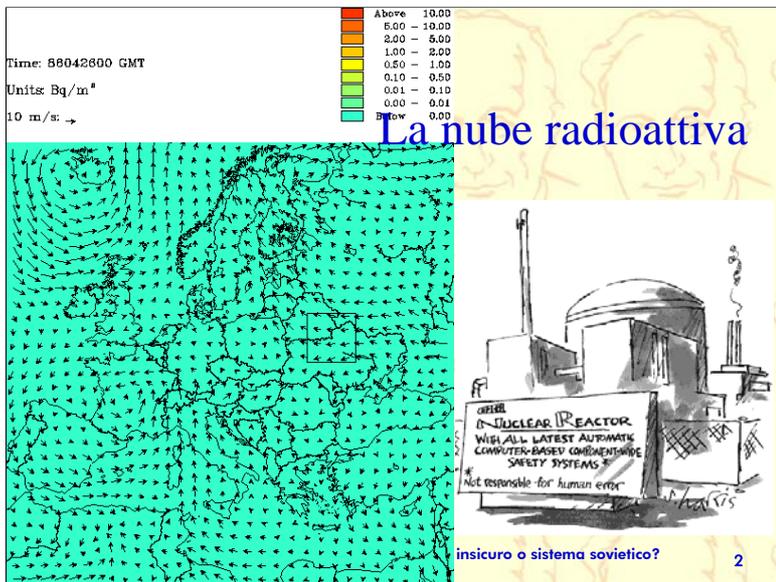


## Dove è successo?

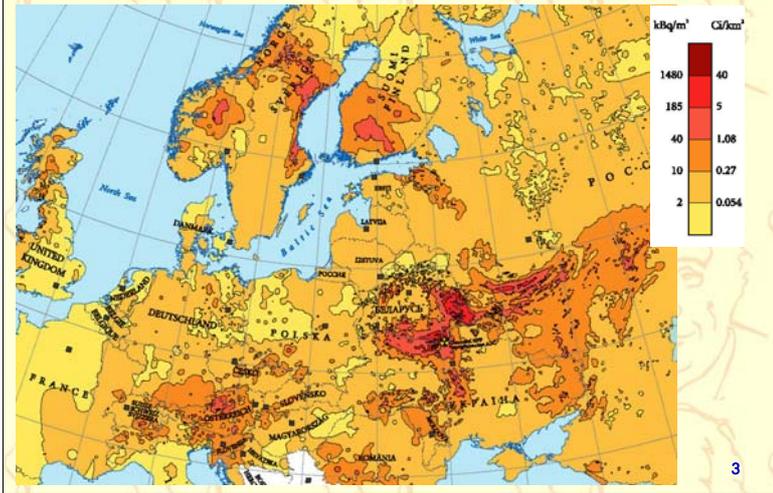


- 1) Siamo al confine tra Ucraina, Bielorussia e Russia; 110 km da Kiev; vicino a Prypiat
- 2) Notte tra il 25 e il 26 aprile 1986
- 3) Il monumento alle vittime



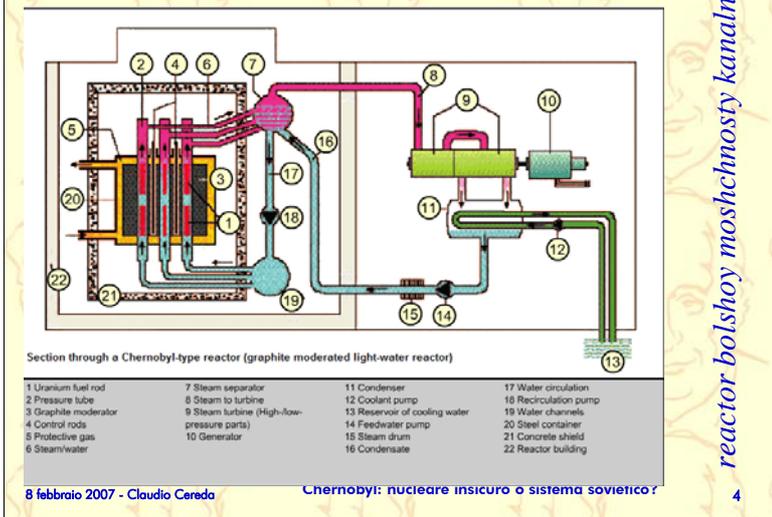
- 1) Osservare il tempo nel formato aammgghh dal 26 aprile al 7 maggio
- 2) In colore le concentrazioni di Cesio 137 con il riquadro che indica il punto dell'incidente
- 3) Primo braccio in Scandinavia (la prima notizia verrà dalla Svezia il giorno 27 dai livelli riscontrati in una centrale senza che si evidenziassero anomalie) e poi verso Germania Italia; secondo braccio verso Russia e Turchia

## La nube di Cesio<sub>137</sub> rilascio al suolo



- 1) Eventualmente spiegare kBq/m<sup>2</sup> cosa significa in termini dosimetrici ed osservare il deposito a macchia di leopardo

## Il reattore RBMK 1000



- 1) *reactor bolsшой moshchnosty kanalny* reattore a canali di alta potenza
- 2) Ce ne sono ancora 16 in servizio in Russia modificati dopo Chernobyl
- 3) In realtà è simmetrico: due impianti e due turbine con turboalternatore da 500 MW e potenza termica da 1600 MW (rendimento intorno al 32%)
- 4) Non ci sono impianti separati di fluido
- 5) Non c'è un sistema di contenimento
- 6) La grafite è circondata da un sistema elio azoto per ragioni di inerzia (antincendio) visto che la grafite arriva a 600°

## L'impianto dei 4 reattori



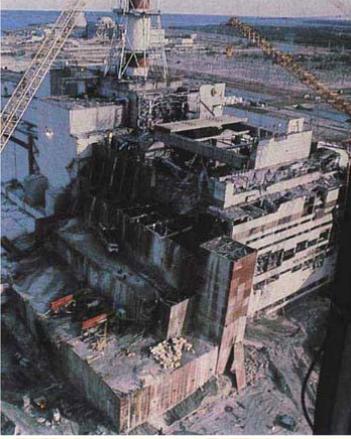
8 febbraio 2007 - Claudio Cerada

Chernobyl: nucleare insicuro o sistema sovietico?

5

- 1) 4 Unità da 3'200 MWt ciascuna per 1000 MwE con altre due in costruzione; producevano il 10% della energia elettrica per la Ucraina
- 2) Unità 1 e 2 tra il 1970 e il 1977
- 3) Unità 3 e 4 1983; la 4 era la più nuova

## Il reattore distrutto e il sarcofago



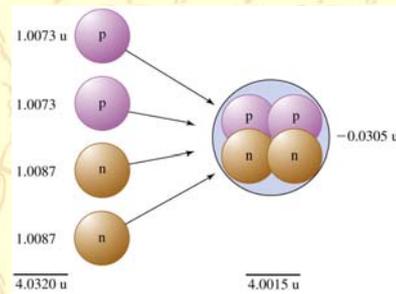
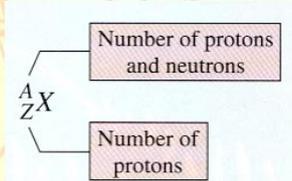
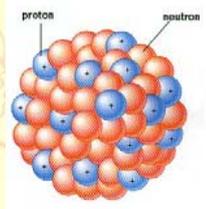
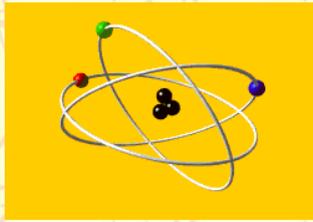
8 febbraio 2007 - Claudio Cerada

Chernobyl: nucleare insicuro o sistema sovietico?

6

- 1) Lavori di costruzione del sarcofago
- 2) Oggi c'è preoccupazione per la sua tenuta e c'è un impegno internazionale per la realizzazione di una nuova struttura

## Come sono fatti gli atomi?



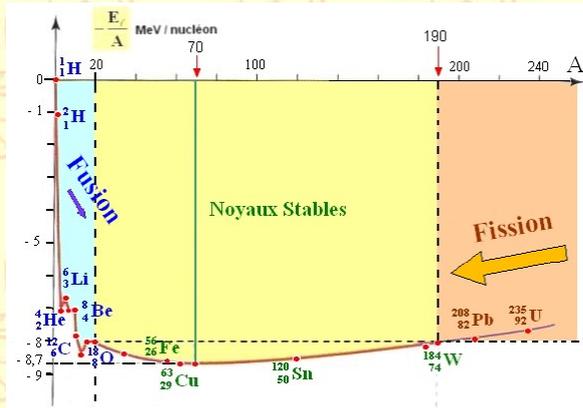
8 febbraio 2007 - Claudio Cerada

Chernobyl: nucleare insicuro o sistema sovietico?

7

- 1) Nucleo e nube elettronica  $10^{-10}$  m contro  $10^{-15}$  m
- 2) Esempio  $U_{92}^{238}$ : il ruolo di collante (fino ad un certo punto) dei neutroni (come mai c'è Fermi sullo sfondo? La scuola italiana di fisica è stata leader mondiale dal 1932 al 1938 con il gruppo di Roma Majorana, Rasetti, Amaldi, Segrè)
- 3) Il nucleo sta insieme per la interazione forte con energie di legame molto grandi le uniche per le quali  $E = mc^2$  ha senso
- 4) Quando si forma un nucleo si libera energia e la massa del sistema diminuisce; ma la grandezza del legame dipende dal numero atomico

## Come funziona il legame nucleare?



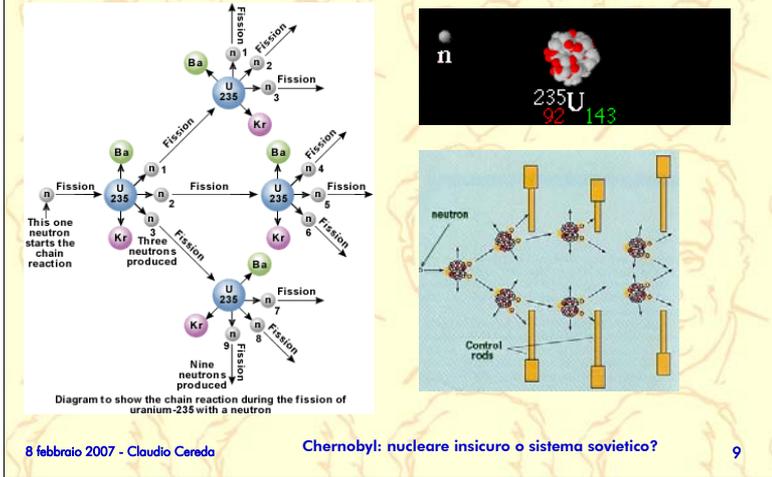
8 febbraio 2007 - Claudio Cerada

Chernobyl: nucleare insicuro o sistema sovietico?

8

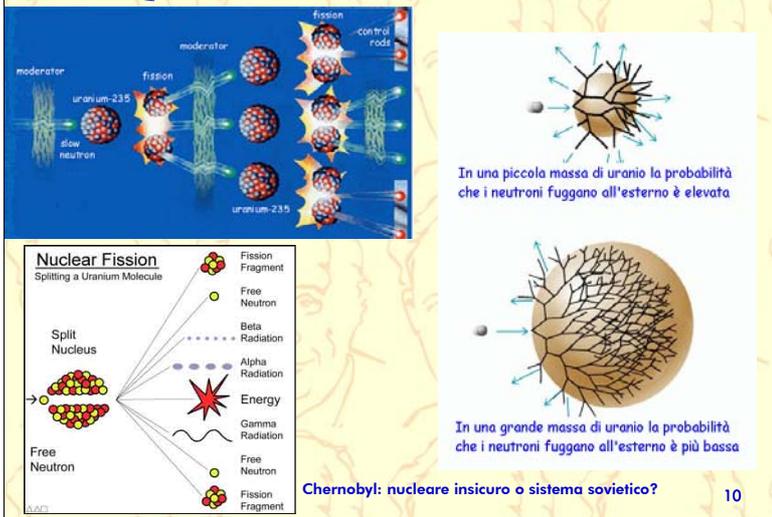
- 1) Pensatela come una buca: più si va in basso e più si va verso la stabilità; mentre si cade si libera energia. Quanta? A parità di peso un milione di volte di più di quella chimica
- 2) Si è scoperto che è *naturale* e che in Africa ha funzionato per 500'000 anni un reattore nucleare naturale. L'uranio subisce anche la fissione spontanea ma  $T_{1/2} = 10^{16}$  anni contro  $10^9$  anni per il decadimento

## Cosa succede ai nuclei nella fissione?



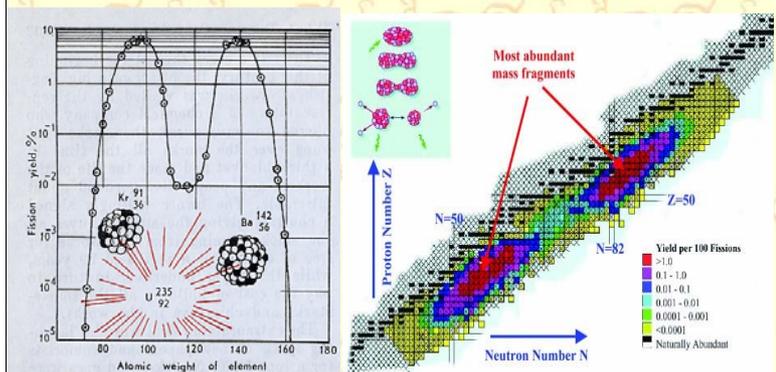
- 1) Serve un neutrone come innesco
- 2) Non tutti i neutroni hanno la stessa probabilità di interagire (più sono lenti e meglio è ma si può avere fissione anche con i neutroni veloci con significative sezioni d'urto per l' $U^{238}$ )
- 3) La energia che si libera è quella del diagramma precedente circa 200 MeV e si ripartisce tra i neutroni e i frammenti
- 4) Nel ragionare sulla reazione a catena si considerano la vita media di una generazione  $10^{-7}$ – $10^{-8}$  s che vuol dire che in  $10^{-5}$  s se assumiamo un fattore di moltiplicazione 2 se ne hanno  $2^{100} = 10^{30}$ ; il processo è meno violento perché ci vorrebbero 1000 ton di U e nella bomba si usa qualche kg
- 5) Per il controllo bisogna che il fattore di moltiplicazione  $N_2/N_1$  sia circa 1 per questo si usano le barre di controllo fatte con materiale altamente assorbente per i neutroni (Boro). In un reattore il controllo è svolto dalla geometria del core, dalle barre e dall'acqua (che è un buon assorbitore di neutroni con l'idrogeno che diventa Deuterio).

## Quando avviene la fissione?



- 1) Bisogna rallentare i neutroni: moderatore dei neutroni H, D, C (massa simile e scarsa sezione d'urto per urto anelastico se no il neutrone sparisce)
- 2) Bisogna evitare che i neutroni scappino senza interagire (alternare combustibile e moderatore; concetto di massa critica e problematica dell'arricchimento). Solo lo 0.3 % dell'Uranio naturale è  $U^{235}$
- 3) In genere si circonda il core con uno schermo riflettente di sostanza moderatrice
- 4) I neutroni possono dar luogo a urto elastico, cattura con produzione di  $U^{239}$ , cattura con fissione

## Cosa si forma nella fissione?



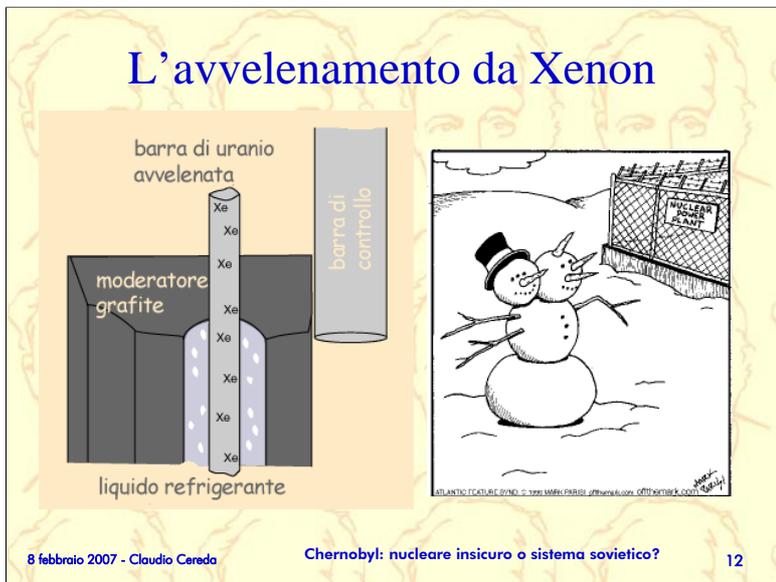
8 febbraio 2007 - Claudio Cerada

Chernobyl: nucleare insicuro o sistema sovietico?

11

- 1) Si forma di tutto con probabilità diverse nel rispetto delle leggi di conservazione della massa energia e del numero nucleonico
- 2) Attenzione allo Iodio<sup>131</sup> (metabolismo tiroide) e Cs<sup>137</sup> che può entrare nel ciclo alimentare per le affinità con il Calcio
- 3) Non sono prodotti diretti ma derivano dal decadimento di altri a breve ciclo

## L'avvelenamento da Xenon



- 1) Lo Xenon 135 è un ordinario sottoprodotto di fissione dell'Uranio 235. Quando l'Uranio 235 viene colpito da un neutrone, tra le possibili reazioni vi è quella che origina l'Indio 135 che in poco più di 6 ore e mezza decade in Xenon 135, dopo una emissione  $\beta^-$ . Un'altra emissione  $\beta^-$  avviene dopo poco più di 9 ore e si ottiene Cesio 135.
- 2) Ora si deve tener conto che questo Xenon 135 si trova in una barra di combustibile che continua a produrre fissioni. La probabilità che un nucleo di Xenon 135 catturi un neutrone (con una reazione che genera Xenon 136 e radiazione gamma) è circa 4000 volte maggiore di quella relativa ad un neutrone che vada a produrre una nuova fissione. Di questo inconveniente, che tenderebbe a bloccare la reazione a catena mediante *l'avvelenamento* delle barre di combustibile, non si deve tenere normalmente conto in un reattore che funziona a pieno ritmo perché ulteriori neutroni distruggono lo Xenon che, addirittura, non riesce neppure a decadere. Ma, se il reattore si ferma, allora si ha questo processo di avvelenamento che dura alcune decine di ore, finché non decade tutto lo Xenon. In questa fase il reattore non è controllabile (lo Xenon fa quel che vuole) e dunque conviene spegnere tutto.
- 3) Questo assorbimento di neutroni da parte dello Xenon impedisce la rapida rimessa in moto del reattore. Normalmente il reattore può essere rimesso in moto dopo due o tre giorni.
- 4) Credo si possa ben capire perché un test, che eventualmente potrebbe richiedere una o due ripetizioni, come quello di cui discutiamo non doveva essere fatto in alcun caso nel momento di gran parte delle barre di combustibile esaurite. Semmai andava tentato dopo la ricarica delle barre.

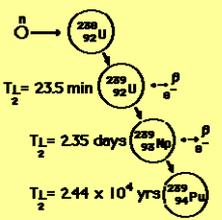
# Materiali fissili

92 U uranium	93 Np neptunium	94 Pu plutonium
-----------------	--------------------	--------------------

**uranium**



Atomic Number:	92	Atomic Radius:	138.5 pm
Atomic Symbol:	U	Melting Point:	1135 °C
Atomic Weight:	238.029	Boiling Point:	4131 °C
Electron Configuration:	[Rn]7s <sup>2</sup> 6d <sup>1</sup>	Oxidation State:	6, 5, 4



**plutonium**



Atomic Number:	94	Atomic Radius:	131 pm
Atomic Symbol:	Pu	Melting Point:	640 °C
Atomic Weight:	244	Boiling Point:	3228 °C
Electron Configuration:	[Rn]7s <sup>2</sup> 6d <sup>6</sup>	Oxidation States:	6, 5, 4, 3



- 1) Cosa vuol dire *fissile* e *fertile*
- 2)  $U_{235}$  (fissile)  $U_{238}$  (fertile)  $Pu_{239}$  (fissile)
- 3) Per fare la bomba ci vuole  $U_{235}$  puro; problemi della separazione isotopica che si fa un atomo alla volta mentre in un kg di U di atomi ce ne sono  $3 \cdot 10^{24}$ ; per questo è stato reinventato il Pu: lo si separa per via chimica
- 4) Parlare della produzione del Plutonio che dopo 24000 anni ritorna  $U_{235}$
- 5) Quante tonnellate ne abbiamo? Sia gli [Stati Uniti](#) che l'[Unione Sovietica](#) accumularono grandi scorte di plutonio durante gli anni della [guerra fredda](#); si stima che le scorte ammontassero nel [1982](#) a 300 tonnellate.
- 6) Cosa c'entra con Chernobyl ma anche con la pila di Fermi? Si produce plutonio irraggiando  $U^{238}$ ; se poi lo si vuole usare a scopo militare bisogna evitare che si produca il  $Pu^{240}$  per questo si fa il refilling (come a Chernobyl) ma per fare il refilling servono impianti sopra il nucleo e non si può fare la struttura di contenimento.

U 235  
Hiroshima  
prima



dopo

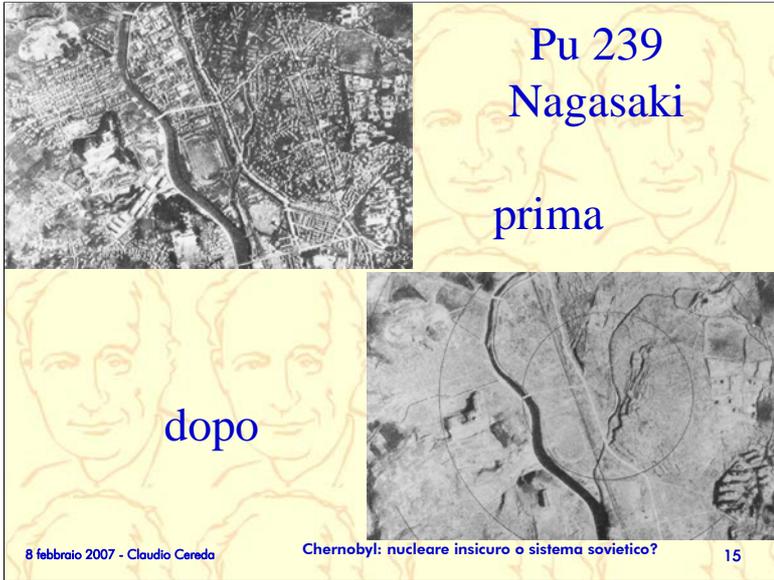


8 febbraio 2007 - Claudio Cerada

Chernobyl: nucleare insicuro o sistema sovietico?

14

No comment



1) No comment

# La radioattività cos'è?

Alpha particle = helium nucleus (+2 electric charge)

Beta particle = electron (-1 electric charge)

Gamma ray = ultrahigh-energy nonvisible light (no electric charge)

Magnet

Radium sample

Lead block

Copyright © 2004 Pearson Education, publishing as Addison Wesley

Particules alpha

Particules beta moins : electrons

Rayonnements X et gamma

Neutrons

$^{263}_{106}\text{Sg}_{157}$

$^{14}_6\text{C}$

$^{152}_{66}\text{Dy}_{86}$

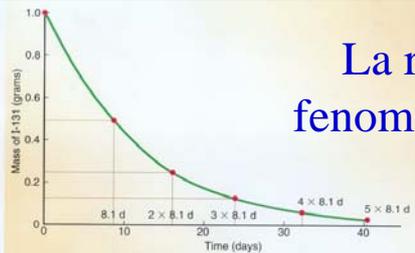
8 febbraio 2007 - Claudio Cerada

Chernobyl: nucleare insicuro o sistema sovietico?

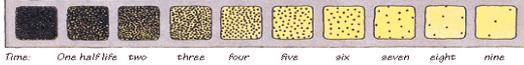
16

- 1) Il decadimento è una transmutazione dei nuclei che diventano altro: è la pietra filosofale degli alchimisti. La novità è che dopo quella naturale abbiamo inventato quella artificiale
- 2) I tre decadimenti tipici, le energie in gioco, il potere di penetrazione
- 3) Come avviene il processo: espulsione di un nucleo di Elio; trasformazione  $n \rightarrow p + e$ ; riassetamento con emissione di un  $\gamma$

## La radioattività fenomeno stocastico



Decay rate of radioactivity: After ten half lives, the level of radiation is reduced to one thousandth



Nuclide	Half-Life <sup>a</sup>	Nuclide	Half-Life <sup>a</sup>	Nuclide	Half-Life <sup>a</sup>
$^3_1\text{H}$	12.26 y	$^{40}_{19}\text{K}$	$1.25 \times 10^9$ y	$^{214}_{84}\text{Po}$	$1.64 \times 10^{-4}$ s
$^{14}_6\text{C}$	5730 y	$^{80}_{35}\text{Br}$	17.6 min	$^{222}_{86}\text{Rn}$	3.823 d
$^{13}_8\text{O}$	$8.7 \times 10^{-3}$ s	$^{90}_{38}\text{Sr}$	27.7 y	$^{226}_{88}\text{Ra}$	$1.60 \times 10^3$ y
$^{28}_{12}\text{Mg}$	21 h	$^{131}_{53}\text{I}$	8.040 d	$^{234}_{90}\text{Th}$	24.1 d
$^{32}_{15}\text{P}$	14.3 d	$^{137}_{55}\text{Cs}$	30.23 y	$^{238}_{92}\text{U}$	$4.51 \times 10^9$ y
$^{35}_{16}\text{S}$	88 d				

8 febbraio 2007 - Claudio Cerada

Chernobyl: nucleare insicuro o sistema sovietico?

17

- 1) Impiega sempre lo stesso tempo a ridursi a metà
- 2) La attività di un materiale è direttamente proporzionale alla quantità e inversamente al tempo di dimezzamento
- 3) Quelli pericolosi sono quelli che decadono più in fretta
- 4) Diamo una occhiata ai tempi tipici (Uranio, Radio, Radon, Iodio e Cesio)

## Le tre famiglie naturali

Element	Uranium-238 series				Th-232 series			U-235 series		
Uranium	U-238 4.5*10 <sup>9</sup> y	U-234 245500 y						U-235 7.0*10 <sup>8</sup> y		
Protactinium	↓	Pa-234 1.2 min						↓	Pa-231 32800 y	
Thorium	Th-234 24.1 d	Th-230 75400 y			Th-232 1.4*10 <sup>10</sup> y	Th-228 1.91 y	Th-231 25.5 h	↓	Th-227 18.7 d	
Actinium					↓	Ac-228 6.1 h	↓	Ac-227 21.8 y	↓	
Radium		Ra-226 1600 y			Ra-226 5.75 y	Ra-224 3.7 d			Ra-223 11.4 d	
Francium										
Radon		Rn-222 3.8 d								
Astatine										
Polonium		Po-218 3.1 min	Po-214 0.00014 s	Po-210 138 d						
Bismuth		Bi-214 19.9 min	Bi-210 5.0 d							
Lead		Pb-214 26.8 min	Pb-210 22.3 y	Pb-206 stable		Pb-208 stable			Pb-207 stable	

↓ α-decay  
Z: -2  
N: +4

↘ β-decay  
Z: +1  
N: +1-0

↓ decay series  
of short-lived  
nuclides

symbol of the  
element

Pa-231  
32500 y  
half-life

mass  
number

particle reactivity

low

intermediate

high

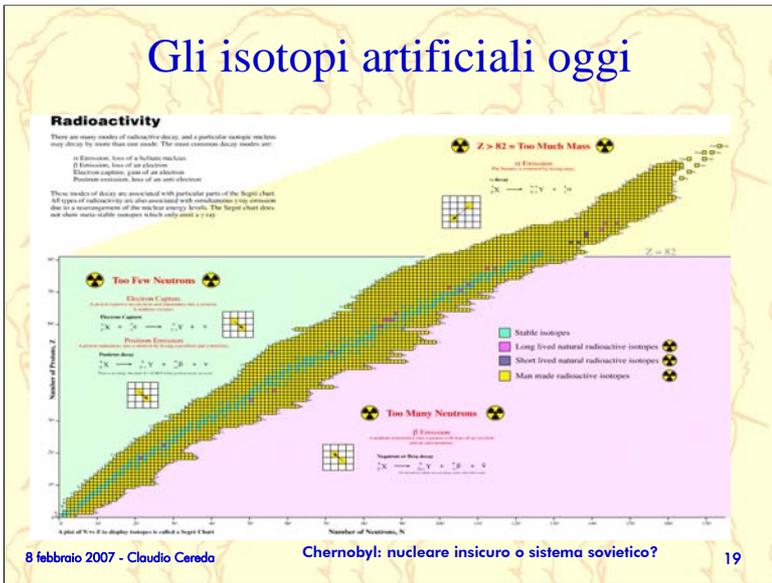
8 febbraio 2007 - Claudio Cerada

Chernobyl: nucleare insicuro o sistema sovietico?

18

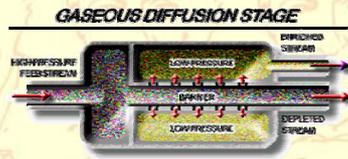
- 1) Distinguere alfa e beta
- 2) Osservare il Polonio 210
- 3) Confrontare le due famiglie dell'Uranio 4.5 miliardi contro 700 milioni; perché c'è poco U<sub>235</sub>

# Gli isotopi artificiali oggi



- 1) In verde stabili; in rosa e blu radioattivi naturali; in giallo radioattivi artificiali
- 2) A cosa servono ? Prevalentemente in ambito sanitario ma quelli interessanti sono una cinquantina in tutto; si ottengono bombardando gli elementi con fasci intensi di neutroni (reattori nucleari di ricerca)

## Il primo reattore: la pila di Fermi



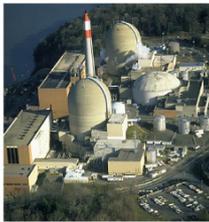
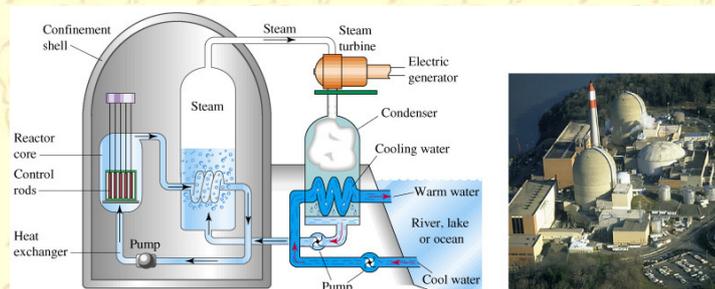
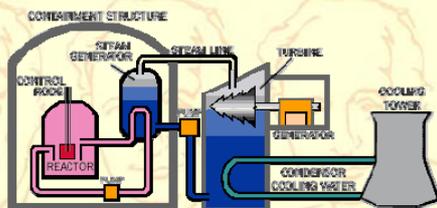
8 febbraio 2007 - Claudio Cerada

Chernobyl: nucleare insicuro o sistema sovietico?

20

- 1) Il problema dell'arricchimento del combustibile e l'uso della grafite come moderatore (bassa sezione d'urto per assorbimento); spiegare l'arricchimento. Si può usare l'acqua come moderatore se si dispone di uranio arricchito. Ma per l'arricchimento servono gli impianti
- 2) Perché è stato costruito il primo reattore nucleare: per la fattibilità e per verificare se si poteva usarlo per fabbricare plutonio; cosa che è stata fatta

## Come è fatto un reattore?



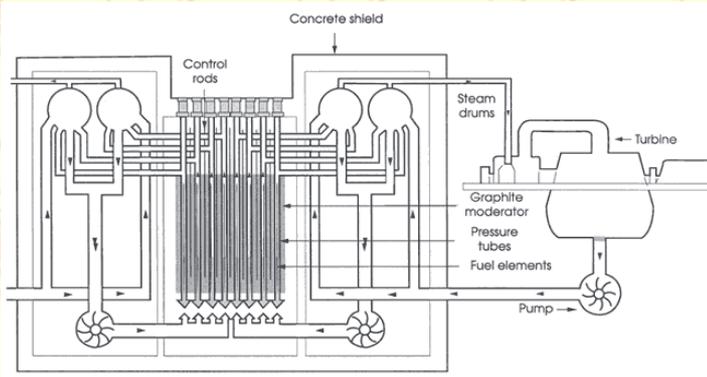
8 febbraio 2007 - Claudio Cerada

Chernobyl: nucleare insicuro o sistema sovietico?

21

- 1) C'è una parte nucleare, un liquido di trasporto del calore, un generatore di vapore, una turbina, un alternatore, una struttura di contenimento (reattore, fluido e scambiatore)
- 2) E' un PWR che usa acqua come rallentatore dei neutroni (feedback negativo)
- 3) Ce ne sono di vario tipo ma solo in URSS erano in esercizio i reattori a grafite (feedback positivo)

## Come è fatto un reattore a grafite ?



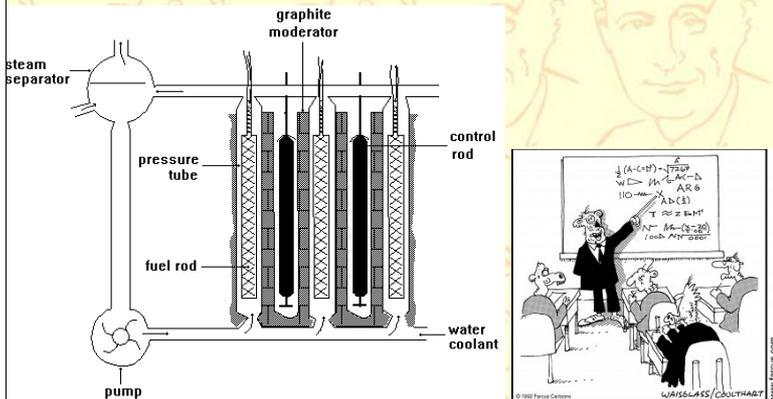
8 febbraio 2007 - Claudio Cerada

Chernobyl: nucleare insicuro o sistema sovietico?

22

- 1) Il moderatore dei neutroni è la grafite: infiammabile e continua a rallentare i neutroni anche quando il fluido si blocca (controreazione positiva). Se poi si fanno bolle quei pochi neutroni che erano assorbiti non lo sono più e la reazione aumenta. Si parla di coefficiente di vuoto positivo
- 2) Non ha una efficace struttura di contenimento per il refilling delle barre (vanno cambiate spesso e dunque vanno cambiate in esercizio)
- 3) E' un buon produttore di Plutonio
- 4) L'acqua di trasporto viene pompata dal basso (rischio di forte gradiente termico e bolle in alto) e c'è un unico circuito dal reattore alla turbina; rischio di trasporto all'esterno di radioattività

## Il dettaglio del reattore



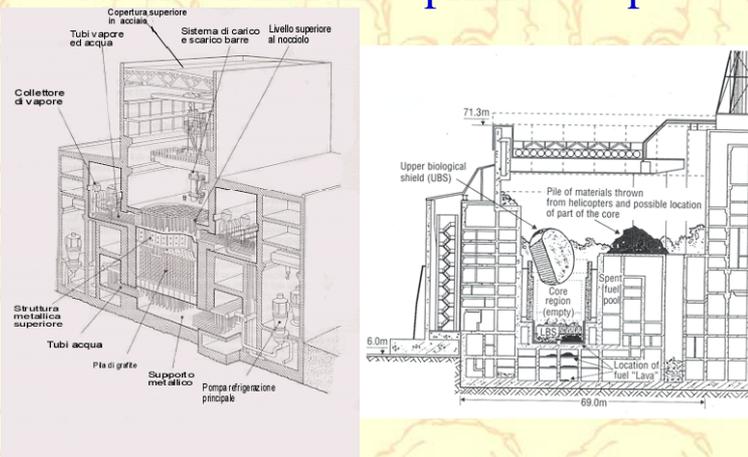
8 febbraio 2007 - Claudio Cerada

Chernobyl: nucleare insicuro o sistema sovietico?

23

- 1) combustibile: uranio debolmente arricchito (2%) in tubi di; è previsto lo sfilamento del combustibile in esercizio per il riprocessamento (plutonio 239 a fini militari e non 240)
- 2) tubi per acqua sotto pressione che entra dal basso ed esce a 290° lambendo le barre di combustibile
- 3) i tubi in pressione sono separati da blocchi di grafite tra i quali possono scorrere le barre di controllo in carburo di boro; La parte inferiore delle barre è in grafite (e dunque quando scendono c'è una fase in cui viene tolta acqua che assorbe neutroni e sostituita con grafite che li rallenta) inoltre l'inserzione è lenta 20 s contro 2 s dei reattori occidentali PWR e BWR.
- 4) una parte delle barre è permanentemente inserita per ragioni di sicurezza. Le barre erano in totale 211
- 5) Due circuiti di raffreddamento simmetrici

## Visione di insieme: prima e dopo

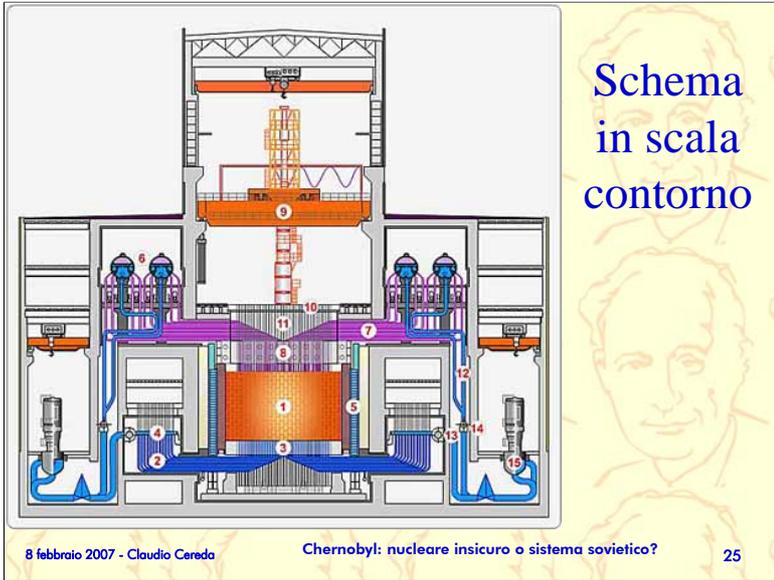


8 febbraio 2007 - Claudio Cerada

Chernobyl: nucleare insicuro o sistema sovietico?

24

- 1) E' saltato il tappo d'acciaio da 2000 ton ed è ricaduto sul core aggravando la rottura della geometria e degli impianti di controllo
- 2) Il nucleo è fuso ed è sceso di 4m



- 1) Nessun commento tranne il tappo d'acciaio n. 9 e gli apparati per il refilling delle barre

## La prova di sicurezza scellerata

- 100 volte potenza nominale = 320'000 MWt
- 2 esplosioni una da vapore e l'altra da idrogeno
- Espulsione di  $12 \cdot 10^{18}$  Becquerel  $\approx$  20 ton di Radio
- Nube sull'Europa
- Fine del nucleare in numerosi paesi tra cui il nostro e paura collettiva
- Molti meno morti di quanto non si dica ma forte inquinamento
- Difficoltà a discutere razionalmente di energia

- 1) Il 26 aprile 1986, verso l'una del mattino, il reattore n°4 della centrale ucraina di Chernobyl, nel corso di un test a bassa potenza richiesto dall'autorità centrale di Mosca, fu soggetto ad un'escursione di potenza: in qualche secondo la stessa raggiunse valori almeno dell'ordine di 100 volte quella nominale che era di 3.4 GWt; poiché il fluido termovettore - acqua leggera - non era più in grado di smaltire questa enorme quantità di calore, esso si è vaporizzato in una frazione di secondo, causando alle ore 1 23 minuti e 44 secondi (ora locale) un'esplosione di vapore. Il reattore fu distrutto. Una radioattività dell'ordine di  $12 \cdot 10^{18}$  Bequerel (circa 300 milioni di Curie) si è liberata nell'atmosfera per una decina di giorni, contaminando in modo significativo una zona di 150 000 km<sup>2</sup>, abitata da circa 6 milioni di persone e producendo su una gran parte dell'Europa un aumento misurabile della radioattività.

## Il botto minuto per minuto 1/2

- Ore 22 del 25/4 chiusura ECSS alla vigilia di un ponte lungo 1-2/5
- Ore 23 inizia il test e per difetto di regolazione la potenza va a 30 MWt contro i 1000 MWt previsti (ore 0.30 del 26)
- Invece di sospendere si disattivano gli automatismi per operare in manuale
- Ore 1.00 la potenza risale a 200 MWt ma non va oltre (avvelenamento da Xenon che alle basse potenze si fa molto sentire); si alzano altre barre
- Inizia il test e tra la 1.03 e la 1.07 si mette in azione la pompa principale (collegata alla rete). Si ha un brusco calo di pressione (ma gli automatismi di spegnimento sono stati esclusi). Il liquido di raffreddamento è prossimo allo stato di vapore per la diminuzione di velocità (maggiore permanenza in vicinanza delle barre)
- Ore 1.07-1.22 si procede in manuale con regolazioni ogni 5 s, si estraggono altre barre, per mantenere la pressione si diminuisce la portata; e ne restano 6-8 in tutto contro 240; ci sono le condizioni critiche per il test (secondo manuale bisognava spegnere immediatamente). La potenza è al 12%
- Ore 1.23.4 si scollega la turbina: le pompe dovranno andare per inerzia
- L'acqua inizia a ristagnare nei tubi e si formano bolle (cessano raffreddamento e azione moderatrice secondaria; l'acqua assorbe neutroni, il vapore no); la temperatura sale
- Ore 1.23.40 allarme; sganciare le barre: inizia la discesa, ma nei primi 4 s invece che boro scende grafite che sposta acqua, la reazione aumenta e fondono i tubi; in 3 s si arriva a 530 MW e nei 4 s successivi va a 100 volte la potenza nominale 300'000 MWt. Le barre non possono più scendere

- 1) Il reattore RBMK è diviso in due sezioni, ciascuna delle quali collegata ad un turbogeneratore. Con tale disegno è possibile fermare metà reattore con il suo turbogeneratore. Eravamo in questa condizione di fermo al 50% il 25 aprile 1986, per operazioni di normale manutenzione dell'Unità 4. Si pensò di sfruttare questo fermo per fare l'esperimento seguente: *nel caso si fosse avuto un qualunque abbassamento di potenza, la turbina e l'alternatore funzionanti al minimo sarebbero stati in grado di dare potenza elettrica sufficiente per mettere in funzione i dispositivi di emergenza, le pompe per il raffreddamento dell'acqua del nocciolo, fino a che non si fossero messi in funzione i generatori diesel che avrebbero provveduto allo scopo?* Il fine di questi test era il determinare se il raffreddamento del nocciolo sarebbe stato assicurato lo stesso nel caso di abbassamenti fortuiti di potenza. ... Quando si decise di mettere in pratica il test non vi fu coordinamento tra coloro che dovevano fare l'esperimento e coloro che erano incaricati degli impianti di sicurezza del reattore. Questi ultimi non erano stati avvertiti del test e del suo pericolo potenziale. Il programma dell'esperimento prevedeva la chiusura dei sistemi di raffreddamento di emergenza del nocciolo (ECCS), sistemi che avrebbero fornito l'acqua in caso di emergenza. Questa cosa non ebbe poi grande rilevanza per il succedersi degli eventi catastrofici, ma mostra a quale livello di incoscienza si operava relativamente a questioni di sicurezza.
- 2) In accordo con il programma dell'esperimento, circa un'ora prima che esso venisse effettuato, furono chiusi gli ECCS con il reattore che continuava ad operare a mezza potenza. Intorno alle ore 23:10 del 25 aprile il controllore della rete acconsentì ad una ulteriore riduzione di potenza. C'è inoltre da tener conto bene delle date: il 25 aprile era venerdì e l'1 e 2 maggio sono feste nazionali. Con un paio di giorni da giocare è possibile fare un ponte lungo e certamente varie persone lo hanno fatto e probabilmente quelle più elevate in grado e quindi più esperte.
- 3) Per realizzare il test il reattore si sarebbe dovuto stabilizzare a circa 1000 MW termici prima di fermarlo ma, a seguito di un errore procedurale (dovuto probabilmente a cattiva taratura degli strumenti), le barre di controllo scesero più del previsto e la potenza del reattore precipitò a circa 30 MW termici (ore 0.30), dove l'instabilità diventa dominante. In questo momento la turbina era a minima potenza e forniva intorno ai 10 MW elettrici, quantità insufficiente per far

## Il botto minuto per minuto 2/2

- Ore 1.24.00: prima esplosione per contatto tra acqua e combustibile ad alta temperatura (esplosione termodinamica). Viene distrutto il nocciolo e salta il coperchio da 2000 ton di acciaio
- Il coperchio ricade di traverso e completa la distruzione del core e dei servomeccanismi
- 1.24.15: il vapore surriscaldato a contatto con lo Zr si scinde, si forma H e si ha una nuova esplosione che coinvolge tutti i locali adiacenti saturi di H e O; la centrale esplose
- La grafite si incendia; un pennacchio sale per 1 km: dentro c'è di tutto
- La reazione prosegue e il nocciolo fonde scendendo di 4 metri; ci sono oltre 100 incendi e intorno ci sono altri 3 reattori in funzione con 3000 kg di Pu e 700'000 kg di U
- Centinaia di pompieri lavorano per giorni senza protezione per tamponare il disastro; alcuni sanno di andare incontro alla morte; sono gli eroi di Chernobyl



- 1) Una ricostruzione al computer dell'incidente dice che a questo punto gli elementi di combustibile si andavano rompendo provocando un aumento rapido della pressione del vapore nei canali che contenevano il combustibile stesso con la conseguente distruzione dei medesimi. A questo punto l'acqua di refrigerazione non aveva più dove circolare liberamente ma solo attraverso pezzi di combustibile rotti e surriscaldati. Piccole parti di combustibile ad alta temperatura, reagendo con l'acqua, provocarono una potente esplosione del vapore che distrusse il nocciolo della centrale. Era l'una e 24, 20 secondi dopo l'inizio dell'emergenza. L'esplosione danneggiò il tetto e fece sollevare il coperchio monoblocco di acciaio della centrale, del peso di circa 2000 tonnellate.
- 2) Per maggiore disgrazia, nel ricadere, questo coperchio si adagiò di fianco incastrandosi tra le opere murarie e nei suoi violenti spostamenti strappò cavi e varie tubature provocando svariati danni, ormai a catena.
- 3) Passarono solo 2 o 3 secondi e seguì una seconda esplosione, molto più violenta. Questa volta era l'idrogeno il responsabile, idrogeno prodotto dalla reazione ad alta temperatura tra vapore e zirconio (il materiale che faceva da camicia ai tubi che contenevano le barre) e tra vapore e grafite incandescente (che produce idrogeno ed ossigeno). Tale idrogeno si era probabilmente accumulato localmente negli spazi del nocciolo liberi o liberati. Testimoni all'esterno della centrale hanno visto scagliati all'aria pezzi in fiamme che, nel ricadere, estendevano l'incendio al corpo della centrale stessa.
- 4) Circa il 25% dei blocchi di grafite fu sparato all'aria in fiamme. Furono scagliati lontano anche pezzi di elementi di combustibile, parti del nocciolo e delle strutture portanti. Le spaccature nel tetto fecero da effetto camino con l'estensione ulteriore dell'incendio. Questo fu l'inizio della catastrofe. Il pennacchio di fumi, contenenti isotopi radioattivi, si alzò per oltre un chilometro sopra la centrale. I componenti pesanti di questi fumi ricaddero più o meno nelle vicinanze della centrale, ma i componenti leggeri, i gas, iniziarono la loro marcia per l'Europa iniziando dal Nord-Est della centrale, dove i venti prevalenti spingevano .
- 5) Sparito il refrigerante, sparito ogni controllo, finita la geometria del reattore, in qualche parte proseguiva la reazione a catena perché vi era Uranio 235 ed un moderatore (grafite) ancora efficienti. Saliva la temperatura ed il nocciolo stava

## Cause: errori di concezione

- Sistema instabile sotto 25% (era noto; Xenon)
- 20 s per l'inserimento delle barre contro 2 s
- Barre di controllo con punta di Carbonio
- Uso della grafite (infiammabile) come moderatore
- Non c'è struttura di contenimento (plutonio per i militari)

un autobus senza carrozzeria, dove il volante non risponde più e nel quale il sistema di frenatura lancia il veicolo a piena velocità per qualche secondo, prima di rallentarlo efficacemente, una ventina di secondi dopo... ossia ben dopo che il veicolo sia finito nel fosso o contro un muro

E magari hanno detto all'autista che è tutto in ordine, o che si deve sacrificare in nome di ... (ditelo voi perché ci sono tante risposte)

- 1) Il nocciolo di questo tipo di reattore è instabile sotto i 700 MWt (poco meno del 25% della potenza nominale). In breve, a bassa potenza, ogni tendenza all'incremento viene amplificata rapidamente ed automaticamente : il reattore diviene difficilmente controllabile. L'esplosione di Chernobyl è avvenuta, precisamente, nel corso di una prova a bassa potenza, ossia in un contesto di instabilità in quel reattore. Gli ingegneri russi conoscevano questa instabilità e così gli esperti francesi e britannici. Immaginatevi un autobus che rischia di uscir di strada in montagna con un volante che non risponde più!!
- 2) L'inserimento completo delle barre di controllo del RMBK è lento: richiede una ventina di secondi (< 2 secondi in tutti gli altri reattori del mondo, eccetto i RMBK) e ciò è troppo lento per impedire l'incremento di potenza del nocciolo allorché stia funzionando nella sua regione di instabilità. Le barre di arresto di emergenza ad inserimento rapido non esistono nei reattori RMBK. Immaginatevi che i freni dell'autobus non forniscano tutta la loro potenza che 20 secondi dopo il "colpo sui pedali dell'autista"!!
- 3) Le barre di controllo, costituite di carburo di boro, hanno all'estremità una punta in carbonio che, nella fase iniziale di inserzione delle barre inizia ad aggiungere reattività... invece di diminuirla! Come se la prima risposta al "colpo sui pedali dell'autista" fosse un'accelerata del motore dell'autobus a piena potenza per qualche secondo!! Questo fenomeno pericoloso era già stato riscontrato nel 1983 su un reattore RMBK della centrale di Ignalina.
- 4) La funzione di moderatore - rallentamento dei neutroni - è assicurata da 600 tonnellate di grafite. Qui non si tratta proprio di un errore di concezione ma piuttosto di una debolezza : la grafite molto calda si infiamma all'aria libera, l'incendio vaporizza i radionuclidi contenuti nel reattore : la loro dispersione nell'atmosfera viene quindi fortemente favorita.
- 5) I reattori RMBK non posseggono né dispositivi di purificazione delle emissioni gassose né edificio di contenimento : un simile edificio avrebbe almeno, nel peggiore dei casi, diminuito notevolmente e rallentato la fuoriuscita di radioattività nell'ambiente. Privo di questo contenimento, il reattore RMBK è come un autobus senza carrozzeria : queste evidentemente è una protezione maggiore, indispensabile

## Sei errori e colpe del personale

- 2 violazioni di consegne permanenti (potenza < 25%, < 30 barre nel core; si arrivò a 7 su 240)
- 1 mancato rispetto procedure
- 3 messe fuori servizio di dispositivi di sicurezza

Ne bastava una sola in meno e non sarebbe successo, **ma è successo**; supponiamo di dare 0.01 alla probabilità di un evento;  $(10^{-2})^6 = 10^{-12}$ ; non doveva accadere ma è accaduto; come mai?

- 1) 6 errori e colpe umane sono stati identificati
- 2) 2 violazioni di consegne permanenti (funzionamento prolungato a meno di 700 MWth, meno di 30 barre di controllo inserite nel nocciolo) ;
- 3) 1 mancato rispetto delle procedure di prova ;
- 4) 3 messe in fuori servizio volontarie di dispositivi di sicurezza (lo spruzzamento di sicurezza e, successivamente, 2 dispositivi di arresto di urgenza).
- 5) Evidentemente il personale, insufficientemente addestrato, non aveva la percezione della pericolosità delle sue azioni. Se si fosse evitato uno solo di questi 6 errori l'esplosione non sarebbe successa. Sarebbe comunque troppo facile addebitare agli operatori la responsabilità della catastrofe : hanno fatto il loro lavoro, forniti della sola formazione che era stata loro data ; e questa era insufficiente ed incongruente con la mancanza di sicurezze passive dell'installazione. L'ignoranza della neutronica del nocciolo RBMK impediva loro di comprendere le conseguenze delle decisioni che prendevano : inoltre il reattore era nel corso di una prova a bassa potenza, secondo un programma che prevedeva delle deroghe significative alle regole permanenti di esercizio.  
Circa le consegne di esercizio - sia le consegne permanenti che quelle specifiche della prova da eseguire - erano incomplete ed imprecise.  
L'esame dettagliato di cosa è avvenuto nelle ore e nei minuti precedenti all'esplosione mostra che essa non poteva non avvenire. E se si considera che il concetto di incidente è associato a quelli di alea ed incertezza - cioè probabilità - allora l'esplosione del reattore di Chernobyl non è un incidente.
- 6) la preparazione teorico-pratica e l'addestramento eseguito "entro i limiti di un algoritmo di controllo primitivo", come rilevato da Medvedev (Ingegnere nucleare, Vicedirettore della sezione Costruzione centrali nucleari del Ministero dell'Energia dell'URSS),
- 7) il "comportamento irresponsabile" di tutta la linea di comando a cominciare dal capo centrale,
- 8) la distrazione degli operatori che giocavano a carte e a domino (uno dei motivi della condanna),
- 9) la perdita completa da parte del personale del "senso del rischio operativo"

## Sistema sovietico autoritario e sfatto

- Produrre plutonio, produrne tanto, produrlo in fretta: in nome del socialismo
- La cultura del segreto e la segmentazione delle conoscenze (tipiche delle strutture autoritarie e militari)
- La scienza e la tecnologia asservite al potere
- Mancanza cultura della sicurezza: progettazione, esercizio, piani di emergenza
- Evacuazione in ritardo, segretezza, mancata informazione della popolazione, mancata informazione dei liquidatori, mancata distribuzione dello iodio alla popolazione



8 febbraio 2007 - Claudio Cerada

Chernobyl: nucleare insicuro o sistema sovietico?

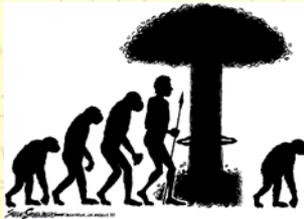
31

- 1) In piena guerra fredda - che minacciava a volte di divenire calda - la funzione militare del RBMK forniva alla concezione, alla costruzione ed all'esercizio di reattori di questa filiera un carattere d'urgenza che non concedeva le "perdite di tempo" che avrebbero comportato i perfezionamenti assolutamente necessari alla sicurezza di questi reattori. L'obiettivo a cui erano sottomessi gli ingegneri e gli scienziati era uno solo : produrre plutonio militare quanto più possibile, quanto prima possibile. I problemi di bilancio avevano la stessa natura : non si volevano ridurre le spese ma semplicemente, con i fondi a disposizione, produrre il più rapidamente possibile la massima quantità del miglior  $^{239}\text{Pu}$  di grado militare. È per questo che il 2 maggio 1986 (6 giorni dopo l'esplosione) il Ministro dell'Elettrificazione dichiarava ad una riunione del Politburo: "Nonostante l'incidente, il gruppo di costruzione adempie ad i suoi obblighi socialisti e si lancerà presto nella costruzione del reattore n°5".
- 2) La cultura del segreto era universale nell'URSS. Essa imponeva la segregazione delle conoscenze : nessuno poteva detenerne la totalità ed integrare tutti gli aspetti della sicurezza di esercizio. In materia di nucleare civile questa cultura sovietica del segreto perdurerà fino al 1989.
- 3) Alcuni scienziati conducevano un discorso rigorosamente onesto; altri, ugualmente competenti e riconosciuti tali ma mossi più da interesse personale che da desiderio di obiettività scientifica, non avevano il coraggio del rigore ed accettavano dal potere politico, a volte persino incoraggiavano, alcune decisioni insensate o pericolose. Ai dibattiti di idee scientifiche, tecniche e tecnologiche si sostituivano le lotte di potere.  
I difetti di concezione del reattore non erano dovuti ad incompetenza degli ingegneri : erano il risultato della dittatura burocratica che presiedeva a tutte le decisioni nel sistema sovietico, compreso il campo della sicurezza.
- 4) **Conclusioni:** L'esplosione di Chernobyl e i danni sanitari che ne sono conseguiti sono stati resi possibili da un sistema politico che coltivava la segretezza e che non aveva ritenuto utile dare priorità allo sviluppo di una cultura di sicurezza adatta all'esercizio dei reattori nucleari. In questo, l'accaduto è innanzitutto sovietico. Questa grave mancanza di cultura della sicurezza si è manifestata a tre livelli: quello della progettazione, quello dell'esercizio e quello dei piani di emergenza

## Danni alla salute dati ONU 2000

- 134 casi di irraggiamento acuto: morti 2 + 28 + 1 + altri 19 nei 10 anni successivi (tra i liquidatori)
- 313'000 (o 800'000) liquidatori: problemi alla qualità della vita (ma mancano dati). Attesi 10'000 decessi per tumore maligno (chiarire la importanza di  $\Delta$  = confrontare)
- Aumento cancro alla tiroide (1800 in più) con 10 morti (unico dato vero) ed erano evitabili

Ma c'è anche chi spara numeri assurdi tipo 200'000 morti e se ne esce con vignette come queste

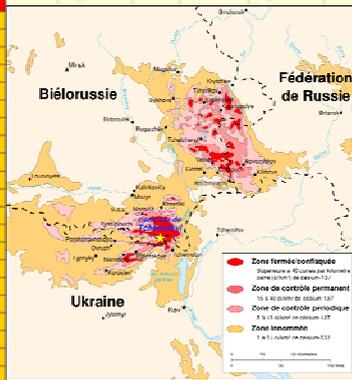


- 1) Gli effetti biologici e sanitari dell'incidente di Chernobyl possono essere rilevati soprattutto in popolazioni di repubbliche dell'ex URSS (consistenti parti della Bielorussia, alcune zone dell'Ucraina e della Federazione Russa). Gli effetti sanitari dell'incidente di Chernobyl possono essere suddivisi in: (a) effetti radioindotti acuti (deterministici); (b) effetti radioindotti tardivi di tipo probabilistico (stocastici); (c) altri effetti non imputabili alle radiazioni ionizzanti (ma collegati all'incidente) o la cui natura radioindotta è dubbia o contestata.
- 2) Effetti acuti si sono verificati all'interno del gruppo noto come "liquidatori", il cui numero stimato, secondo le fonti nazionali, è di circa 800.000 persone, appartenenti però a diverse categorie. I dati presentati dalle autorità ed accettati dall'UNSCEAR riportano: 499 sintomatici, 237 ricoverati, 28 deceduti per sindrome acuta da radiazioni nelle prime settimane, 19 deceduti nel 1987-1996. L'ipotesi che queste cifre **non esauriscano il quadro degli effetti acuti** verificatisi in questa popolazione può essere avanzata. Alcune stime sono disponibili sulle dosi a cui sono state esposti i "liquidatori": si ritiene che il 45% abbia ricevuto dosi inferiori a 100 mSv, per il 47% tra 100 e 250 mSv, per l'8% tra 250 e 500 mSv ed alcune centinaia di dosi superiori a 500 mSv.
- 3) Il principale effetto tardivo che ci si poteva attendere a fronte dell'esposizione a radiazioni ionizzanti a seguito del rilascio è l'aumento dell'induzione di alcuni tipi di tumori. Diversi studi sono stati condotti allo scopo di individuare queste patologie in alcuni dei gruppi evacuati (per un totale di circa 130.000 persone, di cui 49.000 dalla città di Prypiat) dalla zona circostante la centrale (circa 30 km di raggio) e di quelli che hanno continuato a vivere in zone (soprattutto rurali) abbastanza contaminate (numero minimo riportato: 270.000).
- 4) Si valuta che la popolazione che è stata evacuata abbia ricevuto dosi variabili tra 30 e 500 mSv con un valore medio di circa 120 mSv. Nel caso degli individui (non evacuati) abitanti zone ad alta contaminazione ( $>555$  kBq/m<sup>2</sup>), le dosi medie le dosi medie dovute al cesio (soprattutto <sup>137</sup>Cs) risultano di 40 mSv (con una distribuzione da 5 a 250 mSv), tenendo conto delle contromisure a carattere alimentare.
- 5) Un incremento statisticamente significativo dell'incidenza di carcinoma della tiroide è stato osservato. Non sono stati invece verificati aumenti significativi di

# Rilascio in atmosfera

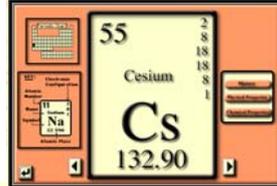
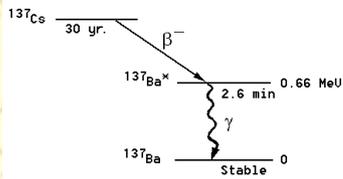
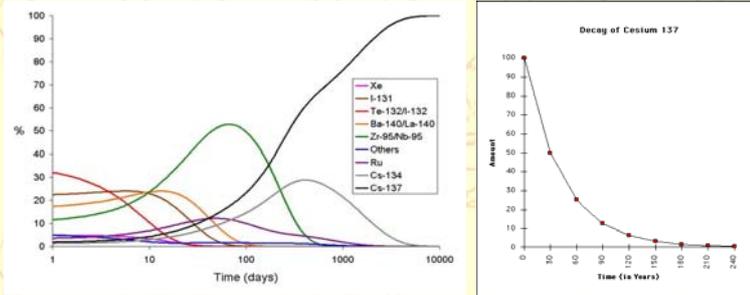
Elementi radioattivi presenti nel reattore 4 di Chernobyl al momento dell'esplosione e loro dispersione nell'ambiente

Radionuclide	Sigla	Attività presente in Bq · 10 <sup>9</sup>	% rilasciata	T <sub>1/2</sub>
Bario-140	140Ba	2.900,0	15%	12,7 giorni
Cerio-141	141Ce	4.400,0	8%	32,5 giorni
Cerio-144	144Ce	3.920,0	8%	284 giorni
Cesio-134	134Cs	153,0	25%	2,06 anni
Cesio-137	137Cs	260,0	30%	30 anni
Curio-242	242Cm	31,0	8%	162,6 giorni
Iodio-131	131I	1.300,0	50%	8,05 giorni
Kriptone-85	85Kr	33,3	100%	10,72 ore
Molibdeno-99	99Mo	4.800,0	9%	2,75 giorni
Neptunio-239	239Np	58.070,0	8%	2,35 giorni
Plutonio-238	238Pu	0,9	8%	87,74 giorni
Plutonio-239	239Pu	0,9	8%	24.390 anni
Plutonio-240	240Pu	1,5	8%	6.537 anni
Plutonio-241	241Pu	183,5	8%	14,4 anni
Rutenio-103	103Ru	1960,0	8%	39,3 giorni
Rutenio-106	106Ru	860,0	8%	368 giorni
Stronzio-89	89Sr	2.000,0	10%	50,5 giorni
Stronzio-90	90Sr	228,0	10%	29,12 anni
Tellurio-132	132Te	540,0	35%	3,26 giorni
Xenon-133	133Xe	1.700,0	100%	5,25 giorni
Zirconio-95	95Zr	4.400,0	8%	64 giorni



- 1) Impariamo a leggere queste tabelle: la attività è direttamente proporzionale alla quantità di materiale e inversamente proporzionale al  $T_{1/2}$
- 2) Osservare il forte inquinamento in Bielorussia

## Rilascio in atmosfera: cosa rimane?



8 febbraio 2007 - Claudio Cerada

Chernobyl: nucleare insicuro o sistema sovietico?

34

- 1) Dopo la elevata pericolosità dello Iodio (c'è stata mancata somministrazione immediata di Sali di Iodio che avrebbero evitato i cancri alla tiroide) si osservi la crescita nel tempo dei due isotopi del Cesio: il 134 è già decaduto ma rimarrà a lungo il 137 con  $T_{1/2} = 20$  anni. I dati epidemiologici stanno indicando una incidenza di leucemie e tumori solidi decisamente inferiore alle attese

# Grandezze dosimetriche

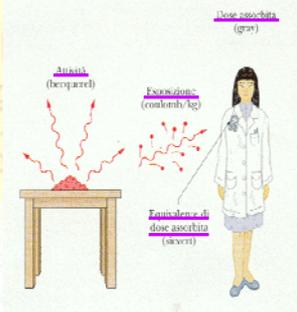
TABLE 22.4 Some Properties of Ionizing Radiation

Type of Radiation	Energy Range	Penetrating Distance in Water*
$\alpha$	3-9 MeV	0.02-0.04 mm
$\beta$	0-3 MeV	0-4 mm
X	100 eV-10 keV	0.01-1 cm
$\gamma$	10 keV-10 MeV	1-20 cm

\*Distances at which one-half of the radiation has been stopped

TABLE 22.3 Units for Measuring Radiation

Unit	Quantity Measured	Description
Becquerel (Bq)	Decay events	Amount of sample that undergoes 1 disintegration/s
Curie (Ci)	Decay events	Amount of sample that undergoes $3.7 \times 10^{10}$ disintegrations/s
Gray (Gy)	Energy absorbed per kilogram of tissue	1 Gy = 1 J/kg tissue
Rad	Energy absorbed per kilogram of tissue	1 rad = 0.01 Gy
Sievert (Sv)	Tissue damage	1 Sv = 1 J/kg
Rem	Tissue damage	1 rem = 0.01 Sv



- 1) Attività; esposizione; dose; dose equivalente: due parole sulle alfa e sui neutroni con rapporto sino a 20
- 2) Segnalare le due vecchie unità Rad e Rem pari a 1/100 di Gray e Sievert
- 3) Come mai così poca energia fa così tanto danno?

## Un po' di numeri in mSievert

2 mSv/ anno	Valore tipico
2.4 mSv/ anno	Dose media lavoratori industria nucleare negli Usa
sino a 5 mSv/ anno	Tipico incremento di dose per personale di bordo aerei
10 mSv/ anno	Dose massima per minatori uranio
20 mSv/ anno	Valore limite per lavoratori professionalmente esposti
50 mSv/ anno	Vecchio limite per lavoratori pari anche alla radioattività naturale in alcune zone d'Europa, Iran e India
100 mSv/anno	Livello di soglia per l'evidenza di cancro. Per valori superiori la probabilità e severità crescono con la dose
350 mSv/vita	Criterio per determinare spostamento di colazione a rischio
1'000 mSv/cumulativi	Incremento assoluto del 5% nel determinare la probabilità di sviluppare un cancro a distanza di anni
1'000 mSv/singola	Causa un temporaneo malessere da radiazione (nausea), diminuzione dei globuli bianchi ma non la morte. Al di sopra la severità dei sintomi cresce con la dose.
5'000 mSv/singola	Morte entro un mese nel 50% dei casi
10'000 mSv/singola	Morte entro poche settimane.

- 1) Tener presente la diversità tra dose immediata e dose distribuita;
- 2) le polemiche dei radioprotezionisti verso gli ambientalisti

## Effetti duri delle radiazioni ionizzanti

### Dose (Sv): Effetto:

< 0.25	nessuno
0.25 - 1	lievi alterazioni sangue, raddoppio rischio leucemia e anomalie genetiche
1 - 2	notevoli alterazioni sangue, nausea, emorragie intestinali, forte rischio leucemia e anomalie genetiche
2 - 3	gravi emorragie, shock, stato di prostrazione
4 - 7	morte nel 30-60% dei casi
> 8	morte nel 100% dei casi

Population category	Number	Average dose (mSv)
Liquidators (1986-1989)	600 000*	~100
Evacuees from highly-contaminated zone (1986)	116 000	33
Residents of "strict-control" zones (1986-)	270 000	>50
Residents of other "contaminated" areas (1986-)	5 000 000	10-20

\* including 240 000 who worked in 1986-87.

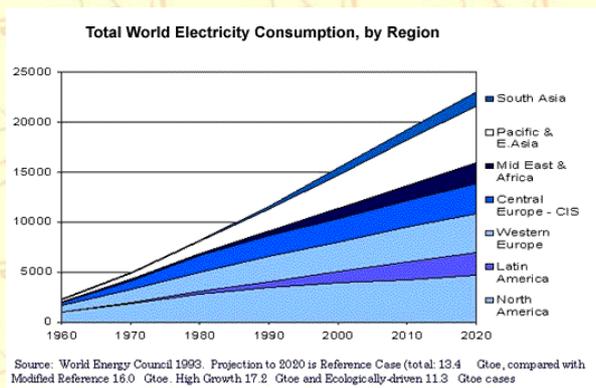
- 1) sino a 250 mSv solo effetti stocastici
- 2) sopra 250 iniziano gli effetti immediati

## Effetti radiazioni ionizzanti

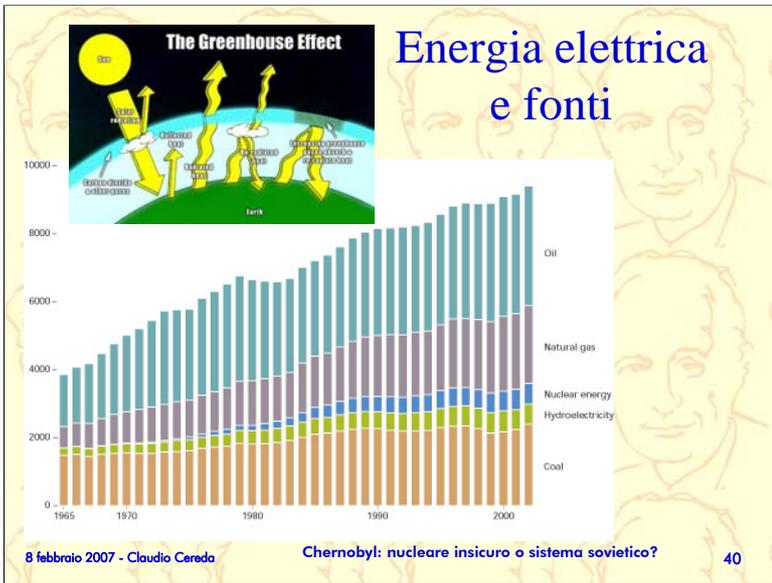
- **Danni somatici deterministici**, costituiti da alterazioni gravi degli organi e tessuti dell'individuo irradiato ( es. radiolesioni cutanee, danni al cristallino, midollo osseo, testicoli, ovaie ecc.). Sono sostanzialmente **caratterizzati da un valore di dose soglia** al di sotto della quale non si manifestano e la cui **gravità aumenta con la dose**. I valori della dose soglia per i diversi tessuti sono in genere abbastanza elevati ed è poco frequente che questo tipo di danno si riscontri nelle odierne condizioni di impiego delle radiazioni.
- **Danni somatici stocastici**, costituiti principalmente da **leucemie e tumori solidi indotti** nell'individuo irradiato. **Non presentano un valore di dose soglia** (ipotesi cautelativa assunta a livello internazionale) ed hanno una **probabilità di accadimento** (non di gravità) che è **proporzionale alla dose** ricevuta. Per l'ipotesi dell'assenza di una dose soglia anche un valore minimo di dose comporta una probabilità non nulla di danno sanitario stocastico
- **Danni genetici stocastici**, costituiti da un aumento di malattie ereditarie nelle progenie dei soggetti esposti alle radiazioni rispetto alle progenie dei soggetti non esposti. Non presentano un valore di dose soglia (ipotesi cautelativa assunta a livello internazionale) ed hanno una probabilità di accadimento (non di gravità) che è proporzionale alla dose ricevuta.

- 1) effetti deterministici ed effetti stocastici: riflettere sulla importanza della riduzione (misurabile) del rischio
- 2) Si attendono gli effetti leucemia come danni somatici stocastici tra i liquidatori

## Energia e clima: consumi per area

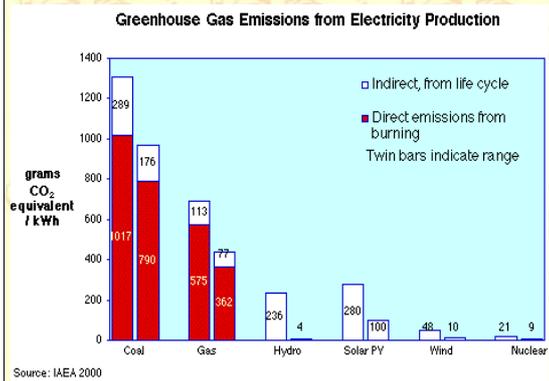


1) Osservare il trend della Cina e della America Latina



- 1) Cos'è l'effetto serra: un fenomeno naturale del quale stiamo rompendo l'equilibrio
- 2) Osservare l'andamento delle fonti pensando all'effetto serra

# E' meglio l'effetto serra?



Soffermarsi sulla incidenza per kwh delle diverse fonti

Il dubbio

della vita

è il sale

Ciao a tutti

perché gli dà senso e anche sapore

8 febbraio 2007 - Claudio Cerada

Chernobyl: nucleare insicuro o sistema sovietico?

42

Soffermarsi sulla incidenza per kwh delle diverse fonti

## SLIDE 27

1) Il reattore RBMK è diviso in due sezioni, ciascuna delle quali collegata ad un turbogeneratore. Con tale disegno è possibile fermare metà reattore con il suo turbogeneratore. Eravamo in questa condizione di fermo al 50% il 25 aprile 1986, per operazioni di normale manutenzione dell'Unità 4. Si pensò di sfruttare questo fermo per fare l'esperimento seguente: nel caso si fosse avuto un qualunque abbassamento di potenza, la turbina e l'alternatore funzionanti al minimo sarebbero stati in grado di dare potenza elettrica sufficiente per mettere in funzione i dispositivi di emergenza, le pompe per il raffreddamento dell'acqua del nocciolo, fino a che non si fossero messi in funzione i generatori diesel che avrebbero provveduto allo scopo? Il fine di questi test era il determinare se il raffreddamento del nocciolo sarebbe stato assicurato lo stesso nel caso di abbassamenti fortuiti di potenza. ... Quando si decise di mettere in pratica il test non vi fu coordinamento tra coloro che dovevano fare l'esperimento e coloro che erano incaricati degli impianti di sicurezza del reattore. Questi ultimi non erano stati avvertiti del test e del suo pericolo potenziale. Il programma dell'esperimento prevedeva la chiusura dei sistemi di raffreddamento di emergenza del nocciolo (ECCS), sistemi che avrebbero fornito l'acqua in caso di emergenza. Questa cosa non ebbe poi grande rilevanza per il succedersi degli eventi catastrofici, ma mostra a quale livello di incoscienza si operava relativamente a questioni di sicurezza.

2) In accordo con il programma dell'esperimento, circa un'ora prima che esso venisse effettuato, furono chiusi gli ECCS con il reattore che continuava ad operare a mezza potenza. Intorno alle ore 23:10 del 25 aprile il controllore della rete acconsentì ad una ulteriore riduzione di potenza. C'è inoltre da tener conto bene delle date: il 25 aprile era venerdì e l'1 e 2 maggio sono feste nazionali. Con un paio di giorni da giocare è possibile fare un ponte lungo e certamente varie persone lo hanno fatto e probabilmente quelle più elevate in grado e quindi più esperte.

3) Per realizzare il test il reattore si sarebbe dovuto stabilizzare a circa 1000 MW termici prima di fermarlo ma, a seguito di un errore procedurale (dovuto probabilmente a cattiva taratura degli strumenti), le barre di controllo scesero più del previsto e la potenza del reattore precipitò a circa 30 MW termici (ore 0.30), dove l'instabilità diventa dominante. In questo momento la turbina era a minima potenza e forniva intorno ai 10 MW elettrici, quantità insufficiente per far funzionare le pompe del sistema di refrigerazione. A questo punto si sarebbe dovuta sospendere la prova e rimettere in funzione i dispositivi di emergenza. Gli operatori confidarono però di poter elevare la potenza a 700 - 1000 MW termici chiudendo i regolatori automatici e passando tutte le barre di controllo ad operazioni manuali (per evitare i sistemi automatici che lo avrebbero impedito).

4) Solo verso l'una del 26 aprile si riuscì a stabilizzare il reattore a circa 200 MW termici e non c'era verso di aumentare questa potenza a seguito dell'avvelenamento da Xenon. Questa potenza era insufficiente per realizzare l'esperimento. Benché ci fosse una direttiva che richiedeva un minimo di 30 barre di controllo per garantire la sicurezza del reattore, per realizzare il test, si passò ai comandi manuali e furono alzate altre barre di controllo, lasciandone solo 6-8 dentro il nocciolo. Ciò significa che se ci fosse stato un innalzamento di potenza, sarebbero occorsi circa 20 secondi per abbassare tutte le barre di controllo e spegnere il reattore. Nonostante ciò si decise di continuare il test programmato e, per farlo, fu aumentato il flusso di refrigerante mettendo in funzione la pompa principale collegata alla rete elettrica principale (era l'una e 7 minuti). Tale operazione (vietata dalle normative di sicurezza) provocò una caduta della pressione del vapore e cambi in altri parametri del reattore. Il disinnesto automatico che avrebbe dovuto spegnere il reattore quando fosse scesa la pressione del vapore, risultava escluso.

5) Per aumentare la potenza gli operatori estrassero quasi tutte le barre di controllo che restavano. Il reattore diventò molto instabile e gli operatori tentarono di fare aggiustamenti ogni 5 secondi cercando di mantenere costante la potenza. All'incirca in questo momento gli operatori ridussero il flusso dell'alimentazione di acqua, presumibilmente al fine di mantenere la pressione del vapore. Simultaneamente le pompe che erano alimentate dalla turbina che andava più lenta fornivano meno acqua di raffreddamento al reattore. Si era ora nelle condizioni di fare il test, era l'una 22 minuti e mezzo. Ogni indicazione da manuale indicava che il reattore doveva essere spento immediatamente.

6) Iniziò il test. La potenza del reattore si trovava ad un 12% del valore approssimativamente necessario a portare alla massima velocità di rotazione il turbogeneratore ed eravamo in queste condizioni a seguito della caduta di pressione cui accennavo. All'una 23 minuti e 4 secondi vennero chiuse le valvole regolatrici di emergenza del turbogeneratore numero 8, con ciò scollegando la turbina dal vapore. Il piano della prova prevedeva a questo punto che quattro pompe restassero in funzione con il turbogeneratore in rallentamento. E' però difficile capire come si fosse pensata una cosa del genere.

7) Una volta iniziata la prova il turbogeneratore iniziò a decelerare. Anche il suo rendimento elettrico iniziò a scendere notevolmente. Quando il flusso di vapore cessò di arrivare alla turbina in un momento di tale

instabilità (nel medesimo tempo in cui diminuiva il flusso dell'acqua in circolo), lo stesso vapore restò nel nucleo e formò rapidamente delle bolle dentro di esso. La potenza del reattore cominciò a crescere piano piano. Le bolle di vapore non sono refrigeranti di modo che gli elementi di combustibile iniziarono a surriscaldarsi. Crebbero le bolle e con esse la temperatura del nocciolo e la pressione del vapore. Diminuiva il flusso totale dell'acqua di refrigerazione perché 4 delle 8 pompe che la facevano circolare erano, come accennato, sottoalimentate a seguito della decelerazione del turbogeneratore. Ma la diminuzione dell'acqua di raffreddamento aumentò la condizione di instabilità del reattore aumentando la produzione di vapore nei canali di raffreddamento. Quando la potenza iniziò ad aumentare visibilmente, gli operatori si resero conto che era iniziata l'emergenza. All'una 23 minuti e 40 secondi iniziarono a suonare le sirene di allarme per emergenza grave al reattore. Solo 36 secondi dall'inizio della prova ... già troppo tardi. Tutte le barre di controllo si trovavano alzate ed il segnale di allarme avrebbe dovuto farle abbassare automaticamente, anche se la lentezza, alla quale ho già accennato, nel moto di esse avrebbe potuto abbassare la potenza di un 5% al secondo. Non bastava!

8) Ci si rese in seguito conto di un grave errore nel progetto delle barre di controllo, errore probabilmente alla base della prima esplosione. Le barre di controllo di boro terminavano con cilindri di alluminio di 4, 5 metri di lunghezza, pieni di grafite incorporata. Il disegno era tale che, appena dato il comando di discesa delle barre, si aveva un aumento iniziale della reattività nella parte inferiore del nucleo del reattore per i primi 4 secondi ed in quel frangente questi 4 secondi furono probabilmente fatali. Nella situazione instabile in cui ci si trovava e considerando le elevatissime temperature che si stavano producendo, i terminali di grafite, nel discendere, fusero gli elementi di combustibile che si trovavano nella parte inferiore del nucleo, provocando la distruzione locale di ogni geometria.

9) La potenza continuò ad aumentare spettacolarmente: in soli 3 secondi era arrivata a 530 MW. Gli operatori non furono in grado di prevenire questo eccezionale aumento, stimato in 100 volte la potenza nominale di uscita nei 4 secondi successivi (01:23:44). Le barre in discesa si bloccarono a metà strada, dopo che si udirono una serie di colpi. L'operatore si rese conto che si erano bloccate a metà cammino e tolse la corrente al servomeccanismo, in modo che le barre potessero cadere per gravità. Niente. Il disegno sbagliato, la forte pressione e l'elevatissima temperatura avevano distrutto i canali nei quali scivolavano le barre. La reazione a catena andava avanti senza essere moderata o refrigerata con la conseguenza che la temperatura del nucleo e la pressione del vapore continuavano ad aumentare insieme alla distruzione di ogni geometria fondamentale per i controlli.

## SLIDE 28

1) Una ricostruzione al computer dell'incidente dice che a questo punto gli elementi di combustibile si andavano rompendo provocando un aumento rapido della pressione del vapore nei canali che contenevano il combustibile stesso con la conseguente distruzione dei medesimi. A questo punto l'acqua di refrigerazione non aveva più dove circolare liberamente ma solo attraverso pezzi di combustibile rotti e surriscaldati. Piccole parti di combustibile ad alta temperatura, reagendo con l'acqua, provocarono una potente esplosione del vapore che distrusse il nocciolo della centrale. Era l'una e 24, 20 secondi dopo l'inizio dell'emergenza.

L'esplosione danneggiò il tetto e fece sollevare il coperchio monoblocco di acciaio della centrale, del peso di circa 2000 tonnellate.

2) Per maggiore disgrazia, nel ricadere, questo coperchio si adagiò di fianco incastrandosi tra le opere murarie e nei suoi violenti spostamenti strappò cavi e varie tubature provocando svariati danni, ormai a catena.

3) Passarono solo 2 o 3 secondi e seguì una seconda esplosione, molto più violenta. Questa volta era l'idrogeno il responsabile, idrogeno prodotto dalla reazione ad alta temperatura tra vapore e zirconio (il materiale che faceva da camicia ai tubi che contenevano le barre) e tra vapore e grafite incandescente (che produce idrogeno ed ossigeno). Tale idrogeno si era probabilmente accumulato localmente negli spazi del nocciolo liberi o liberati. Testimoni all'esterno della centrale hanno visto scagliati all'aria pezzi in fiamme che, nel ricadere, estendevano l'incendio al corpo della centrale stessa.

4) Circa il 25% dei blocchi di grafite fu sparato all'aria in fiamme. Furono scagliati lontano anche pezzi di elementi di combustibile, parti del nocciolo e delle strutture portanti. Le spaccature nel tetto fecero da effetto camino con l'estensione ulteriore dell'incendio. Questo fu l'inizio della catastrofe. Il pennacchio di fumi, contenenti isotopi radioattivi, si alzò per oltre un chilometro sopra la centrale. I componenti pesanti di questi fumi ricaddero più o meno nelle vicinanze della centrale, ma i componenti leggeri, i gas, iniziarono la loro marcia per l'Europa iniziando dal Nord-Est della centrale, dove i venti prevalenti spingevano.

5) Sparito il refrigerante, sparito ogni controllo, finita la geometria del reattore, in qualche parte proseguiva la reazione a catena perché vi era Uranio 235 ed un moderatore (grafite) ancora efficienti. Saliva la temperatura ed il nocciolo stava fondendo in una massa unica nella quale proseguiva e sarebbe proseguita per molto tempo la reazione a catena. Il nocciolo intanto penetrava nel suolo per oltre 4 metri. Ormai c'era solo da tentare qualche operazione che alleviasse il completo disastro.

6) Oltre cento incendi erano scoppiati nelle adiacenze della centrale. Occorreva fermarli, spegnere la grafite. Non si dimentichi che, a lato dell'Unità 4 vi erano altri 3 reattori funzionanti e che una estensione del disastro sarebbe stata un'apocalisse. Inoltre tutti sapevano che non si aveva a che fare con semplici esplosioni di natura chimica: ora ad esse si sarebbe accompagnata una radioattività incontrollabile e disastrosa. Negli elementi di combustibile dei 4 reattori vi erano oltre 3000 Kg di plutonio e 700 tonnellate di Uranio ed una infinita di isotopi radioattivi ottenuti come prodotti di fissione delle successive reazioni nucleari. Nessuno sapeva bene come impedire o arginare la catastrofe.

7) Centinaia di pompieri intervenuti dalla vicina Pripyat si sacrificarono, essendo esposti per primi ad enormi dosi di radioattività, per tentare lo spegnimento degli incendi (tra l'altro questi uomini intervennero con attrezzature del tutto inadeguate: non avevano vestiti speciali che li coprissero completamente, non avevano maschere con filtri efficienti, non avevano dosimetri adeguati, ...). Ci vollero una ventina di giorni per venire a capo di tutti gli incendi. Ma già a partire dal decimo giorno le emissioni radioattive erano diminuite di molto dopo che si era riusciti a spegnere la grafite (l'incendio della quale pone particolarissimi problemi), il cui fuoco era il maggior responsabile del lancio di radionuclidi in atmosfera. E' stato calcolato che nelle primissime ore le esplosioni hanno lanciato nell'atmosfera 20 milioni di curie di materiali radioattivi e quasi la stessa quantità di gas radioattivi

## SLIDE 29

- 1) Il nocciolo di questo tipo di reattore è instabile sotto i 700 MWt (poco meno del 25% della potenza nominale). In breve, a bassa potenza, ogni tendenza all'incremento viene amplificata rapidamente ed automaticamente : il reattore diviene difficilmente controllabile. L'esplosione di Chernobyl è avvenuta, precisamente, nel corso di una prova a bassa potenza, ossia in un contesto di instabilità in quel reattore. Gli ingegneri russi conoscevano questa instabilità e così gli esperti francesi e britannici. Immaginatevi un autobus che rischia di uscir di strada in montagna con un volante che non risponde più!!
- 2) L'inserimento completo delle barre di controllo del RBMK è lento: richiede una ventina di secondi (< 2 secondi in tutti gli altri reattori del mondo, eccetto i RBMK) e ciò è troppo lento per impedire l'incremento di potenza del nocciolo allorché stia funzionando nella sua regione di instabilità. Le barre di arresto di emergenza ad inserimento rapido non esistono nei reattori RBMK. Immaginatevi che i freni dell'autobus non forniscano tutta la loro potenza che 20 secondi dopo il "colpo sui pedali dell'autista"!!
- 3) Le barre di controllo, costituite di carburo di boro, hanno all'estremità una punta in carbonio che, nella fase iniziale di inserzione delle barre inizia ad aggiungere reattività... invece di diminuirla! Come se la prima risposta al "colpo sui pedali dell'autista" fosse un'accelerata del motore dell'autobus a piena potenza per qualche secondo!! Questo fenomeno pericoloso era già stato riscontrato nel 1983 su un reattore RBMK della centrale di Ignalina.
- 4) La funzione di moderatore - rallentamento dei neutroni - è assicurata da 600 tonnellate di grafite. Qui non si tratta proprio di un errore di concezione ma piuttosto di una debolezza : la grafite molto calda si infiamma all'aria libera, l'incendio vaporizza i radionuclidi contenuti nel reattore : la loro dispersione nell'atmosfera viene quindi fortemente favorita.
- 5) I reattori RBMK non posseggono né dispositivi di purificazione delle emissioni gassose né edificio di contenimento : un simile edificio avrebbe almeno, nel peggiore dei casi, diminuito notevolmente e rallentato la fuoriuscita di radioattività nell'ambiente. Privo di questo contenimento, il reattore RBMK è come un autobus senza carrozzeria : queste evidentemente è una protezione maggiore, indispensabile.

## SLIDE 30

1) 6 errori e colpe umane sono stati identificati

2) 2 violazioni di consegne permanenti (funzionamento prolungato a meno di 700 MWth, meno di 30 barre di controllo inserite nel nocciolo) ;

3) 1 mancato rispetto delle procedure di prova ;

4) 3 messe in fuori servizio volontarie di dispositivi di sicurezza (lo spruzzamento di sicurezza e, successivamente, 2 dispositivi di arresto di urgenza).

5) Evidentemente il personale, insufficientemente addestrato, non aveva la percezione della pericolosità delle sue azioni. Se si fosse evitato uno solo di questi 6 errori l'esplosione non sarebbe successa. Sarebbe comunque troppo facile addebitare agli operatori la responsabilità della catastrofe : hanno fatto il loro lavoro, forniti della sola formazione che era stata loro data ; e questa era insufficiente ed incongruente con la mancanza di sicurezze passive dell'installazione. L'ignoranza della neutronica del nocciolo RBMK impediva loro di comprendere le conseguenze delle decisioni che prendevano : inoltre il reattore era nel corso di una prova a bassa potenza, secondo un programma che prevedeva delle deroghe significative alle regole permanenti di esercizio.

Circa le consegne di esercizio - sia le consegne permanenti che quelle specifiche della prova da eseguire - erano incomplete ed imprecise.

L'esame dettagliato di cosa è avvenuto nelle ore e nei minuti precedenti all'esplosione mostra che essa non poteva non avvenire. E se si considera che il concetto di incidente è associato a quelli di alea ed incertezza - cioè probabilità - allora l'esplosione del reattore di Chernobyl non è un incidente.

6) la preparazione teorico-pratica e l'addestramento eseguito "entro i limiti di un algoritmo di controllo primitivo", come rilevato da Medvedev (Ingegnere nucleare, Vicedirettore della sezione Costruzione centrali nucleari del Ministero dell'Energia dell'URSS),

7) il "comportamento irresponsabile" di tutta la linea di comando a cominciare dal capo centrale,

8) la distrazione degli operatori che giocavano a carte e a domino (uno dei motivi della condanna),

9) la perdita completa da parte del personale del "senso del rischio sanitario"

## SLIDE 31

1) In piena guerra fredda - che minacciava a volte di divenire calda - la funzione militare del RMBK forniva alla concezione, alla costruzione ed all'esercizio di reattori di questa filiera un carattere d'urgenza che non concedeva le "perdite di tempo" che avrebbero comportato i perfezionamenti assolutamente necessari alla sicurezza di questi reattori. L'obiettivo a cui erano sottomessi gli ingegneri e gli scienziati era uno solo : produrre plutonio militare quanto più possibile, quanto prima possibile. I problemi di bilancio avevano la stessa natura : non si volevano ridurre le spese ma semplicemente, con i fondi a disposizione, produrre il più rapidamente possibile la massima quantità del miglior  $^{239}\text{Pu}$  di grado militare. È per questo che il 2 maggio 1986 (6 giorni dopo l'esplosione) il Ministro dell'Elettrificazione dichiarava ad una riunione del Politburo: "Nonostante l'incidente, il gruppo di costruzione adempie ad i suoi obblighi socialisti e si lancerà presto nella costruzione del reattore n°5".

2) La cultura del segreto era universale nell'URSS. Essa imponeva la segregazione delle conoscenze : nessuno poteva detenerne la totalità ed integrare tutti gli aspetti della sicurezza di esercizio. In materia di nucleare civile questa cultura sovietica del segreto perdurerà fino al 1989.

3) Alcuni scienziati conducevano un discorso rigorosamente onesto; altri, ugualmente competenti e riconosciuti tali ma mossi più da interesse personale che da desiderio di obiettività scientifica, non avevano il coraggio del rigore ed accettavano dal potere politico, a volte persino incoraggiavano, alcune decisioni insensate o pericolose. Ai dibattiti di idee scientifiche, tecniche e tecnologiche si sostituivano le lotte di potere.

I difetti di concezione del reattore non erano dovuti ad incompetenza degli ingegneri : erano il risultato della dittatura burocratica che presiedeva a tutte le decisioni nel sistema sovietico, compreso il campo della sicurezza.

4) Conclusione: L'esplosione di Chernobyl e i danni sanitari che ne sono conseguiti sono stati resi possibili da un sistema politico che coltivava la segretezza e che non aveva ritenuto utile dare priorità allo sviluppo di una cultura di sicurezza adatta all'esercizio dei reattori nucleari. In questo, l'accaduto è innanzitutto sovietico. Questa grave mancanza di cultura della sicurezza si è manifestata a tre livelli: quello della progettazione, quello dell'esercizio e quello dei piani di emergenza dopo un incidente grave. Uno dei tanti aspetti cui si cercò di far fronte con la perestroika e la glasnost. Avete visto Gorbaciov di recente da Fazio parlare di Eltzin come di colui che ha dato in pasto la Russia alla mafia?

5) l'irresponsabilità degli enti di stato (progettazione, esercizio e controllo che non hanno esaminato il programma della prova loro inviata dal direttore della centrale)

6) l'affidamento della responsabilità della sicurezza e analogamente l'affidamento dell'incarico di direttore degli enti preposti alla progettazione e all'esercizio delle centrali nucleari, quello di direttore e quello di capo della centrale di Chernobyl non ad ingegneri nucleari, ma a ingegneri esperti in centrali idroelettriche, o termoelettriche (che avevano ricevuto questi incarichi o promozioni "politiche" per ragioni di merito nei confronti del partito).

7) la supervisione dell'esperimento affidata ad un tecnico non esperto, ma "mandato da Mosca", (la sentenza di condanna parla peraltro di esperimento non autorizzato): scappa da ridere

## SLIDE 32

1) Gli effetti biologici e sanitari dell'incidente di Chernobyl possono essere rilevati soprattutto in popolazioni di repubbliche dell'ex URSS (consistenti parti della Bielorussia, alcune zone dell'Ucraina e della Federazione Russa). Gli effetti sanitari dell'incidente di Chernobyl possono essere suddivisi in: (a) effetti radioindotti acuti (deterministici); (b) effetti radioindotti tardivi di tipo probabilistico (stocastici); (c) altri effetti non imputabili alle radiazioni ionizzanti (ma collegati all'incidente) o la cui natura radioindotta è dubbia o contestata.

2) Effetti acuti si sono verificati all'interno del gruppo noto come "liquidatori", il cui numero stimato, secondo le fonti nazionali, è di circa 800.000 persone, appartenenti però a diverse categorie. I dati presentati dalle autorità ed accettati dall'UNSCEAR riportano: 499 sintomatici, 237 ricoverati, 28 deceduti per sindrome acuta da radiazioni nelle prime settimane, 19 deceduti nel 1987-1996. L'ipotesi che queste cifre non esauriscano il quadro degli effetti acuti verificatisi in questa popolazione può essere avanzata. Alcune stime sono disponibili sulle dosi a cui sono state esposti i "liquidatori": si ritiene che il 45% abbia ricevuto dosi inferiori a 100 mSv, per il 47% tra 100 e 250 mSv, per l'8% tra 250 e 500 mSv ed alcune centinaia di dosi superiori a 500 mSv.

3) Il principale effetto tardivo che ci si poteva attendere a fronte dell'esposizione a radiazioni ionizzanti a seguito del rilascio è l'aumento dell'induzione di alcuni tipi di tumori. Diversi studi sono stati condotti allo scopo di individuare queste patologie in alcuni dei gruppi evacuati (per un totale di circa 130.000 persone, di cui 49.000 dalla città di Prypiat) dalla zona circostante la centrale (circa 30 km di raggio) e di quelli che hanno continuato a vivere in zone (soprattutto rurali) abbastanza contaminate (numero minimo riportato: 270.000).

4) Si valuta che la popolazione che è stata evacuata abbia ricevuto dosi variabili tra 30 e 500 mSv con un valore medio di circa 120 mSv. Nel caso degli individui (non evacuati) abitanti zone ad alta contaminazione ( $>555$  kBq/m<sup>2</sup>), le dosi medie dovute al cesio (soprattutto <sup>137</sup>Cs) risultano di 40 mSv (con una distribuzione da 5 a 250 mSv), tenendo conto delle contromisure a carattere alimentare.

5) Un incremento statisticamente significativo dell'incidenza di carcinoma della tiroide è stato osservato. Non sono stati invece verificati aumenti significativi di leucemia o di altri tumori radioinducibili.

6) Il problema di verificare l'eventuale insorgere di effetti tardivi avrebbe potuto certo essere affrontato nel gruppo dei "liquidatori". E' possibile che in futuro informazioni più precise emergano a tal proposito; gli effetti attesi in questo gruppo, sulla base delle dosi stimate, sono dell'ordine di grandezza di 1 decina di migliaia di tumori con esito letale. Inoltre, nell'ambito della costruzione di registri epidemiologici, alcuni dati sono stati forniti per circa 300.000 "liquidatori", per i quali è stata riportata una tendenza all'aumento dell'incidenza dei tumori maligni, un eccesso di morbilità per alcune patologie (sistema endocrino, sangue e sistema emopoietico, sistema circolatorio, sistema digestivo, disordini psichiatrici), ma non un eccesso di mortalità (nel 1990 e 1991). Nel caso poi di 99.000 di questi "liquidatori", per cui erano disponibili dati dosimetrici documentati, è stato riportato un aumento dipendente linearmente dalla dose, dei valori di rischio relativo per tumori maligni ed alcune malattie. Queste osservazioni non sono considerate come conclusive e non risolvono il problema della natura radioindotta o meno di queste patologie o di alcune di esse.

7) Gli effetti attesi sia per la popolazione evacuata (130.000), sia per la popolazione residente in zone ad alta contaminazione (270.000), sono dell'ordine di grandezza di alcune migliaia di tumori con esito letale. Le stime di dose collettive sopra riportate e le conoscenze sui coefficienti di rischio forniscono un ulteriore dato di tipo previsionale (possibilmente sovrastimato ed ottenuto sulla base di modelli di rischio probabilistico): l'emergere, per la popolazione dell'ex URSS, nel corso di un periodo standard di vita, di al massimo 2 decine di migliaia di casi di tumori letali in eccesso rispetto a quelli dovuti a cause "naturali" (o comunque diverse dalle radiazioni ionizzanti dovute all'incidente); essendo questi ultimi casi circa 35 milioni, si tratta di un eccesso di circa lo 0.05%.

8) Per una serie di altri fenomeni patologici (aberrazioni cromosomiche fetali, difetti congeniti, esiti della gravidanza, aborti spontanei, sindrome di Down, tumori indotti in utero), sono stati ottenuti risultati non confermati o che non hanno messo in evidenza differenze statisticamente significative.

9) Un incremento della frequenza di aberrazioni cromosomiche in cellule somatiche è stato osservato in molti studi, anche se non in tutti, concernenti campioni provenienti da paesi dell'ex-URSS e di alcuni paesi europei. E' da tener presente che certi tipi di danno cromosomico sono sicuramente radioindotti ma non comportano necessariamente, per certe frequenze di aberrazioni (a dosi relativamente basse), modificazioni apprezzabili delle condizioni di salute.

10) Sono stati riportati effetti quali stress, stati ansiosi, disturbi neurovegetativi, disturbi comportamentali, nevrosi, ecc., ed anche "distonia vegetativa". Gli studiosi di alcune delle repubbliche hanno denunciato fenomeni di carattere più generale e di rilevanza demografica, come un aumento della mortalità in concomitanza con un decremento della natalità. Fenomeni di questo tipo non possono essere attribuiti ad un effetto diretto delle radiazioni ionizzanti. Il problema si pone comunque se tali fenomeni debbano essere

considerati delle conseguenze psicosociali della catastrofe. E' da tenere peraltro presente che nelle stesse regioni si sono verificati gli effetti di un cambiamento epocale nell'organizzazione dello stato, con associata una grave crisi economico-organizzativa.

11) An authoritative multi-agency study published in 2005 quantified the effects. Overall some 56 people were killed or have subsequently died, including the 9 children from thyroid cancer - which could have been avoided. Among some 200,000 workers exposed in the first year, 2200 radiation-related deaths can be expected. On the basis of statistical dose-effect models, a total of the order of 4000 eventual deaths from the accident are possible, though most scientists involved were reported to oppose publication of such a specific estimate.

12)The 600-page report says that people in the area have suffered a paralysing fatalism due to myths and misperceptions about the threat of radiation, which has contributed to a culture of chronic dependency. Some "took on the role of invalids." Mental health coupled with smoking and alcohol abuse is a very much greater problem than radiation, but worst of all at the time was the underlying level of health and nutrition. Apart from the initial 116,000, relocations of people were very traumatic and did little to reduce radiation exposure, which was low anyway. Psycho-social effects among those affected by the accident are similar to those arising from other major disasters such as earthquakes, floods and fires.

13)The 2005 Chernobyl Forum study involved over 100 scientists from eight specialist UN agencies and the governments of Ukraine, Belarus and Russia. Its conclusions are in line with earlier expert studies, notably the UNSCEAR\* 2000 Report which said that "apart from this [thyroid cancer] increase, there is no evidence of a major public health impact attributable to radiation exposure 14 years after the accident. There is no scientific evidence of increases in overall cancer incidence or mortality or in non-malignant disorders that could be related to radiation exposure." As yet there is little evidence of any increase in leukaemia, even among clean-up workers where it might be most expected. However, these workers remain at increased risk of cancer in the long term.