscele sigillanti a più basso contenuto di bentonite e molto fluide, le quali hanno il vantaggio di possedere modalità di messa in opera molto semplici.

Esperimenti sulla propagazione delle dislocazioni tettoniche delle argille

Per verificare gli effetti indotti dall'azione di faglie su di un giacimento argilloso sono state effettuate due sperimentazioni per la verifica del comportamento delle argille sotto pressione mediante prove triassiali e lo sviluppo di un prototipo di una cella di deformazione per lo studio delle modalità di rottura delle argille (Basili et alii, 1986; Cautilli et alii, 1987). Le prove effettuate hanno mostrato concentrazioni di deformazioni di taglio che possono essere interpretate come fratture, mentre microfoto sui campioni analizzati hanno evidenziato vuoti di maggiori dimensioni ed un orientamento delle particelle argillose nelle zone di concentrazione degli sforzi di taglio.

Esperimenti sul comportamento delle argille sottoposte a carico termico ed alte pressioni di confinamento

Gli effetti termici sulle argille sono stati studiati in dettaglio, in quanto possono indurre una variazione delle proprietà meccaniche delle argille, con conseguente perdita di capacità portante e aumenti di sovra pressione delle acque interstiziali. Questi due tipi di modificazioni possono determinare sia l'instabilità delle cavità sotterranee, sia fenomeni di trasporto e diffusione di radionuclidi nelle immediate vicinanze del deposito. Prove sono state effettuate su campioni di argilla mediante una cella triassiale per le alte temperature e ad alte pressioni per valutare: espansione termica, cedevolezza isotropa e deviatorica, deformazioni plastiche e limite di elasticità in presenza di elevate temperature. I risultati delle sperimentazioni evidenziano una dilatazione termica negativa in condizioni di sforzo costante nel campo elasto-plastico ed una deformazione termoplastica dieci volte maggiore rispetto a quella elastica. Per superare i limiti connessi all'utilizzo di celle triassiali che non consentivano un'analisi quantitativa degli effetti del riscaldamento sulle argille è stata

realizzata una nuova strumentazione (Camera di Consolidazione a media scala CCMS, a pareti rigide). Le prove durate sei mesi hanno messo in evidenza una stretta corrispondenza fra valori ottenuti mediante modelli matematici e valori registrati durante le prove ed un ottimo funzionamento della strumentazione. (Tassoni et alii, 1985; 1985 a; 1985 b)

Esperimenti di dissipazione termica in cave di argilla

Esperimenti condotti in laboratorio su campioni di argilla in blocchi avevano dimostrato che il fenomeno della trasmissione del calore nelle argille era riconducibile a quello della conduzione in un mezzo omogeneo. La generazione di calore da parte dei rifiuti radioattivi instaura nelle argille sensibili gradienti termici con la conseguente dilatazione della matrice argillosa e dei fluidi interstiziali. Quest'ultima genera sovra pressioni nei pori, che vengono smaltite attraverso moti di filtrazione, che tuttavia non sembrano costituire un importante veicolo di calore. Per avere conferma di questi risultati sperimentali di laboratorio è stato condotto uno studio in una cava d'argilla nei pressi di Roma dove sono stati eseguiti una serie di 11 fori della profondità di 6,5 m ciascuno. Nel foro centrale è stato immesso un riscaldatore simulante un contenitore dei rifiuti radioattivi. Nei fori periferici sono stati installati dei sensori per misurare gli aumenti di temperatura. La sperimentazione, durata sei mesi, ha evidenziato che l'argilla esaminata ha mostrato una buona isotropia ed omogeneità relativamente ai piani paralleli a quello della sedimentazione. (Bocola et alii, 1983; Bonne et alii, 1985; Tassoni, 1979)

Studi sulla migrazione dei radionuclidi in bacini argillosi

Non essendo modellabile la previsione degli effetti a lungo termine della migrazione dei radionuclidi è stata approntata una ricerca indiretta utilizzando anche in questo caso gli analoghi naturali. La presenza infatti di equilibrio radioattivo nelle serie naturali decadimento dimostra pertanto l'immobilità dei radionuclidi stessi e l'assenza dei processi di geochimica perturbativi. Lo studio dei disequilibri consente anche la stima quantitativa dei tempi nei quali i processi sono avvenuti o da quanto tempo i sistemi risultano indisturbati. La determinazione dei rapporti di attività $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, $^{230}\text{Th}/^{234}\text{Th}$, $^{226}\text{Ra}/^{210}\text{Th}$ in un campione fornirà indicazioni sulla presenza di disequilibri in intervalli temporali dipendenti dalla coppia di radionuclidi considerata e rispettivamente 1,5, 0,35, 0,08 milioni di anni e 200 e 35 anni.

Le analisi condotte su campioni di argilla prelevati in profondità hanno evidenziato:

- uno stato di disequilibrio del rapporto $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, che indica il disturbo del sistema alla scala centimetrica degli ultimi 10^6 anni;
- un disequilibrio del rapporto di attività $^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$ indica che il sistema ha una dinamica attiva anche per periodi minori di 0,35 m.a.;
- un disequilibrio del rapporto di attività $^{226}\text{Ra}/^{230}\text{Th}$ ha interessato il sistema negli ultimi millenni, con perdita di radio dovuta all'elevato coefficiente di diffusione di questo elemento.

Per i campioni esaminati è possibile proporre un modello evolutivo di tipo "recoil" legato alla mobilità dei radionuclidi con processi di scambio solido-liquido. Le conclusioni generali di tali indagini sono contenute nel fatto che sono ipotizzabili, per i campioni analizzati, solo movimenti dei radionuclidi alla scala micro e mesoscopica in un periodo compreso fra il milione di anni e le ultime decine di anni.

Studi di fattibilità di impianti di smaltimento in formazioni argillose

Sulla base delle caratteristiche fisico-chimiche delle argille azzurre plio-pleistoceniche, largamente diffuse sul territorio nazionale è stato condotto uno studio di fattibilità tecnica di un impianto di smaltimento di rifiuti radioattivi (Chapman e Tassoni, 1985; Chapman e Gera, 1985; Chapman et alii, 1986). Sono stati presi in considerazione due tipologie di impianto: un deposito a miniera ed un deposito a matrice di fori profondi per i quali sono stati valutati i costi, la fattibilità tecnica e gli aspetti di sicurezza a lungo termine. Dei due tipi di deposito quello a matrice di fori profondi sembra essere preferibile in relazione ai minori costi totali ed alla sua flessibilità. Questa tipologia d'impianto non consente tuttavia lo stoccaggio di rifiuti contenenti emettitori alfa, a causa delle loro dimensioni d'ingombro e per i quali andrebbe previsto uno stoccaggio in miniera.

Fattibilità di un impianto di smaltimento di rifiuti radioattivi a matrice di fori profondi


Il vantaggio di questa tipologia di deposito è, come detto in precedenza, legato ad un bassissimo costo, anche perché è possibile iniziare le operazioni di stoccaggio subito dopo la perforazione del primo foro.

Valutazione delle prestazioni di isolamento geologico applicata a situazioni locali

La ricerca è stata sviluppata in Europa, su commissione della Comunità Europea in tre siti, a Boom in Belgio, ad Harwell in U.K. e in Italia in un bacino argilloso tipo graben. Il deposito preso in considerazione è stato quello a matrice di fori profondi, lungo ciascuno 90 m e contenente 30 contenitori di rifiuti. Sono stati considerati due meccanismi di trasporto della radioattività verso la biosfera: consumo di cereali coltivati nell'area del deposito, consumo di acqua prelevata in un fiume scorrente vicino al sito. I valori di diffusione del Cesio in argilla sono stati ottenuti mediante esperienze di laboratorio. L'esame di un normale scenario di rischio ha evidenziato che la dose massima annuale per l'uomo, residente nelle vicinanze del deposito è pari a circa, 10-12 mSv/anno, valore che è di diversi ordini di grandezza inferiore alla dose limite internazionalmente accettata pari a $10^{-3}/10^{-4}$ mSv/anno (Benvegnù e Brondi, 1986; Chiantore e Gera, 1988; Clark et alii, 1985; D'Alessandro e Gera, 1986).

Modellazione di scenari di smaltimento geologico e analisi di sicurezza

Essendo i tempi in gioco troppo lunghi ed avendo qualsiasi sperimentazione valore solo per periodi limitati di tempo è sembrato logico ricorrere a modelli matematici per prevedere il comportamento nel lungo periodo. I fattori presi in considerazione nel modello sono stati: erosione del suolo in assenza di cambiamenti climatici significativi, caratteristiche della formazione ospite non esattamente valutate, abbassamento/innalzamento del livello marino per cause climatiche, intrusione di un laccolite nella formazione argillosa, la fagliazione del deposito, l'idrogeologia del sito ed infine il trasporto dei radionuclidi dal deposito alla superficie. Nello scenario di base sono state imposte le seguenti condizioni al limite: infiltrazione efficace media annua, pari a 10 mm e flusso entrante sulla superficie fra calcari ed argilla pari a 0,6 mm/anno per unità di sezione. Lo studio ha evidenziato che l'unico radionuclide che

 FPN	Sigla di identificazione FPN – LP4 - 005	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 12	di 21
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

avrebbe la possibilità di raggiungere la biosfera nei centomila anni successivi allo smaltimento dei rifiuti è lo ^{129}I , in quanto possiede alta mobilità, elevato tempo di dimezzamento e scarsa capacità di scambio ionico con le argille. Per tutti gli altri radionuclidi la modellazione eseguita ha indicato, nei centomila anni, uno spostamento limitato a pochi metri.

4 I CRITERI DI SELEZIONE/ESCLUSIONE DEI BACINI SEDIMENTARI ITALIANI PER L'INSERIMENTO DI UN SITO DI CONFINAMENTO

Perché un bacino sedimentario possa essere considerato idoneo a ricevere un impianto di confinamento dei rifiuti radioattivi deve possedere i seguenti requisiti:

- assenza accertata di combustibili fossili;
- assenza di falde idriche importanti nelle eventuali intercalazioni sabbioso-conglomeratiche;
- assenza di campi geotermici
- stabilità geomorfologica

Le valutazioni di carattere Geomorfologico

Fra i vari interrogativi connessi alle capacità di tenuta e stabilità a lungo termine delle formazioni argillose, a loro volta dipendenti dalle caratteristiche geologiche, idrogeologiche, geochimiche e sismotettoniche, non ultimo è quello che riguarda il problema dell'erosione, ovvero dello smantellamento delle forme del rilievo e della venuta a giorno di livelli geologici attualmente sepolti. A questo proposito si può parlare di "stabilità geomorfologica" del contenitore geologico.

Il termine erosione racchiude in sé un vasto numero di processi operanti sulla superficie terrestre, che alle nostre latitudini sono identificabili con l'impatto al suolo della pioggia, l'azione delle acque di ruscellamento, i processi di dissoluzione e alterazione chimica e quelli di disgregamento meccanico. Tali processi sono fra loro variamente interconnessi e dipendenti da variabili rappresentate dalle condizioni del regime climatico dominante, dall'energia e morfologia del rilievo, dalle caratteristiche litologiche, dal grado e tipo di copertura vegetale e, da ultimo, dal grado di antropizzazione. Questi ultimi due fattori, in particolare, condizionano quella che viene definita "erosione accelerata" ossia l'insieme dei processi erosivi che agiscono sulla scala dei tempi umani, influenzandone l'esistenza e le attività (disastri dovuti ad alluvioni, frane etc.). Ai fini del problema che stiamo trattando, quella che interessa è invece l'erosione "geologica", ossia il lento progredire dei processi di trasformazione della superficie terrestre che agisce, appunto, sulla scala dei tempi geologici, in concomitanza con i movimenti verticali di una regione, a loro volta determinati da processi geodinamici di origine sub-crostante (tettonica, isostasia). Sia i processi di erosione geologica che i movimenti crostanti sono da considerare continui sul lungo periodo, anche se non uniformi nel tempo.

La domanda alla quale si deve rispondere è se, nell'arco di 100.000 anni, gli agenti erosivi modellatori del rilievo, insieme con i movimenti verticali della regione, siano in grado di provocare modificazioni morfologiche tali da compromettere la sicurezza ed il confinamento dei rifiuti radioattivi a lunga vita. In pratica, ci si domanda se e di quanto, nell'intervallo di tempo considerato, la superficie topografica si potrà avvicinare al livello al quale sono stati posti i rifiuti anzidetti. Tale avvicinamento comporterà, evidentemente, la messa in contatto delle scorie con la biosfera, prima di tutto attraverso le acque di circolazione sotterranea.

Per poter rispondere alla domanda che ci si è posti, dati i due fattori citati, si deve stabilire come essi interagiscono, come si evolvono e quindi a quali fenomeni possono dare origine entro l'intervallo di tempo definito.

In particolare, il sollevamento rispetto al livello del mare (movimento “positivo”), provoca l’esposizione della superficie topografica all’azione dei processi erosivi idrometeorici e prolunga l’azione di questi ultimi, determinando la venuta a giorno dei livelli geologici via via più profondi. Il sollevamento può essere “assoluto” , se espresso da un movimento della crosta, o “relativo” , se dovuto al semplice abbassamento del livello del mare. Sono note le oscillazioni glacio-eustatiche che si sono verificate nel corso del Quaternario, in concomitanza dei cicli glaciale-interglaciale. Per rendersi conto dell’entità dei possibili movimenti relativi terra-mare e quindi delle grandezze in gioco basti pensare, ad esempio, alla grande regressione avvenuta a chiusura del Tirreniano (circa 130.000 anni b.p.), in occasione della quale il livello del mare è giunto a quota -100 rispetto all’attuale, determinando un sollevamento relativo di pari entità.

La mobilità può essere di segno negativo, ove abbia luogo subsidenza piuttosto che sollevamento crostale o si verifichi un sensibile innalzamento del livello del mare, verosimilmente a causa di uno scioglimento, anche solo parziale, delle calotte glaciali (quindi in corrispondenza di una fase climatica “calda”), anche questo documentato nel corso del recente passato geologico. In questo caso, si verificherebbero le migliori condizioni, che potremmo definire “conservative” ai fini della remotizzazione del deposito di scorie, in quanto il livello del deposito verrebbe spostato verso il basso, quindi a profondità crescenti rispetto al livello del mare. Inoltre, al conseguente innalzamento di quest’ultimo, quindi col progredire dell’ingressione marina, l’erosione subaerea tenderebbe progressivamente a diminuire di entità e, al limite, a cessare del tutto con la sommersione della regione che ospita il sito.

In ultima analisi, si dovrà giungere a costruire una serie di modelli, rappresentativi di condizioni possibili, basandosi sull’ordine di grandezza dei fattori citati e considerando la loro variabilità ed i loro rapporti. In base a questi modelli, si potrà valutare la stabilità geomorfologica del contenitore geologico e quindi ricavare indicazioni utili ai dati di progetto, come, per esempio, la profondità ottimale alla quale collocare il deposito.

A tale scopo, nell’ambito delle attività condotte dall’Enea, alla fine degli anni ’80 furono svolte ricerche finalizzate alla definizione del parametro erosione su alcune aree scelte in corrispondenza dei bacini argillosi del margine adriatico. In particolare, vennero adoperati e messi a confronto diversi modelli di valutazione, basati su differenti approcci teorici ed operanti su diversi parametri di ingresso, stante la necessità di individuare il modello più adatto allo scopo (Grauso, 1994). Tali ricerche, i cui risultati sono da ritenere solo parziali dato che si riferiscono ad un periodo di osservazioni non abbastanza lungo da poter trarre conclusioni definitive, indicano un valore dell’erosione, riferito alle aree studiate, pari ad un indice di denudamento compreso fra 0.3 e 0.5 mm di suolo all’anno. Questo dato, estrapolato ad un periodo di 100.000 anni, corrisponderebbe ad un abbassamento del piano-campagna, dovuto al solo processo di erosione, pari a 30 – 50 m. Questo dato viene fornito solo a titolo di esempio, ma, insieme alle considerazioni fatte, rende conto dell’entità delle grandezze in gioco.

Le valutazioni di carattere geologico

Sulla base degli *input* derivanti dalla geochimica, dalla geomorfologia, dall’ingegneria e dal primo screening dei bacini sedimentari italiani (Mittempergher e Polizzano, 1980), sono state successivamente commissionate ricerche a varie Università

italiane, competenti territorialmente, per ottenere le maggiori informazioni e le più aggiornate possibili, sulla tettonica e sulla stratigrafia dei bacini sedimentari italiani.

Lo studio dei bacini sedimentari è stato orientato su quelli ricadenti nel settore di Avanzosa Padano-adriatica, sia perché lì sono presenti i maggiori spessori di argille, perché rispetto al margine tirrenico e ionico, il settore di Avanzosa non risulta sia interessato da fenomeni vulcanici attuali (a parte il caso del vulcanesimo quaternario del Vulture) sia perché soggetto a uplift del bordo continentale di minor entità e quindi a minore erosione.

I risultati delle ricerche condotte indicano senza alcun dubbio che alcune delle aree investigate presentano le condizioni ottimali per l'inserimento di un sito per lo stoccaggio dei rifiuti radioattivi ad alta attività e lunga vita.

I sedimenti argillosi presenti nei diversi bacini sono stati distinti nelle seguenti classi in relazione al grado di conoscenza scientifica, alle caratteristiche strutturali, agli spessori ed alla presenza di coperture permeabili (vedi carta Allegato 1).

Classe 1: aree caratterizzate dalla presenza di spessori utili di argilla > 200 m, a partire dal piano campagna;

Classe 2: aree caratterizzate dalla presenza di spessori utili di argilla > 200 m, ma a partire a profondità > di 100 m dal piano campagna;

Classe 3: aree caratterizzate dalla presenza di spessori utili di argilla > 400 m, a partire dal piano campagna;

Classe 5: aree che potrebbero rivelarsi interessanti ma non classificate per mancanza di dati;

Classe 6: aree caratterizzate dalla presenza di spessori utili di argilla compresi fra 100 e 350 m, a partire dal piano campagna;

Classe 7: aree caratterizzate dalla presenza di spessori utili di argilla > 350 m, ma con coperture di 50-80 m;

Classe 8: aree caratterizzate dalla presenza di spessori utili di argilla compresi fra 150-200 m, ma con coperture di 100 m;

Classe 9: aree caratterizzate dalla presenza di spessori utili di argilla < 350 m, a partire dal piano campagna;


Classe 10: aree caratterizzate dalla presenza di spessori utili di argilla < 350 m, a partire da una profondità di 100 m dal piano campagna;

Classe 11: aree con presenza di idrocarburi;


Classe 12: aree intensamente tettonizzate;

Classe 13: aree non interessanti.

Una disamina sintetica dei dati evidenzia che il margine appenninico della Val Padana è caratterizzato dalla presenza di spesse formazioni argillose, ben note in bibliografia. Quelle a Nord-Ovest di Bologna non sembrerebbero utilizzabili in quanto intensamente tettonizzate e per la presenza di idrocarburi. A Sud-Est di Bologna fino ad arrivare ad Ancona invece, a parte una larga fascia di depositi che potrebbero rivelarsi interessanti, ma non risultano classificati per mancanza di dati, si hanno numerose aree caratterizzate dalla presenza di spessori utili di argilla compresi fra 200 e 400 m e addirittura maggiori di 400 m in molti casi. La stessa situazione si ha fra Ancona e Pescara. A Sud di Pescara fino a Foggia esiste una larga fascia di depositi argillosi con spessori > 400 m. In tale area tuttavia vanno accuratamente escluse quelle aree note per la presenza di idrocarburi (Cupaello, ecc.) (Agip, 1996). Le restanti aree della Fossa Bradanica sono scarsamente note, tranne una fascia a

 FPN	Sigla di identificazione FPN – LP4 - 005	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 16	di 21
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

stretto ridosso del Settore di Catena appenninica dove si osservano spessori maggiori di 400 m. Questo primo screening già consentirebbe la scelta di più aree idonee ad ospitare un sito per lo smaltimento dei rifiuti radioattivi. Va tuttavia sottolineato che gli studi e le ricerche sintetizzate in questo lavoro andrebbero ripetute sul sito/i prescelto/i per garantire le popolazioni sulla bontà delle scelte effettuate.

 FPN	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	FPN – LP4 - 005	0	L	17	21

BIBLIOGRAFIA

AGIP (1996) – Agip’s contribution to oil exploration technology. A selection of Agip papers 1945-1995. AGIP Ed.

APAT (2006) - Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. First Italian National Report. 153 pag., APAT Ed.

Anselmi B., Brondi A., Ferretti O. & Gerini V. (1981) – Criteri geologici per l’identificazione dei bacini argillosi favorevoli allo amltimento dei rifiuti radioattivi. Studi sulle formazioni plioceniche italiane. Rapporto CNEN-RT/PROT (81) 16.

Anselmi B., Brondi A., Ferretti O. & Gerini V. (1981a) – Possibility of inferring some general features and mineralogical composition of deep clay bodies by means of superficial observation. Proceed. NEA Workshop on “Siting of radioactive waste repositories in geological formations”: Parigi, maggio 1981.

Baratozzi L., Basili M., Battista A., Cagnoli P., Colonna N., Del Ciello R., N. Filippi, L., Forni A., Gherardi, V. Montaletti, Olivetti I., Poli G. & Regina P. M. Scarelli & F. Zarlenga (2001) – Progetto Atlante. Quadro di riferimento, analisi degli strumenti esistenti, implementazione metodologica e applicazione prototipale. Volume edito a cura dell’ ENEA.

Basili M., Tassoni E., Borsetto M., Gera F. Hueckel T., Muzzi F. e Peano A. (1986) – Studi sulla propagazione delle dilocazioni tettoniche nelle argille. Scienze e Tecniche Nucleari, Rapporto EUR 10620 IT.


Benvegnù F. e Brondi A. (1986) – Comportamento dell’ambiente geologico di alcuni attinidi presenti nei rifiuti radioattivi di alta attività. Atti Giornata di Studio su “Problematiche ambientali e radiotossicologiche relative ad elementi transuranici”. ENEA/CR.Casaccia, Giugno 1986.

Benvegnù F., Brondi A., Giannotti G., Polizzano C., Tassoni E., Sensi L. (1984) – Selezione di un sito adatto alla costurzione di un laboratorio sotterraneo in formazioni argillose. Scienze e Tecniche nucleari, Rapporto EUR 9279 IT.

Benvegnù F., Brondi A., Cautilli F. , Polizzano C. e Tassoni E., (1990) – Smaltimento geologico dei rifiuti radioattivi ad alta attività e a lunga vita. Sintesi degli studi e ricerche. 1976-1989. ENEA Ed.

Benvegnù F., Brondi A., Tassoni E., Baldi G., Bruzzi D., Devin P e Gera F. (1984) – Studi sulla sigillatura dei fori. Scienze e Tecniche nucleari, Rapporto EUR 11187 IT.

Blasi L., Girolimetti G., Polizzano C. & Tassoni E. (1987) – Misure di conduttività termica in campioni di argille italiane col metodo della sonda ad ago. RT/ENEA/PAS/87/24.

 FPN	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	FPN – LP4 - 005	0	L	18	21

Bocola W., Giacani G., Girolimetti G., Giulianelli G., Tassoni E., Testa L. (1983) - Smitimento geologico di rifiuti radioattivi: esperienze in situ sulla dissipazione del calore in formazioni argillose. ENEA/RT/PROT (83)17.

Bocola W., Girolimetti G., Giulianelli G., Tassoni E. & Testa L. (1981) – Determinazione delle proprietà termiche delle argille in campioni di grandi dimensioni. Rapporto CNEN-RT/ING (81) 12.

Bonne A., Black J., Gera F., Gouse P., Tassoni E. e Thimus J.F. (1985) – Characterization and behaviour of argillaceous rocks. Proc. of the second European Comm. Conf. On Radioactive Waste Management and Disposal. Luxembourg, Aprile 1985.

Brondi A. (1984) – Deduzione delle caratteristiche dei bacini argillosi sepolti attraverso indagini superficiali di basso costo. Applicazione alle argille italiane. Sci. e tecniche nucleari. Rapporto EUR 9361 IT.

Brondi A., Polizzano C., Tassoni E., Cautilli F., Benvegnù F. et alii (1988) – Studi nella cavità sotterranea di Pasquasia. Scienze e Tecniche nucleari, Rapporto EUR 11927 IT.

Burghignoli A. & Paoliani P. (1985) – Hydrodynamic and mechanical aspects of heat transfer in clay. Proceed. Of the 1th Int.Conf. on Soil Mechanics and Foundation Eng., San Francisco Agosto, 1985.

Cautilli F., Tassoni E., Borsetto M., Chiantore V., Gera F., Hueckel T., Muzzi F. e Peano A. (1987) – Studi sulla propagazione delle dislocazioni tettoniche nelle argille ed effetti connessi. Sci. e tecniche nucleari. Rapporto EUR 11188 IT.


Cautilli F., Polizzano C., Tassoni E. e Zarlenga F. (1989) – Studies and researches in the underground laboratory at Pasquasia mine. Proc. On Tech.Session on “Geomechanics of clays for radioactive waste disposal”: Bruxelles, december 1988. Reoprt EUR 12027 EN/FR, 1989.

Chapman N. e Tassoni (1985) – Feasibility studies for a radioactive waste repository in a deep clay formation. Scienze e tecniche nucleari. Rapporto EUR 10061 EN.

Chapman N. e Gera F. (1985) – Disposal of radioactive waste in Italian clays: mined repository or deep boreholes? Radioactive Waste Management and the Nuclear Fuel Cycle, 6 (1).

Chapman N., Gera F., Mittempergher M. e Tassoni E. (1986) – Assessment of repository concept for disposal of radioactive waste in argillaceous formation. Proc. of the IEAEA Int. Symp. On the Siting, Design and Construction of Underground Repositories for Radiactive Waste. Hannover, FRG, 3-7 marzo 1986.

Chiantore V. e Gera F. (1986) – Fracture permeability of clays: a review. Radioactive Waste Management and the Nuclear Fuel Cycle, 7 (3).

 FPN	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	FPN – LP4 - 005	0	L	19	21

Ciotoli G., Lombardi S., Serafini S. & Zarlenga F. (1997) - The refinement of geomorphological and geochemical statistical techniques in the study of clay-basin tectonics: Val d’Era Basin (Central Italy). *Il Quaternario*, 10 (2), 231-246.

Ciotoli G., Lombardi S., Morandi G. e Zarlenga F. (2003) -

D’Alessandro M. e Gera F. (1986) – Geological isolation of radioactive waste in clay formation: fractures and faults as possible pathways for radionuclide migration. *Radioactive Waste Management and the Nuclear Fuel Cycle*, 7 (4).

Grauso S. (1994). Confronto di metodi per la valutazione dell’erosione del suolo. Sintesi delle ricerche condotte dall’ENEA in alcune aree sperimentali dell’Abruzzo. ENEA/RT/AMB/94/17, 42 pp.

Grauso S. e Polizzano C. (1986) – Il problema dell’erosione riguardo alla sicurezza dei rifiuti radioattivi. ENEA/RT/PAS/86/16.

IAEA (1994) – Siting of near surface Disposal Facilities. Safety Series N°, 111-G-3.1

IAEA (1999) – Near surface Disposal of radioactive waste. Requirements N°, WS-R-1

IAEA (1999) – Safety assessment for near surface Disposal of radioactive waste. Safety Guide N°, WS-G-1.1


Manfroy P., Benvegnù F., Heremans R. e Brewitz W. (1985) – Research programmes in underground experimental facilities: Konrad-Pasquasia-Mol. Proc. of the Second Eur.Comm.Conf. on Radioactive Waste Management and disposal. Luxembourg, april 1985.

Mitterpergher M. & Polizzano C. (1980) – Confinamento geologico dei rifiuti radioattivi nella Comunità Europea. Catalogo europeo delle formazioni che presentano caratteristiche favorevoli allo smaltimento dei rifiuti radioattivi solidificati ad alta attività e lunga vita. Rapporto EUR 6891 FR.

Polizzano C. e Lombardi S. (1988) – Studio dei processi reali di migrazione all’interno delle formazioni argillose. I e II rapporto semestrale 1987, I Rapporto semestrale 1988 Contratto ENEA-CEE (F11W-0071-Ia) su “Processi di migrazione all’interno delle formazioni argillose”.

Servizio Geologico Italiano (Coord. G. Cestari) (1977) – Catalogo delle formazioni geologiche favorevoli allo smaltimento dei rifiuti radioattivi a vita lunga in Italia. CNEN-EURATOM, Contratto 022-76-9 WASI.

Tassoni E. (1979) – An experiment on the heat transmission in a clay rock. Proc. of the NEA (OCS) Workshop on “Use of argillaceous materials for the isolation of Radiactive Waste”. Parigi, settembre 1979.

 FPN	Sigla di identificazione FPN – LP4 - 005	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 20	di 21
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

Tassoni E., Baldi G. e Borsetto M. (1985) – Hard clay as host medium. Thermomechanical experiments and model. Proc. of the 9th Symp. On Scientific Basis of Radioactive Waste Management. Stoccolma, 1985.

Tassoni E., Baldi G., Borsetto M. e Huekel T. (1985) – Thermally induced strain and pore pressure in clays. Intrn.Sympo. on Environmental Technology. Allentown, USA, 1985.

Tassoni E., Baldi G., Borsetto M., Gera F., Hueckel T., Peano A. (1985) – Comportamento termico dei materiali argillosi. Scienze e tecniche nucleari, Rapporto EUR 10190 IT.

Tassoni E. & Gera F. (1986) – Disposal of high level radioactive waste in argillaceous formations: in situ and laboratory heating experiments. Nuclear technology, 72, 89-98.

ALLEGATO 1

