

Lezioni dal corso di  
**'Generatori di vapori e impianti di  
generazione termica'**  
a.a. 2009-2010

**I COSTI DELL'ENERGIA NUCLEARE**

**14/05/2010**  
**Ing. Claudio Laterza**

# Una premessa

Non è facile per nessuno stimare in linea preventiva i costi di una qualsiasi fonte energetica. Il motivo fondamentale risiede nel fatto che i sistemi energetici sono fatti per durare nel corso dei decenni ovvero lungo un arco temporale così lungo da impedire di poter fare previsioni "certe"; al massimo è possibile fare ipotesi ragionevolmente attendibili, ma in ogni caso occorre essere consapevoli che la realtà dei fatti può prendere direzioni inaspettate. D'altronde, piccoli scostamenti lungo archi di tempo prolungati possono determinare sensibili variazioni nei risultati economici. Nel seguito sarà presentata la metodologia di valutazione contenuta in una pubblicazione a cura del Dipartimento di Ingegneria Meccanica Nucleare e della Produzione dell'Università di Pisa.

# I principali fattori di costo della produzione elettro-nucleare

Negli impianti nucleari, il costo specifico dell'energia dipende da:

- il costo nominale della centrale;
- il suo tempo di realizzazione;
- il tasso di interesse;
- la durata della vita prevista;
- i fattori di disponibilità e di carico;
- i costi per lo smantellamento, il recupero del sito e la custodia in sicurezza delle scorie.

# I costi

Nella già citata pubblicazione, il calcolo del costo di produzione di un kWh elettrico prodotto da fonte nucleare è stato ricondotto alle seguenti quattro voci di costo:

- ammortamento dell'impianto;
- costo del combustibile;
- personale e spese generali;
- costi di bonifica e smantellamento a fine vita.

# I costi di impianto /1

$$C_i = \frac{xK_a}{E_p}$$

con

$$x = x_1 + \frac{x_1}{(1+x_1)^n - 1}$$

$$K_a = (1,1 - 1,2) K_n$$

$$E_p = 8760 f_c W_e$$

# I costi di impianto /2

**Costo<sub>nominale</sub>  $K_n = 1.400 \text{ euro/kW } 10^6 = 1,4 \cdot 10^9 \text{ euro}$**

**Tempo di costruzione  $T = 5 \text{ anni};$**

**Tasso di interesse  $x_1 = 5\%;$**

**Vita impianto  $n = 40$**

**Fattore di medio carico  $f_c = 0,7$**

**$x = 0,058$**

**$K_a = 1,68 \cdot 10^9 \text{ euro}$**

$$C_{\text{impianto}} = \frac{0,058 \cdot 1,68 \cdot 10^9}{8760 \cdot 0,7 \cdot 10^6} = 0,016 \text{ euro / kWh}$$

# I costi del combustibile

$$C_{cc} = C_c + C_t + C_r = \frac{C_c + C_t + C_r}{E_p}$$

**Durata combustibile  $n_c=3$  anni**

**Burn-up=33.000 kWd/kg**

**$\eta_e=0,33$**

**$C_c=1.620$  euro/kg**

**$C_t=521$  euro/kg**

**$C_r=-98,5$  euro/kg**

$$C_{ciclo\_combustibile} = \frac{1620 + 521 - 98,5}{24 \cdot 33000 \cdot 0,33} = 8,5 \cdot 10^{-3} \text{ euro / kWh}$$

## Costi di esercizio e manutenzione

Con tale dizione facciamo riferimento a varie voci: retribuzione del personale, manutenzione ordinaria e straordinaria, materiali di consumo, oneri assicurativi, licenze, etc. E' possibile assumere orientativamente un valore di  $5 \cdot 10^{-3}$  euro/kWh ovvero, per un impianto da 1.000 MW, circa 30 milioni di euro all'anno.

## Costi di dismissione e bonifica

Tale costo è fortemente variabile. Gli autori della pubblicazione a cura dell'Università di Pisa ritengono che tale costo si aggiri tra il 20% ed il 40% del costo attualizzato dell'impianto.

Procedendo all'accantonamento di  $5 \cdot 10^{-4}$  euro per singolo kWh elettrico generato ed avendo cura di rivalutare di anno in anno il capitale accantonato, l'Università di Pisa calcola che a fine vita dell'impianto si dovrebbe disporre di un capitale rivalutato in misura pari al 26% del costo di impianto attualizzato ad inizio esercizio commerciale ( $K_a$ ).

E' chiaro che il capitale disponibile allo scopo dipende moltissimo dal tasso di rivalutazione annuo, nonché dall'effettiva durata della vita commerciale dell'impianto.

# Costi totali

In definitiva, si ottiene:

$$C_{\text{totale}} = C_i + C_{\text{cc}} + C_{\text{em}} + C_{\text{sm}} = 1,6 + 0,85 + 0,5 + 0,05 = 3,0 \text{ eurocent/kWh}$$

Con un costo di produzione di 3 eurocent/kWh, le centrali a fissione nucleare entrerebbero in diretta concorrenza con fonti quali l'idroelettrico ed il geotermico che presentano costi di produzione analoghi. Ovviamente rispetto a queste ultime, il nucleare a fissione è caratterizzato da un maggiore impatto ambientale, ma presenta l'enorme vantaggio di non essere subordinato alla disponibilità di bacini idrici in quota o di pozzi geotermici a media-alta temperatura.

E' fondamentale allora chiedersi quanto sia affidabile questa stima di 3 eurocent/kWh elettrico.

# Affidabilità costi di impianto

Tale voce di costo dipende considerevolmente dai seguenti tre fattori:

- costo nominale di installazione ( $K_n$ ), che nella pubblicazione dell'Università di Pisa del 2006 era stimato in 1.400 euro/kW, sul sito dell'ENEA è stimato in 2.500-3.000 euro/kW, da altre fonti risulta pari a 3.500-4.000 euro/kW;
- tasso di interesse passivo che lungo un arco temporale può variare considerevolmente e, dunque, salire ben oltre un valore medio del 5%;
- vita effettiva dell'impianto, che potrebbe ridursi rispetto alla previsione di un tempo di 40 anni per ragioni politiche (come successo in Italia) o per rapida obsolescenza delle tecnologie a fissione (si pensi, per esempio, cosa potrebbe accadere nel momento in cui dovesse essere ingegnerizzata la produzione di energia elettrica per fusione nucleare).

# Costi unitari impianto [euro/kWh]

	Costo nominale		
Vita media [anni]	1.400 Euro/kW	2.400 Euro/kW	3.400 Euro/kW
20	0,022	0,038	0,053
40	0,016	0,027	0,039
60	0,014	0,025	0,035

**Interesse passivo al 5%**

# Costi unitari impianto [euro/kWh]

	Costo nominale		
Vita media [anni]	1.400 Euro/kW	2.400 Euro/kW	3.400 Euro/kW
20	0,029	0,050	0,071
40	0,024	0,041	0,058
60	0,023	0,039	0,055

**Interesse passivo al 7,5%**

# Costi unitari impianto [euro/kWh]

	Costo nominale		
Vita media [anni]	1.400 Euro/kW	2.400 Euro/kW	3.400 Euro/kW
20	0,038	0,066	0,093
40	0,033	0,057	0,081
60	0,033	0,056	0,079

**Interesse passivo al 10%**

# Scommettiamo che ...

Notiamo che la vita media è il parametro che influenza meno i costi unitari di produzione. D'altronde, al momento l'ipotesi che lo sviluppo tecnologico renda così obsoleti gli impianti a fissione nucleare in meno di 40 anni è veramente improbabile.

In ogni caso, i costi degli impianti nucleari a fissione sono aumentati e si stanno delineando previsioni di tassi di interesse stabilmente bassi per il futuro.

Dunque, appare ragionevole ragionare in un'ottica di 40 anni, con tassi di interesse passivo compresi tra il 5% e il 7,5% e costi nominali di installazione compresi di circa 3.000 euro/kW.

# Ipotesi ragionevole (vita=40 anni)

	Costo nominale	
Tasso interesse passivo	2.400 Euro/kW	3.400 Euro/kW
5%	0,027	0,039
7,5%	0,041	0,058

**STIMA RAGIONEVOLE DEL COSTO UNITARIO DI PRODUZIONE  
[euro/kWh]**

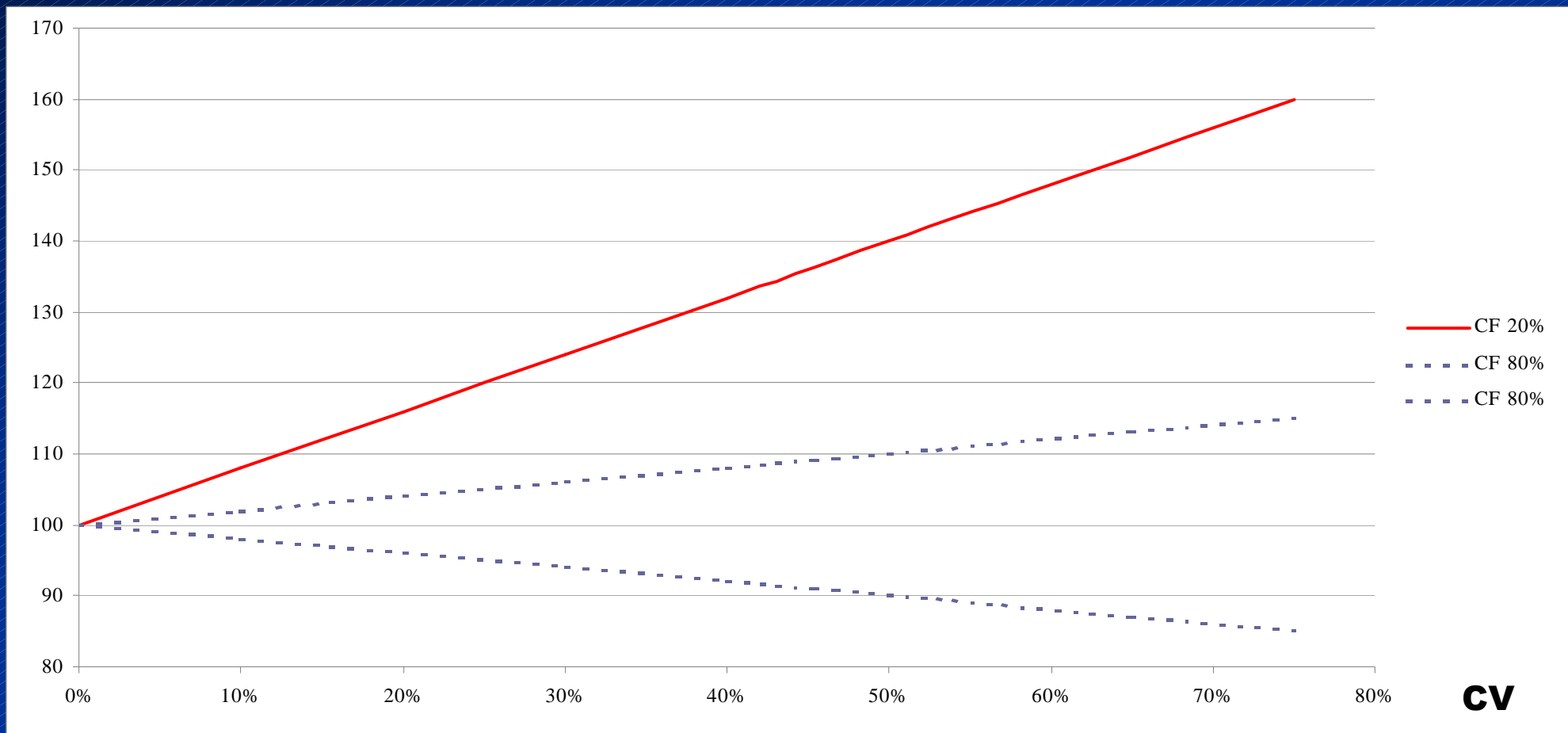
# Le variabili del costo dell'energia

Come in tutti i processi produttivi, il costo finale del singolo prodotto dipende da costi fissi e variabili. I primi non dipendono dalle quantità di prodotto, i secondi sono direttamente commisurati alla produzione realizzata.

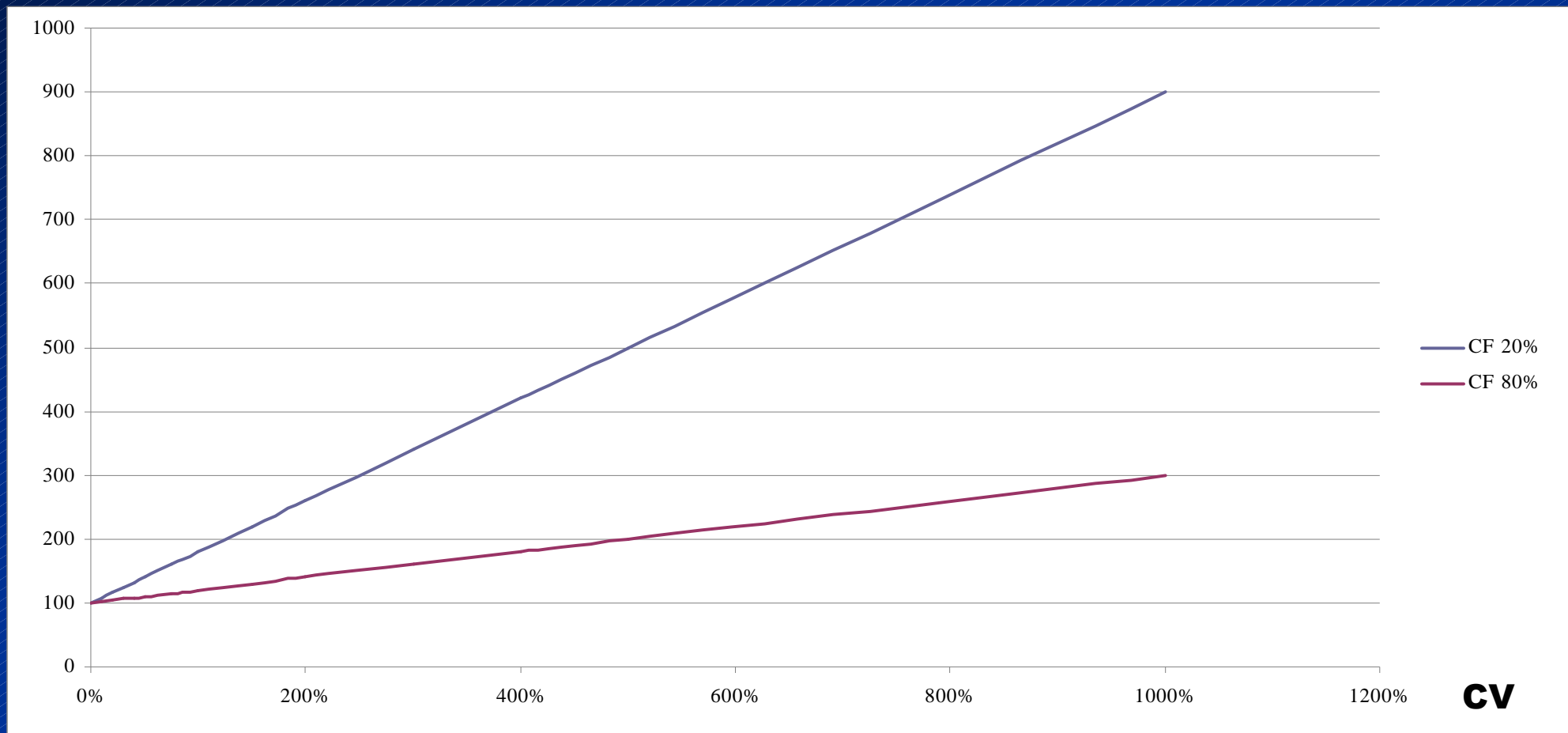
Gli impianti a combustibile fossile sono caratterizzati da una forte incidenza dei costi variabili (principalmente, il consumo di combustibile); nel caso degli impianti nucleari, invece, c'è una forte predominanza dei costi fissi.

Vediamo come questa semplice considerazione si ripercuote sui costi di produzione dell'energia.

# Gli effetti delle variazioni dei CV /1



# Gli effetti delle variazioni dei CV /2



# Costi del combustibile

Gli impianti a fissione nucleare sono strutture di costo ad elevata incidenza di costo fisso. Conseguentemente, una variazione del costo del combustibile si ripercuote sul costo unitario di produzione del singolo kWh in maniera molto meno evidente rispetto ai sistemi che impiegano combustibili fossili secondo schemi di costo a bassa incidenza di costo fisso ed elevata incidenza di costo variabile.

In questa sede, dunque, è possibile assumere in toto le ipotesi formulate nella pubblicazione dell'Università di Pisa perché siamo confidenti che qualunque diversa analisi critica non porterebbe a risultati troppo diversi.

## **Costi di esercizio e manutenzione**

Tale voce di costo non sembra presentare criticità particolari. La stima riportata nella pubblicazione dell'Università di Pisa sembra ragionevole e non vi è motivo di non accettare la valutazione di 0,005 euro/kWh in termini di costi unitari di esercizio e manutenzione.

# Costi di dismissione e bonifica

La principale critica da fare è relativa alle seguenti due considerazioni:

- chi paga la bonifica e lo smantellamento dell'impianto in caso di fallimento della società che gestisce l'impianto e che, verosimilmente, è deputata alla custodia degli importi accantonati per tale specifico scopo?
- sulla falsariga di quanto già accade per l'amianto il cui smaltimento è diventato problematico ed oneroso, si può essere certi che gli accantonamenti siano sufficienti ad eseguire una bonifica ed uno smantellamento che, dopo 40 anni, potrebbero rivelarsi molto più onerosi per sopravvenute esigenze ambientali?

Se, nel secondo caso il rischio sembra una scelta obbligata, nel primo una diversa gestione finanziaria potrebbe mettere al riparo da sorprese.

# L'accantonamento ad inizio esercizio

Per tutelarsi dal rischio di mancata costituzione o scomparsa degli accantonamenti, si può ipotizzare che l'inizio dell'esercizio commerciale sia subordinato alla consegna nelle mani di un ente terzo (per esempio, un'agenzia di sorveglianza) che avrebbe il compito di custodire l'intera cifra accantonata e preoccuparsi solo di metterla al riparo dal rischio inflattivo.

In questa ipotesi, l'accantonamento può essere considerato alla stessa stregua un incremento del costo di impianto nella medesima misura riportata nella pubblicazione dell'Università di Pisa ovvero un 26%.

Così sarebbe possibile valutare i costi unitari di bonifica e dismissione identicamente a quanto già fatto per i costi unitari di impianto.

# Ipotesi ragionevole (vita=40 anni)

	Costo nominale [euro/kW]	
Tasso interesse passivo	$0,26 \times 2.400$ = 624	$0,26 \times 3.400$ = 884
5%	0,007	0,010
7,5%	0,011	0,015

**STIMA RAGIONEVOLE DEL COSTO UNITARIO DI PRODUZIONE  
[euro/kWh]**

## Considerazioni “quasi” finali

In definitiva, con nuove “ragionevoli” valutazioni dei costi unitari di impianto e smaltimento, si ottiene:

$$C_{\text{totale}} = C_i + C_{\text{cc}} + C_{\text{em}} + C_{\text{sm}} = 4,0 + 0,85 + 0,5 + 1,0 = 5,9 \text{ eurocent/kWh}$$

E' dimostrato che semplicemente sostituendo ipotesi “ragionevoli” ipotesi con altre ugualmente “ragionevoli” o semplicemente adeguando alcuni parametri sulla base di semplici oscillazioni di mercato, si può passare con estrema facilità da una stima di 0,03 euro/kWh ad un'altra di 0,06.

E si badi bene che nessuna delle due è corretta o sbagliata. Semplicemente, più si ricerca una stima attendibile tanto più occorre allargare l'ampiezza dell'intervallo di confidenza che fornisce garanzia di idonea attendibilità.

## Considerazioni finali

E le scorie? Nella metodologia adottata dall'Università di Pisa (così come comunemente fatto nella sostanziale totalità dei casi) non vi è traccia di costi relativi allo smaltimento ed alla gestione delle scorie. E' evidente che tale problema è implicitamente imputato alla collettività esattamente come già accade. Attualmente, infatti, il problema del trattamento e dello smaltimento delle scorie è in carico alla Sogin che se ne occupa traendo sostentamento dagli oneri che ogni utente connesso in rete elettrica versa sulla base dei propri consumi energetici.

E' chiaro che, continuando ad accumulare scorie nucleari, l'onere economico a carico della collettività è destinato a crescere. Ciò vuol dire che ai posteri sarà consegnata un'eredità non solo fisica (i fusti con le scorie) ma anche economica (gli oneri di stoccaggio delle scorie).