

**Three Mile Island (1979), Chernobyl (1986),
Fukushima (2011).
Una riflessione sull'energia nucleare**

**INFN, Laboratori Nazionali di Frascati,
20 aprile 2011**

INDICE

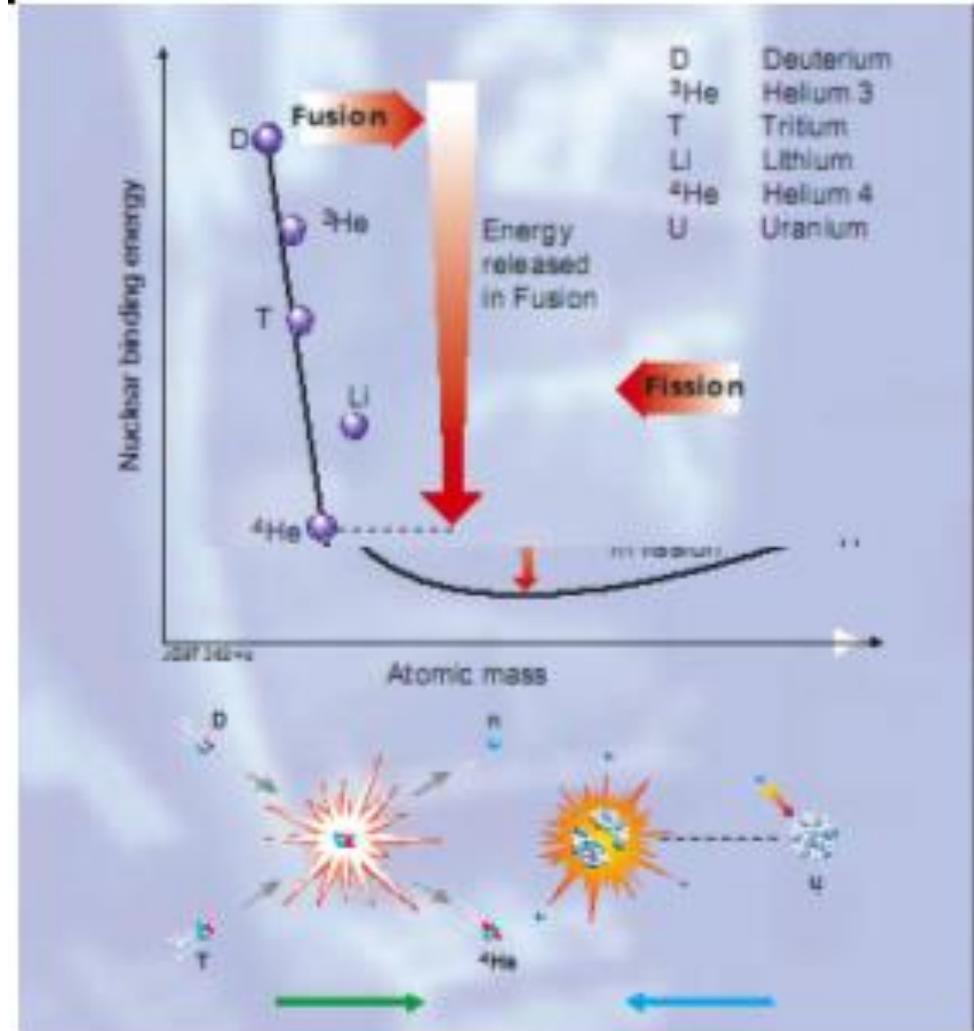
- **I. Elementi di base dell'Energia Nucleare**
- **II. Three Mile Island 2 NPP Accident (Ines 5)**
- **III. Chernobyl 4 NPP Accident (Ines 7)**
- **IV. Fukushima Daiichi NPP Accident (Ines 7, provv.)**
- **V. Considerazioni finali sull'Energia Nucleare**

I. Elementi di base dell'Energia Nucleare

Energia ricavabile dalla Combustione vs Fissione e Difetto di massa – $E = m c^2$

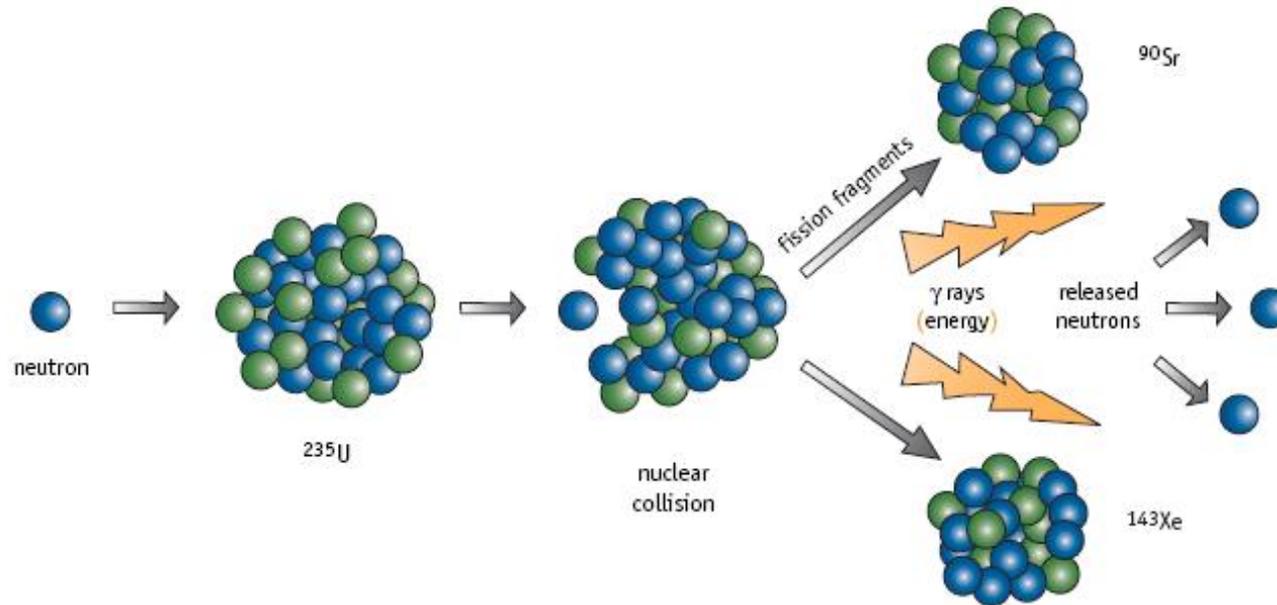
Contenuto in energia di vari combustibili

Combustibile	Contenuto in energia (Gj in 1 tonn)
Legno	14
Carbone	29
Petrolio	42
Gas (liquefatto)	46
Uranio (LWR, once-through)	630'000

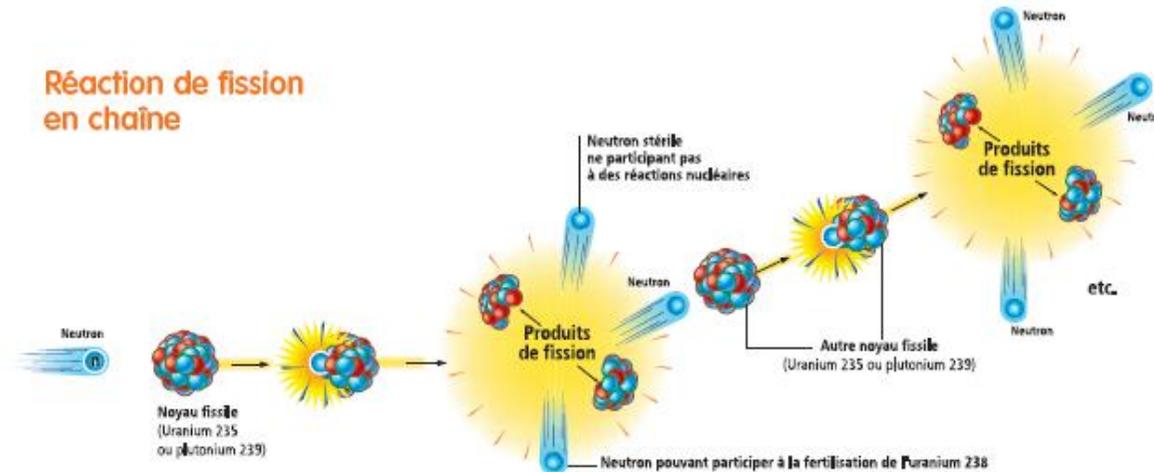


La fissione dell'Uranio 235

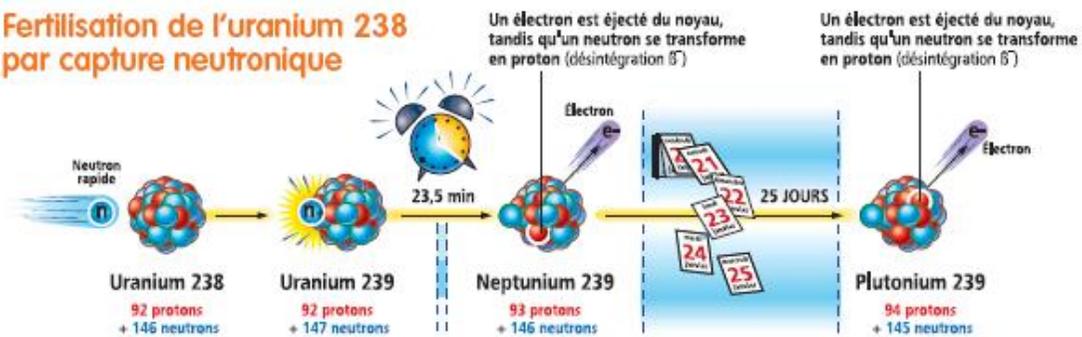
Figure 2.1: A typical fission reaction



Interazione col neutrone - Uranio 235: Fissione Uranio 238: Cattura e trasformazione in Plutonio



Fertilisation de l'uranium 238 par capture neutronique

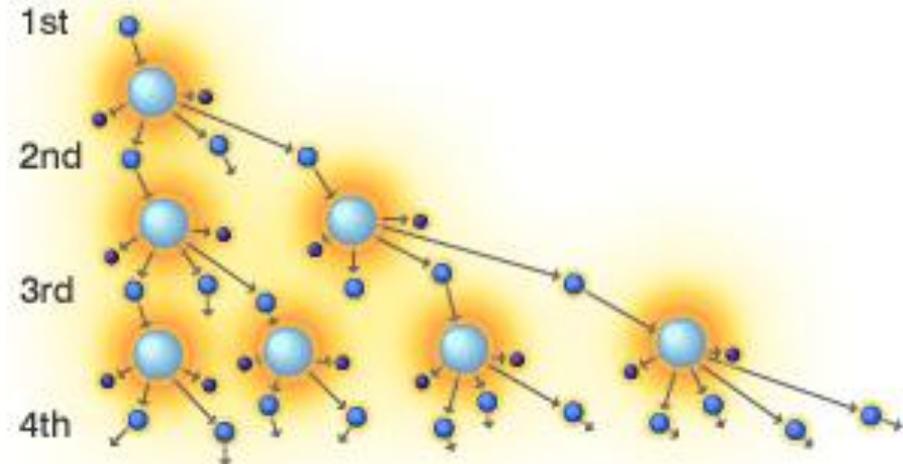


La reazione a catena

- U 235 e Pu239 sono elementi fissili (con neutroni termici) : **reattori termici**
- U238 è fertile (con neutroni termici) e subisce fissione con neutroni veloci: **reattori veloci**
- $U_{\text{nat}} = 99,3 \% \text{ U238}$ e $0,7 \% \text{ U 235}$

Fission chain reaction

Generations

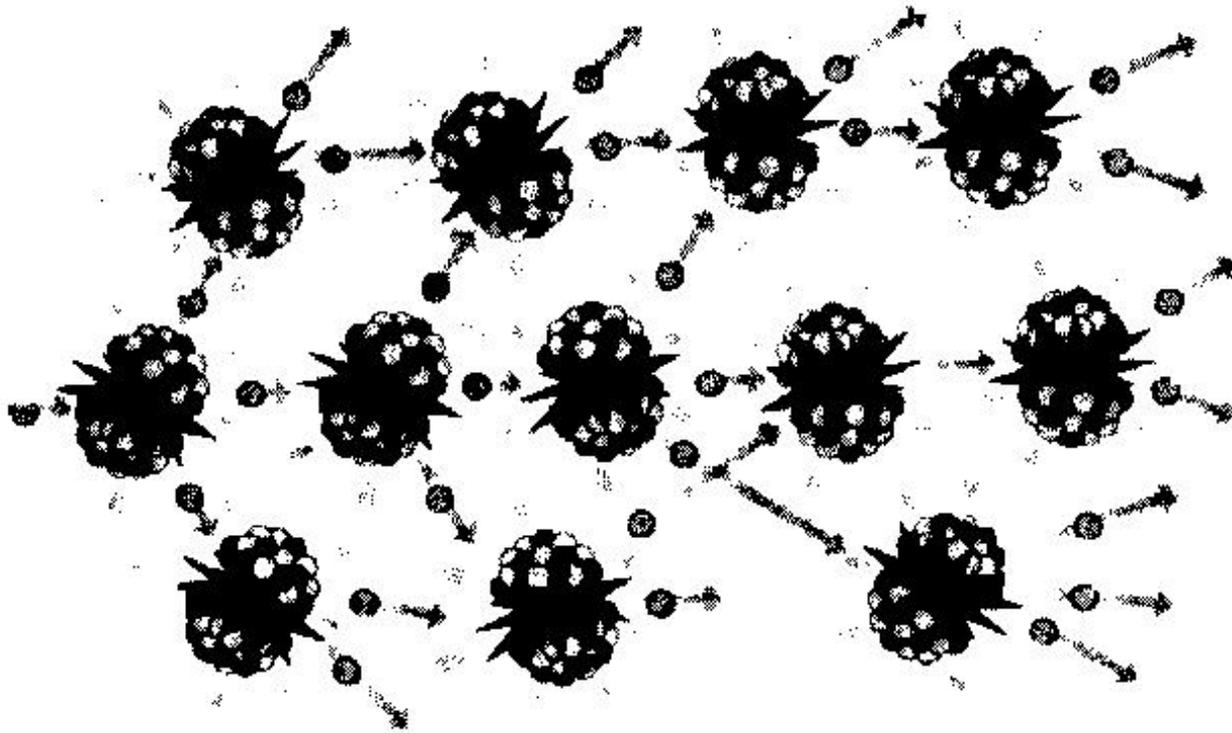


● Neutron

● Uranium-235 atom

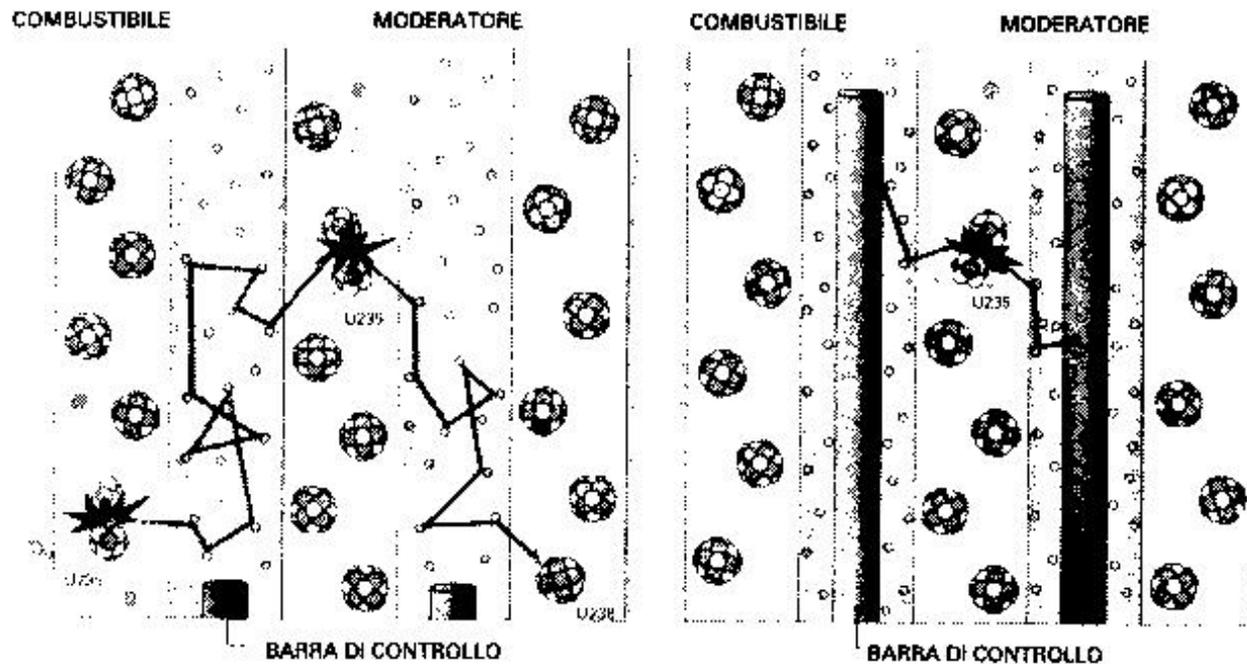
● Fission fragment e.g. Kr, Cs, Rb, Ba, Xe or Sr

La reazione a catena divergente:
bomba atomica (arricchimento $U^{235} > 90\%$)



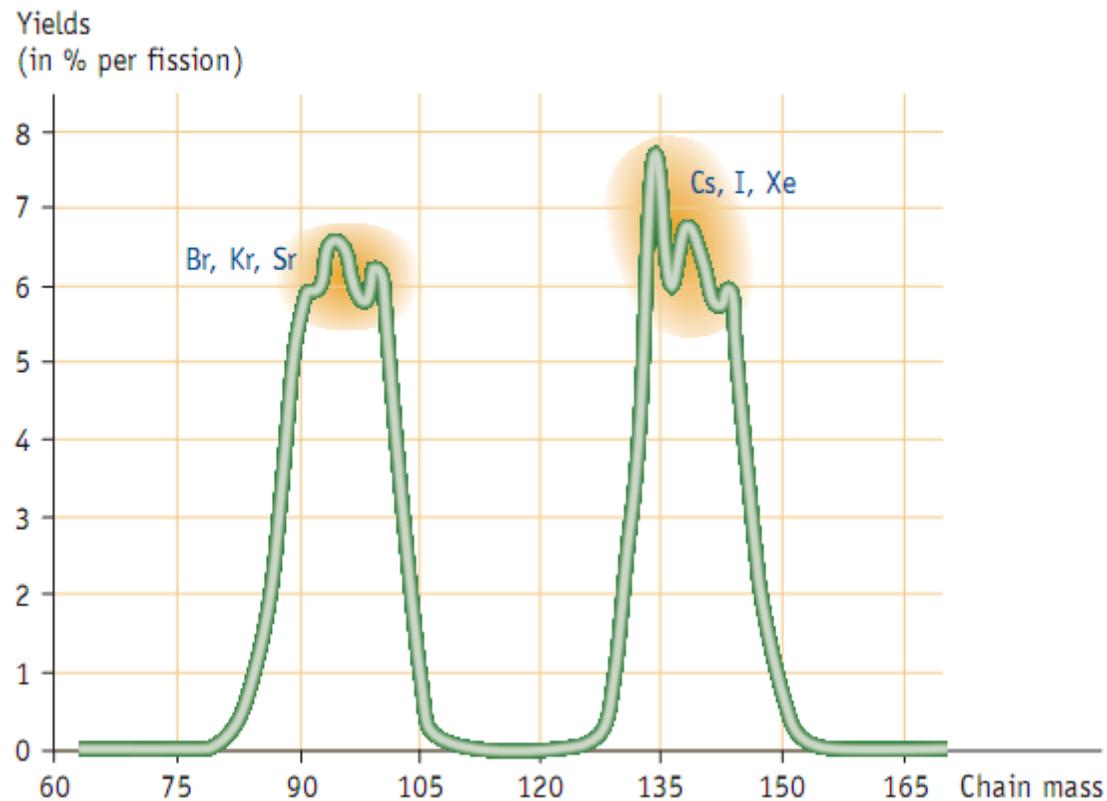
La reazione a catena controllata: il reattore (arricchimento U^{235} 2,5 - 5%)

Con questo arricchimento il reattore non può mai esplodere come una bomba



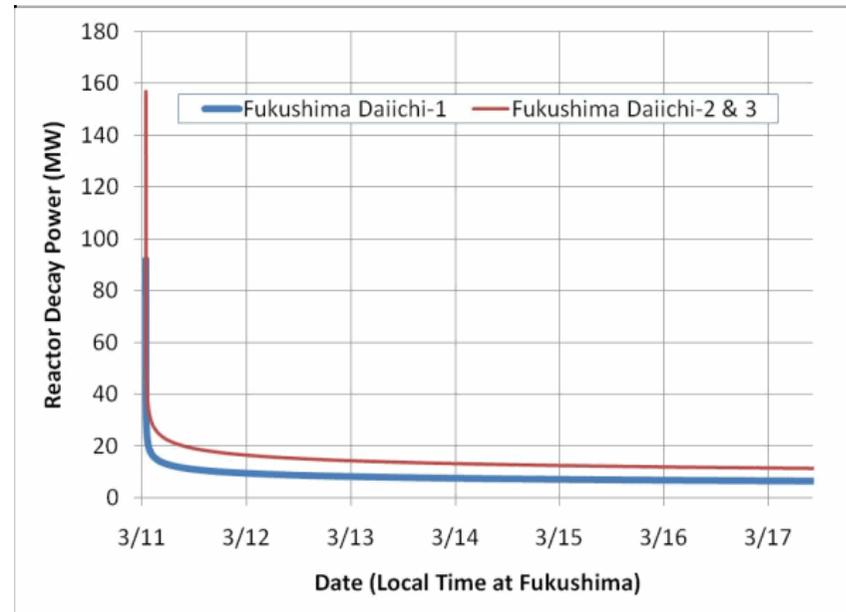
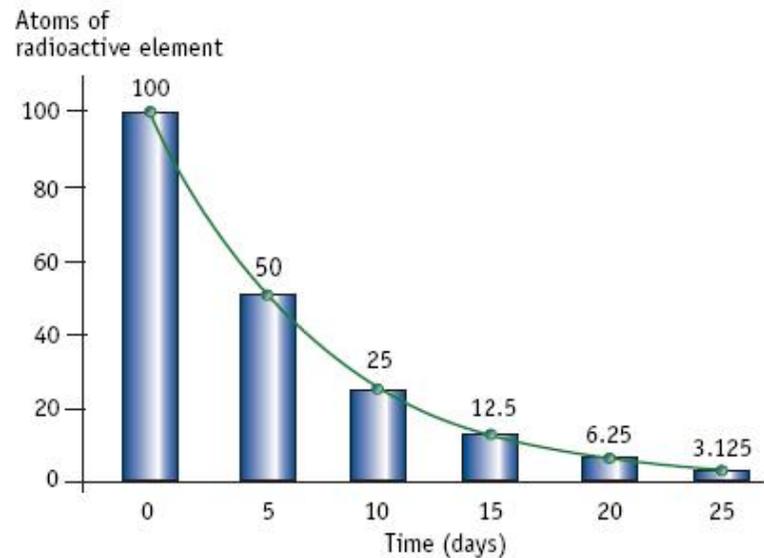
I prodotti di fissione

Figure 2.2: Fission product yield for thermal fission of ^{235}U



I p.d.f. non sono stabili e decadono emettendo radiazioni pericolose, energia che si trasforma in calore

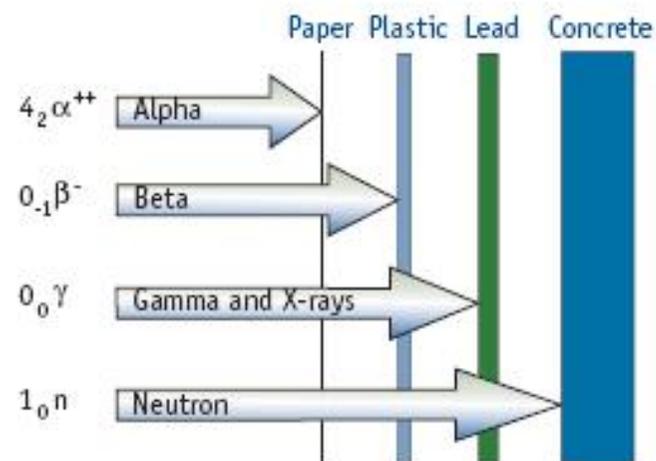
Figure 4.1: Decay of a radioactive element with a half-life of five days



L'uomo vive in un ambiente pervaso da radiazioni. Da quelle pericolose ci si protegge con adeguati schermi



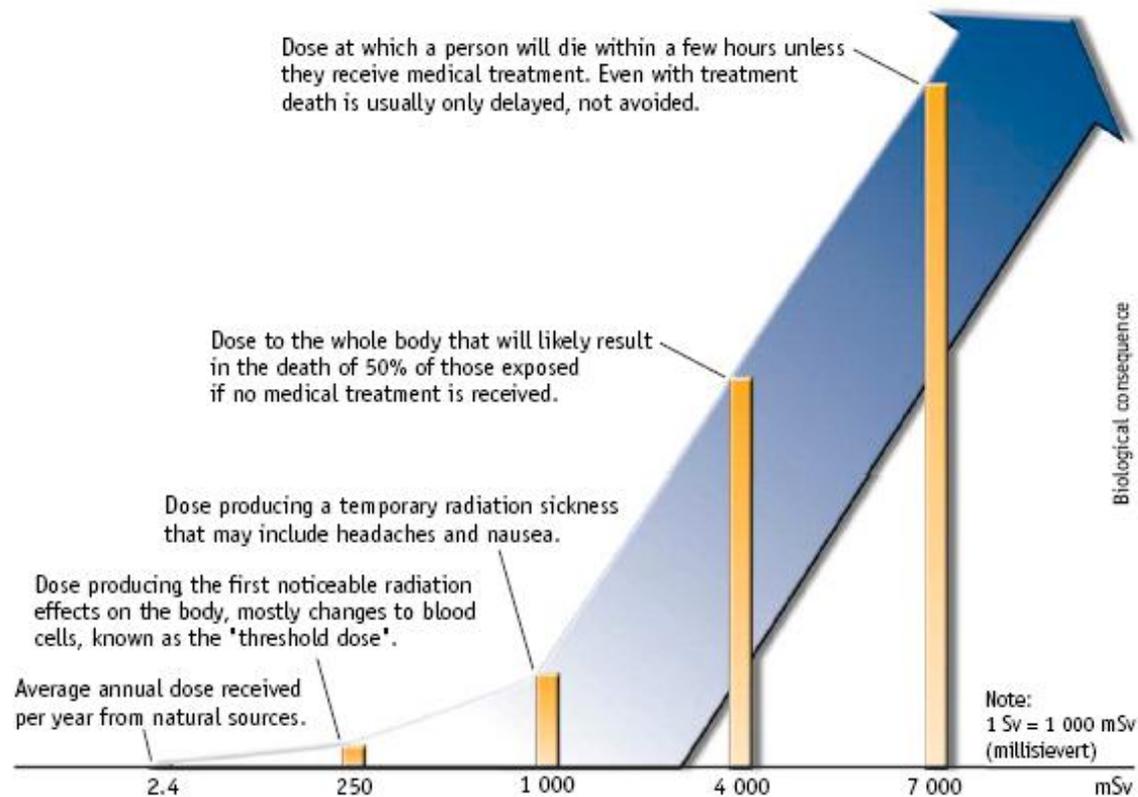
Figure 6.1: Penetrating distances for different radiation types



Source: University of Michigan, United States.

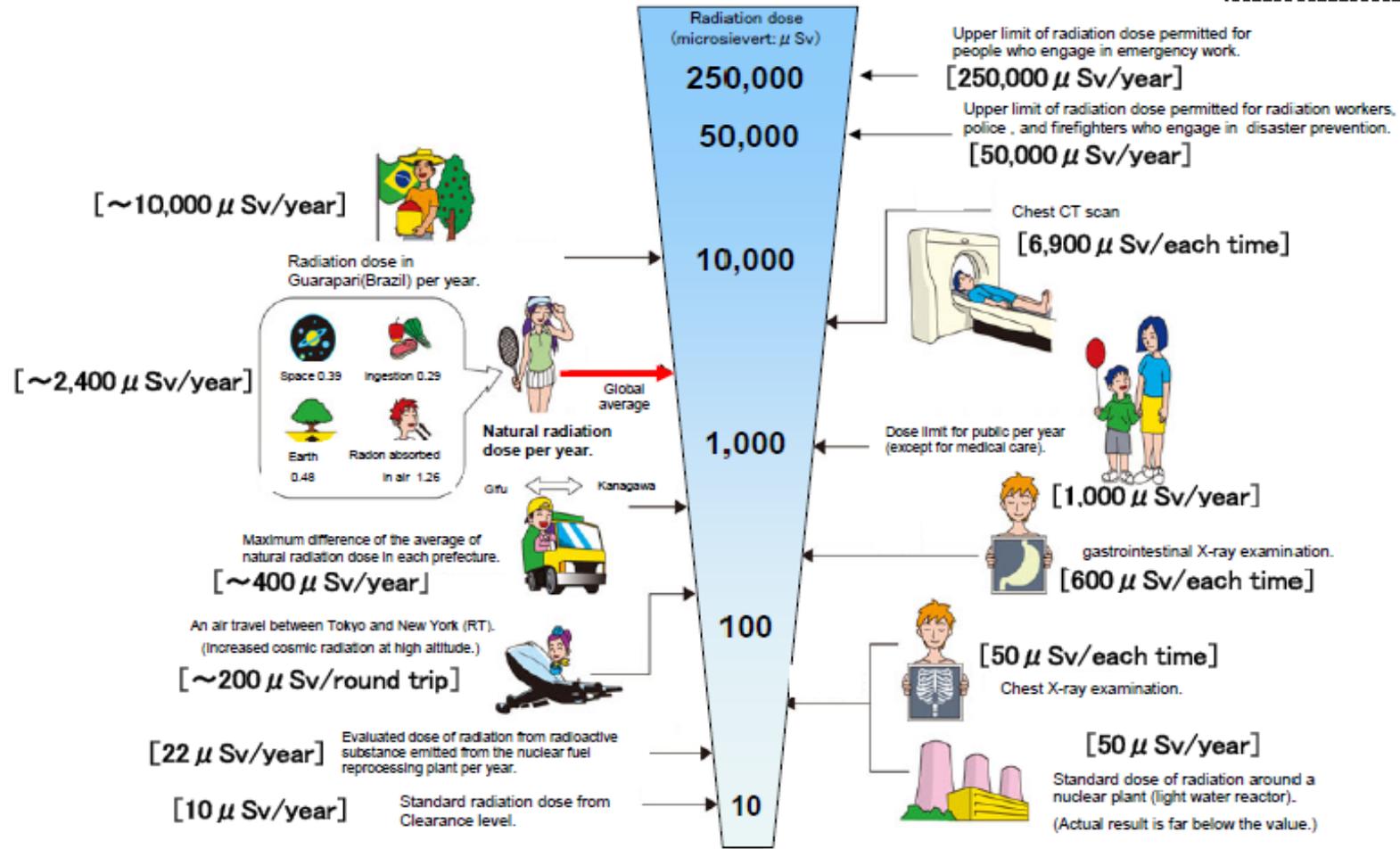
Le radiazioni hanno effetto sulla biosfera solo sopra una certa soglia

Figure 6.4: Deterministic effects of radiation at high doses



Radiation in Daily-life

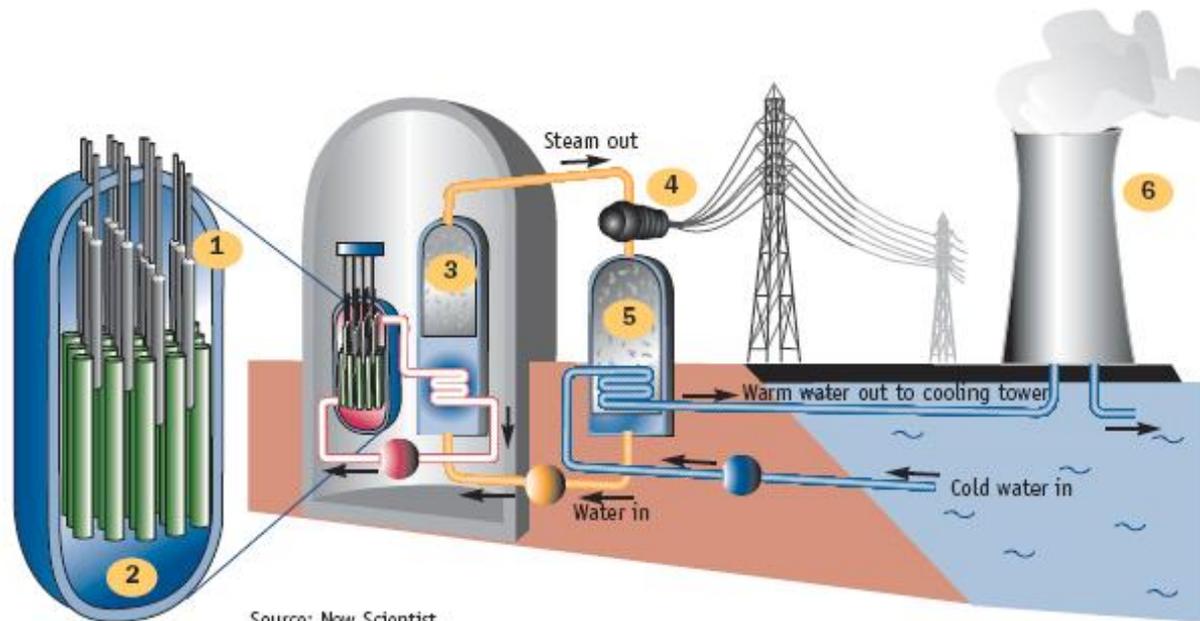
※Unit : μSv



(Ref) Average dose rate at the monitoring post of Tokyo (3/17 9:00~3/18 9:00, March) : $0.050 \mu\text{Sv/h} = 438 \mu\text{Sv/y}$

Schema di un impianto nucleare

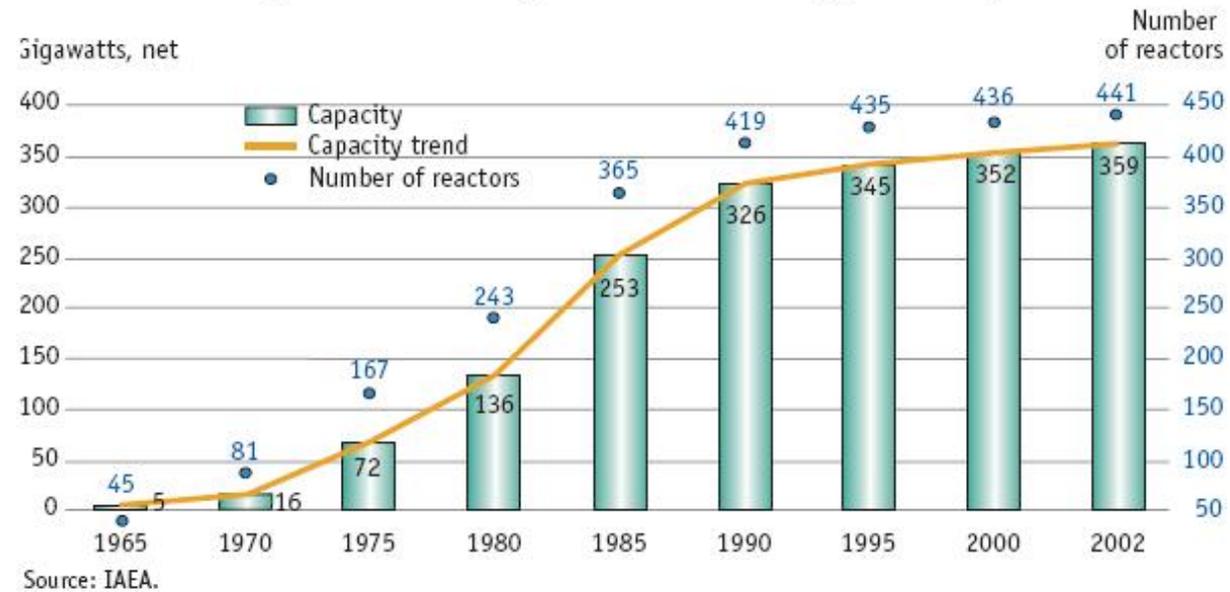
Figure 2.3: Basic components of a nuclear reactor (pressurised)



- 1 - Reactor: fuel (green) heats pressurised water. Control rods (grey) absorb neutrons to control or terminate fission.
- 2 - Coolant and moderator: fuel and control rods are surrounded by water that serves as coolant and moderator.
- 3 - Steam generator: hot water from the reactor is pumped through a heat exchanger to generate high-pressure steam.
- 4 - Turbine generator: steam drives electricity generator to produce electricity.
- 5 - Condenser: removes heat to convert steam back to water.
- 6 - Cooling tower: removes heat to return cooling water to near-ambient temperature.

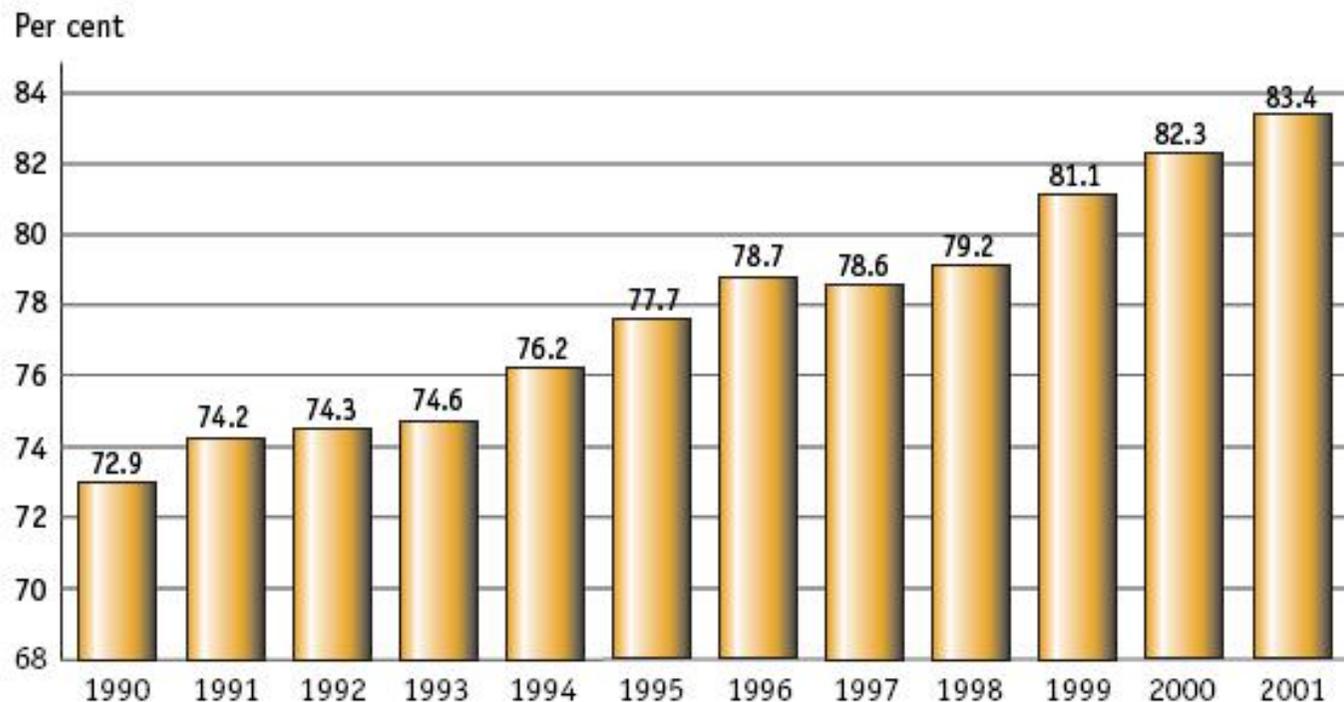
L'euforia – un rapido sviluppo

Figure 1.1: Historical growth of nuclear energy (1965-2002)



Rallenta la crescita, ma i reattori in operazione migliorano costantemente le loro prestazioni

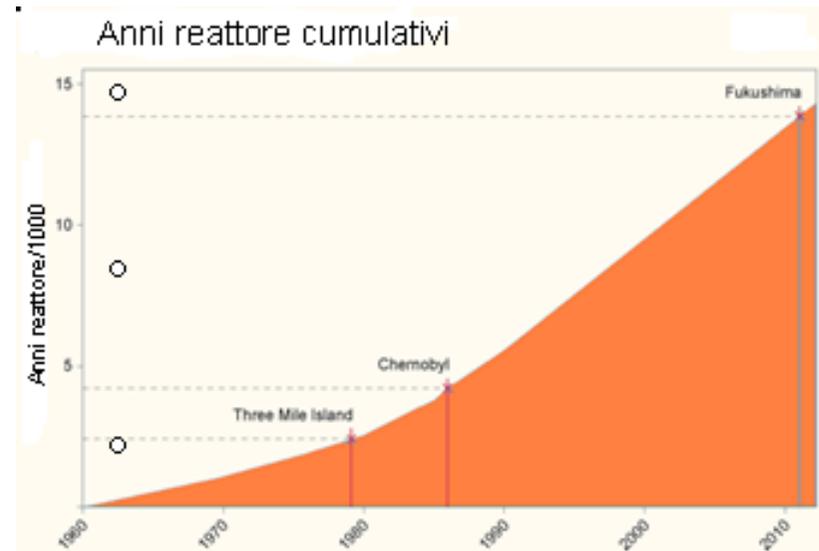
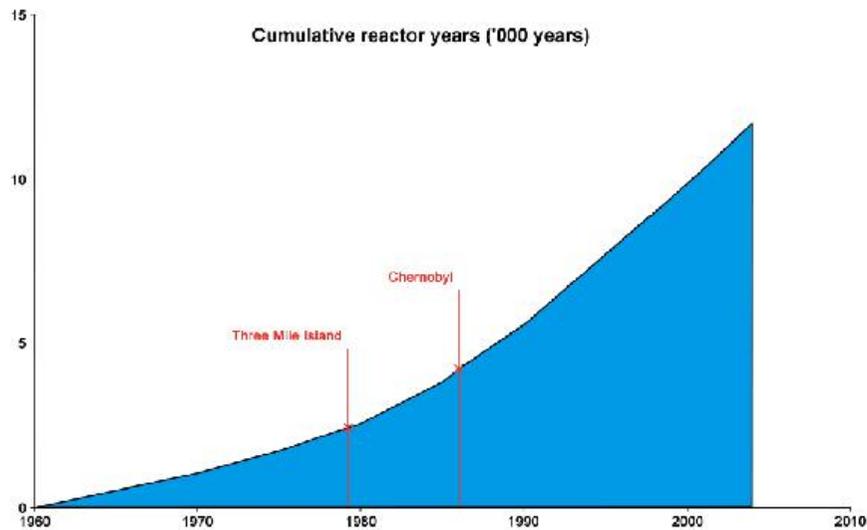
Figure 1.4: Worldwide nuclear power plant energy availability factor (1990-2001)



Source: IAEA, Power Reactor Information System.

The [energy availability factor](#) is the percentage of maximum energy generation that a nuclear power plant is capable of supplying to the electricity grid and is a measure of operational performance.

Ottimi ... affidabili, dopo gli iniziali gravi incidenti si accumulano anni di prestazioni eccellenti, ... ma, l'11 marzo 2011, il demone riappare



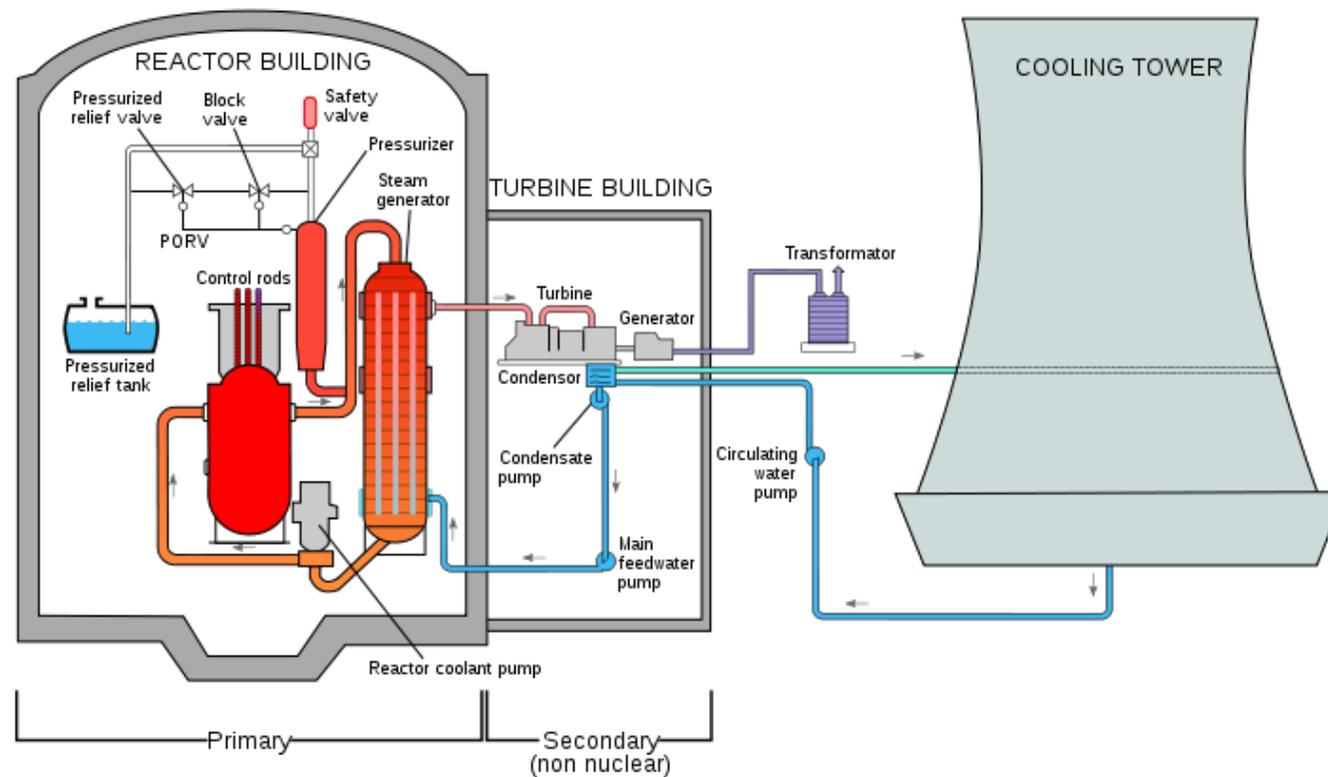
II. Three Mile Island - 2 NPP Accident (Ines 5)

Three Mile Island nuclear power plant Accident

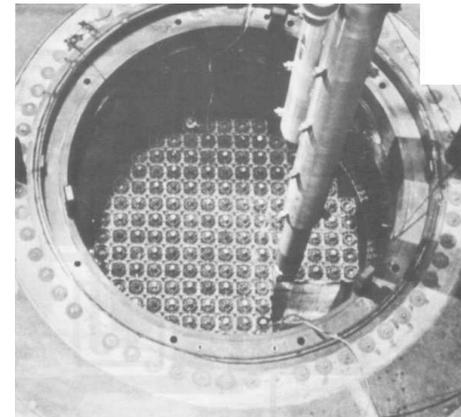
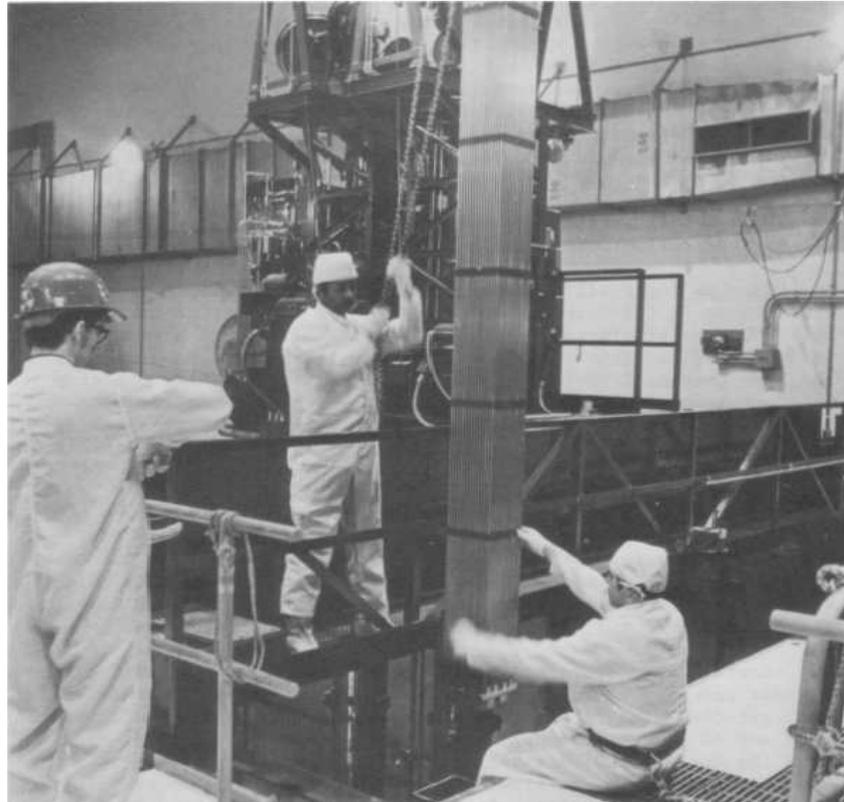
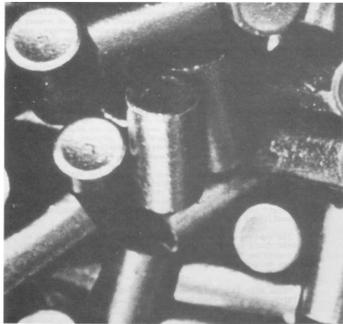
- La centrale di Three Mile Island si trova in Pennsylvania, lungo il fiume Susqueannah, su un'isola a tre miglia appunto a sud della città di Middletown, ed è dotata di due impianti nucleari, tipo PWR forniti dalla Babcock & Wilcox, il secondo TMI 2, di 906 MWe, entrato in esercizio nel dicembre, il 30, del 1978 e diventato famoso per il più grave incidente nucleare degli Stati Uniti, avvenuto, il 28 marzo 1979, solo tre mesi dopo la sua entrata in servizio



Schema dell'impianto TMI 2



Pastiglie, fascio di combustibile e

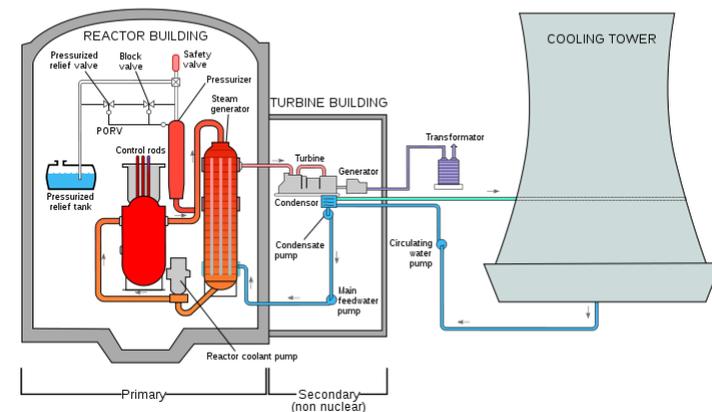


Sala controllo reattore



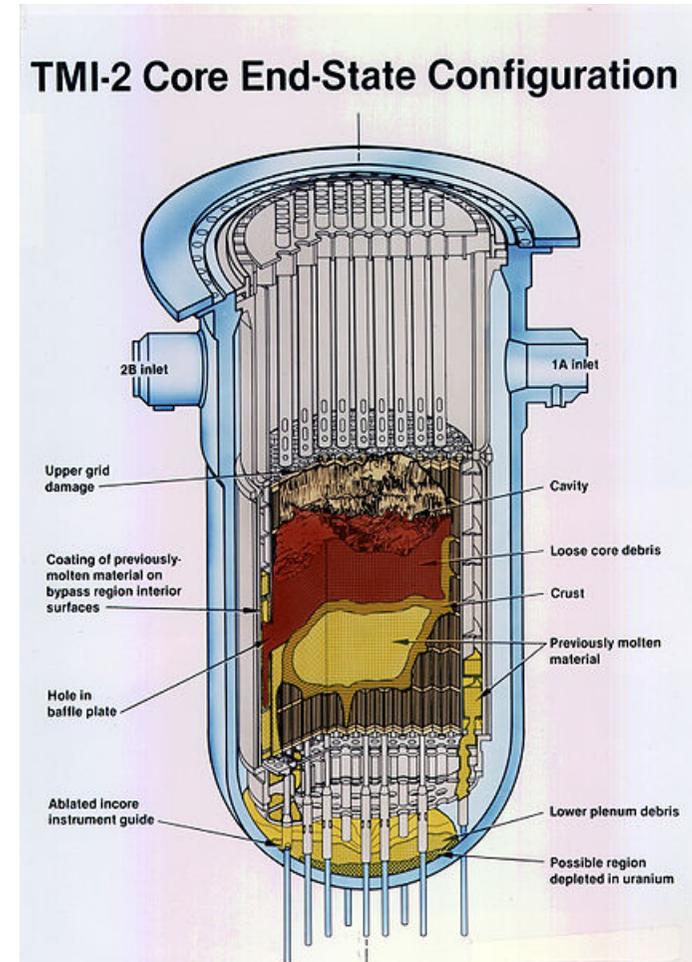
Sequenza incidentale I

- 28 marzo 1979 Il reattore riparte dopo shutdown per manutenzione. Potenza 97 %
- h 04,00 – Blocco di un pompa nel circuito secondario di refrigerazione
- Valvole alimentazione ausiliaria bloccate
- Primario senza refrigerazione, shutdown immediato del reattore, in 1 s
- Sale la pressione primario, apertura automatica e blocco della valvola sfiato del pressurizzatore
- La valvola rimane bloccata aperta, blocco non segnalato dalla strumentazione in sala controllo.
- Perdita di refrigerante nel primario. Il sistema reagisce automaticamente con iniezione acqua
- Sale il livello dell'acqua nel pressurizzatore
- L'operatore non sa che c'è una piccola perdita, teme di perdere il controllo della pressione e riduce progressivamente l'acqua iniettata
- Si forma sempre più vapore e le pompe di ricircolo cominciano a vibrare per cavitazione



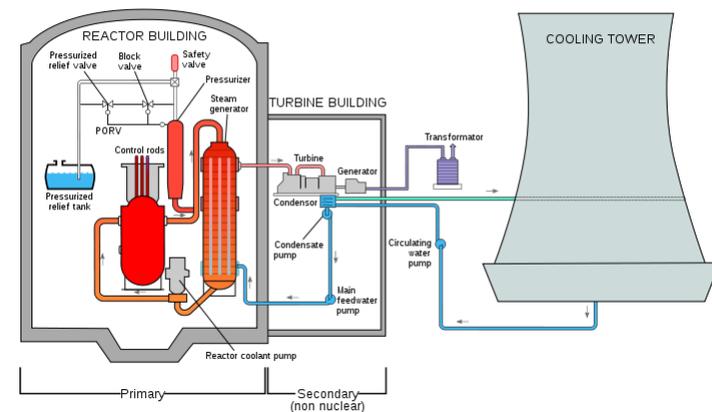
Sequenza incidentale II

- Per non fare danneggiare le pompe, vitali per la refrigerazione del nocciolo, l'operatore spegne le pompe
- L'operatore ignorando della perdita crede che il primario sia pieno d'acqua
- Senza refrigerazione forzata aumenta il vapore e la parte superiore del nocciolo comincia a scoprirsi.
- Non più bagnate dall'acqua le parti superiori delle barrette di combustibile si arroventano
- Sopra gli 800 °C inizia la reazione esotermica vapore e Zircalloy:
$$\text{Zr} + 2 \text{H}_2\text{O} = \text{ZrO}_2 + 2\text{H}_2$$
- si libera idrogeno
- Le barrette e le pastiglie di ossido di uranio si disintegrano liberando i prodotti di fissione che fuoriescono dalla valvola aperta



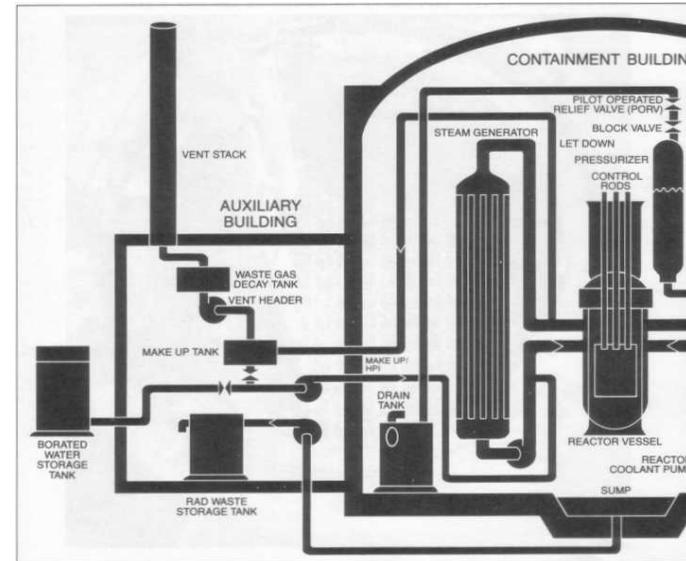
Sequenza incidentale III

- Ore 6, 22 un operatore si accorge della valvola di sfiato aperta e riesce a chiuderla. Il primario non perde più.
- Tuttavia, vapore surriscaldato e gas bloccano il flusso di acqua attraverso il nocciolo, che, deterioratosi, riduce l'area dei canali di refrigerazione.
- Per tutto il pomeriggio gli operatori tentano, con il sistema di iniezione di acqua ad alta pressione, di far collassare la bolla di vapore
- Alle 19,50 essi riescono finalmente a riavviare le pompe di refrigerazione. Collassato il vapore, le pompe non vibrano più



Sequenza incidentale IV

- Durante il periodo della fusione del nocciolo con circuito aperto, i gas radioattivi si erano raccolti nel serbatoio apposito, sito nell'edificio ausiliario
- Tra il 29 e il 30 gli operatori cercano di spostare i gas nel serbatoio di decadimento; i compressori perdono, fuga di alcuni gas
- La bolla di idrogeno: durante la scopertura del nocciolo nel vessel si era accumulata una bolla di idrogeno, forti le preoccupazioni dopo una piccola esplosione nel contenitore che una esplosione maggiore lo rovinasse



- Dal 30 marzo al 1 aprile si riesce a rimuovere la bolla di H₂ sfiatando il reattore attraverso la valvola che aveva contribuito a innescare l'incidente.
- Nello stesso periodo, per evitare danni nei cavi della strumentazione, acqua contaminata viene pompata dal fondo del contenitore nel serbatoio di stoccaggio con fuoriuscita di piccole quantità
- Il 27 di aprile, dopo un mese angoscioso, gli operatori riescono a refrigerare il nocciolo (deteriorato) per convezione naturale (senza pompe meccaniche). L'impianto raggiunge finalmente la condizione di **"cold shutdown"**

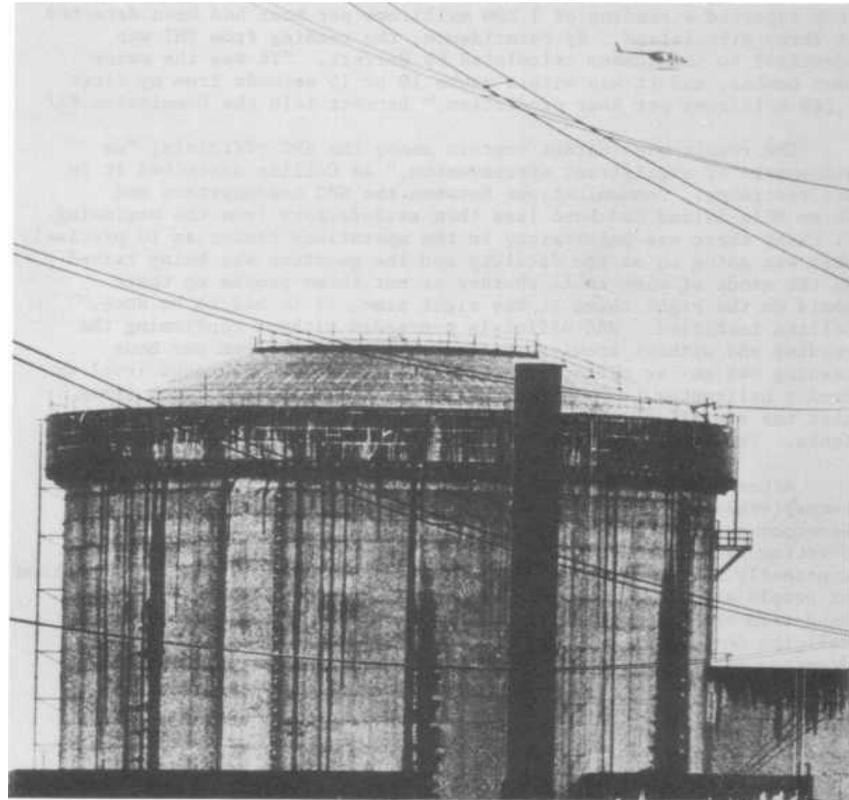
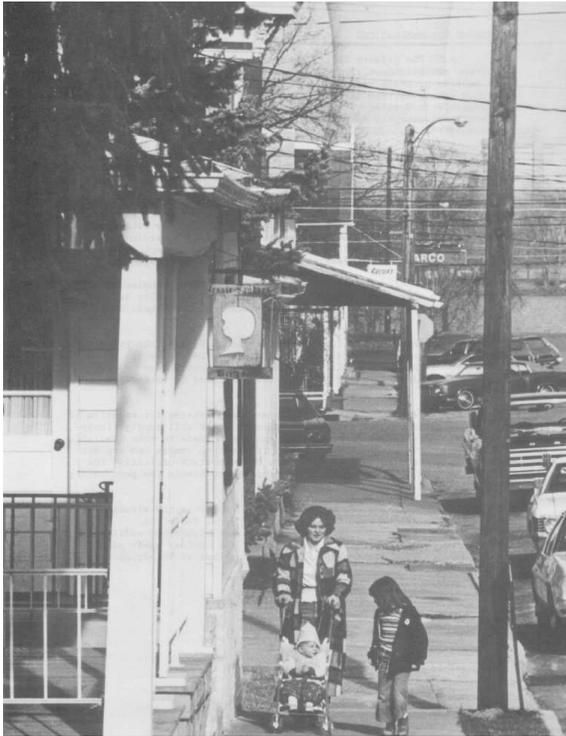
Preoccupazioni pubbliche e confusione

- Il dramma dell'incidente di TMI-2 indusse forti paure, stress e confusioni.
- L'improvvisa salita in pressione nel reattore mostrata dagli strumenti mercoledì 28 aveva fatto pensare a una possibile esplosione della bolla di idrogeno.
- Una confusa comunicazione telefonica tra personalità istituzionali aveva attribuito una lettura di contaminazione interna al contenitore (12 mSv) a valori esterni, comunicando altresì che la Nuclear Regulatory Commission stesse preparando l'ordine di evacuazione.
- Evacuare o non evacuare, diventò subito una discussione accademica: nel week end non ci fu alcuna evacuazione pianificata, ma, approfittando del bel tempo, un esodo primaverile, mentre in Three Mile Island non si verificava affatto quello che media e i responsabili locali governativi immaginavano stesse accadendo.
- Giusto dodici giorni prima dell'incidente era peraltro uscito il famoso film "China Syndrome", con Jane Fonda, che da quel momento si trasformò in uno splendido cavaliere "antinuke".
- La confusione di quel venerdì 30 diede origine alla **"politica della paura"**.

Nessuna conseguenza radiologica sulla popolazione

- Come prima descritto, alcuni gas radioattivi erano stati rilasciati un paio di giorni dopo l'incidente, per una dose media di 0,08 mSv alla popolazione residente entro le 10 miglia dall'impianto, una dose equivalente a una radiografia toracica, assolutamente insufficiente per causare danni.
- A causa delle preoccupazioni di possibili casi di tumore, il Dipartimento della Salute della Pennsylvania provvide a tenere un registro aggiornato sugli oltre 30.000 cittadini che risiedevano al tempo dello incidente entro le 5 miglia da TMI-2, senza riscontrare differenze rispetto alla popolazione campione.
- Una dozzina di studi, condotti da organizzazioni indipendenti, non mostrarono evidenza alcuna di anomala crescita di tumori nelle aree intorno a TMI dopo incidente.
- L'unico effetto rilevabile fu il forte stress psicologico subito dalla popolazione residente a seguito dell'incidente, come ben evidenziato nel Kemeny Report:

Theodore Gross, provost of the Capitol Campus of Pennsylvania State University:
“Never before have people been asked to live with such ambiguity. The TMI accident -- an accident we cannot see or taste or smell . . . is an accident that is invisible. I think the fact that it is invisible creates a sense of uncertainty and fright on the part of people that may well go beyond the reality of the accident”



I lavori di decontaminazione di TMI-2

- La decontaminazione del reattore di TMI2 durò circa 12anni e costò circa US\$ 973 milioni
 - La decontaminazione venne condotta da un team di 1000 lavoratori esperti,
 - Tutte le superfici furono decontaminate; si produssero circa 10,6 megalitri di acqua, immagazzinata, trattata e infine evaporata in condizioni di sicurezza.
 - L'operazione iniziò nell'agosto 1979 e si completò con licenza dell'NRC nel dicembre 1993
-
- La rimozione del combustibile dal vessel fu il cuore dell'operazione. Nel corso della operazione il combustibile danneggiato rimase sempre immerso nell'acqua
 - Dopo 6 anni di preparazione gli operai, dall'alto di una piattaforma sulla testa del reattore, manovrando attrezzi di notevole lunghezza, iniziarono a estrarre il combustibile, collocandolo in canestri appesi sotto la piattaforma.
 - In tutto 342 canestri vennero trasportati in sicurezza per l'immagazzinamento finale nei Laboratori Nazionali di Idaho
 - Vennero rimosse dal vessel del reattore circa 100 t di barrette di combustibile danneggiate, senza alcun rischio per i lavoratori e il pubblico

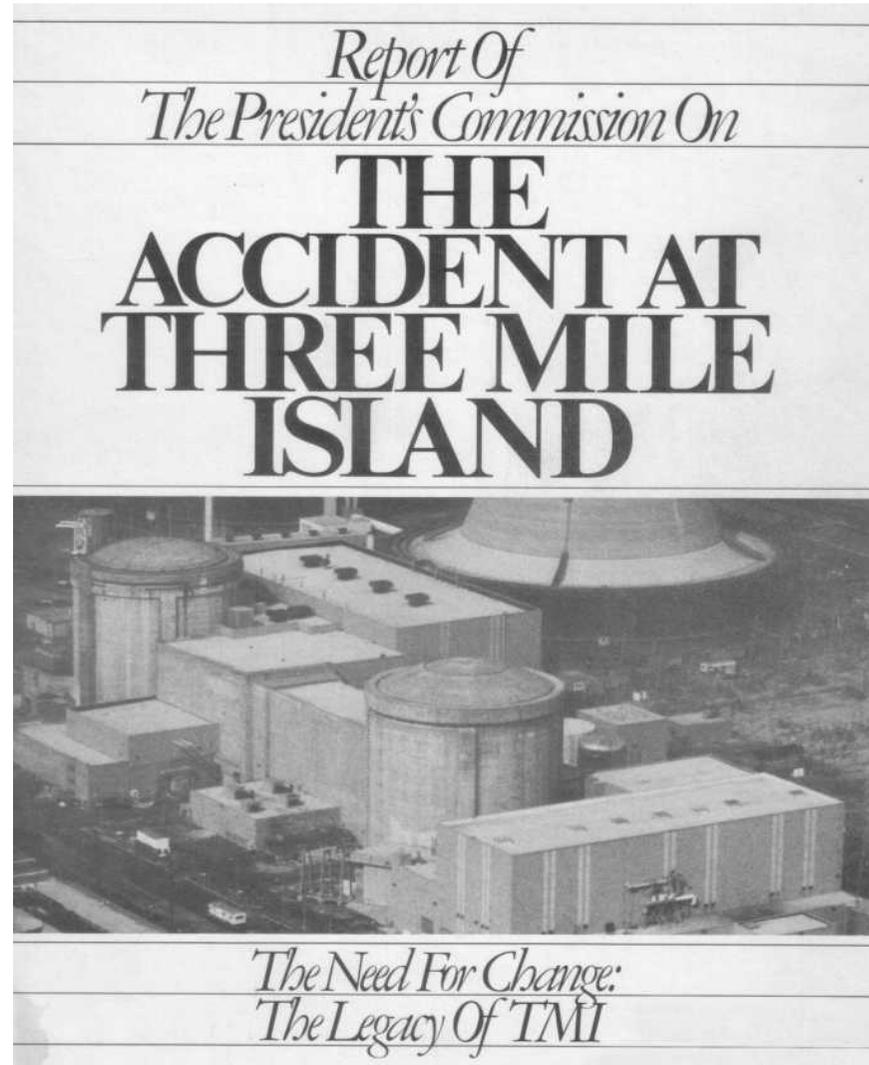


Summary

- **Cosa avvenne:**
- Il combustibile di TMI-2 rimase scoperto e fuse per più di 1/3 della sua altezza
- Strumentazione e programmi di addestramento inadeguati ridussero la capacità degli operatori di rispondere correttamente all'incidente.
- L'incidente venne accompagnato da problemi di comunicazione che portarono a informazioni contrastanti diffuse al pubblico, che contribuirono ad accrescerne le paure.
- Vennero rilasciate radiazioni di lieve entità e soprattutto senza alcun rischio per il pubblico, confermato dalle migliaia di misure ambientali e campioni prelevati durante l'incidente
- Il contenitore d'impianto operò come da progetto. A dispetto della fusione di circa 1/3 del nocciolo del combustibile, il vessel mantenne la sua integrità e contenne al suo interno il combustibile danneggiato
- **Cosa non avvenne:**
- Non ci fu alcuna "Sindrome cinese"
- Non ci fu alcuna ferita o impatto rilevabile sulla salute della popolazione e dei lavoratori, a parte le preoccupazioni iniziali
- **Impatti a lungo termine:**
- Le lezioni impartite dall'incidente produssero costanti e continui miglioramenti nelle prestazioni di tutti gli impianti nucleari di potenza.
- L'incidente permise una più approfondita conoscenza della fusione del combustibile e in particolare l'inverosimilità della cosiddetta Sindrome cinese, cioè fusione nocciolo, rottura del vessel e dell'edificio di contenimento
- La confidenza del pubblico nei riguardi dell'energia nucleare declinò bruscamente a seguito di questo incidente.
- E fu una delle cause del declino di nuove costruzioni negli anni '80 e '90.

Il rapporto Kemeny

pubblicato il 30 Ottobre 1979

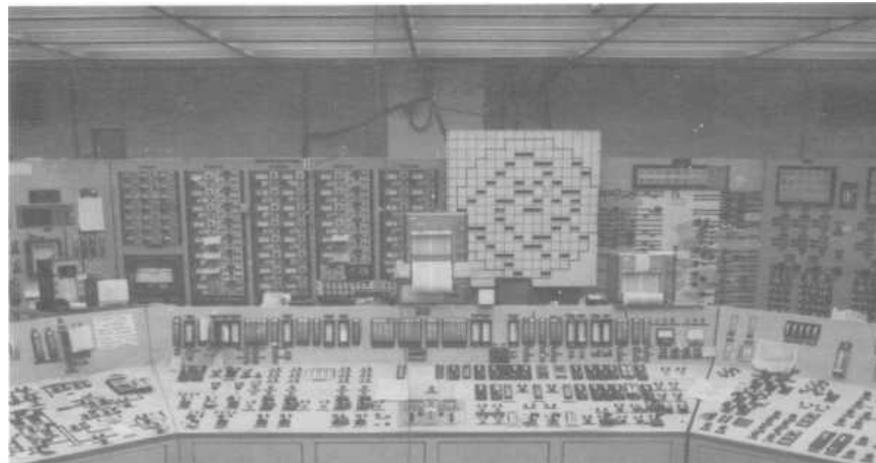


Mandato e conclusioni della

“Commission on the accident at TMI”

- the President of the United States said that the Commission "will make recommendations to enable us to prevent any future nuclear accidents."
- “To prevent nuclear accidents as serious as Three Mile Island, fundamental changes will be necessary in the organization, procedures, and practices -- and above all -- in the attitudes of the Nuclear Regulatory Commission and, to the extent that the institutions we investigated are typical, of the nuclear industry.”

Control panel of TMI-2, showing maintenance tags that operators testified covered one of the closed emergency feedwater valve indicator lights during the first 8 minutes of the accident.



Lezioni da TMI-2: a) gli uomini

- L'importanza dell'addestramento degli operatori furono tra i più significativi insegnamenti dell'incidente di Three Mile Island
- e in particolare la necessità di proteggere sempre i sistemi di refrigerazione dell'impianto, qualunque sia il problema di innesco.
- Venne costituito l'Istituto Nazionale per l'addestramento degli operatori (INPO, Institute of Nuclear Power Operations) con l'annessa National Academy for Nuclear Training.
- Ambedue queste istituzioni sono state efficaci nel promuovere l'eccellenza nell'operazione degli impianti nucleari negli anni successivi

Lezioni da TMI-2: b) l'impianto

- Sviluppo lay-out d'impianto atto a favorire sempre la circolazione naturale
- Disegno e digitalizzazione sala controllo
- Intensa attività internazionale di R&D sugli incidenti severi e fusione nocciolo, che porta allo sviluppo di impianti a prova di incidente severo, con fusione del nocciolo:
- da Three Mile Island 2 alla generazione III

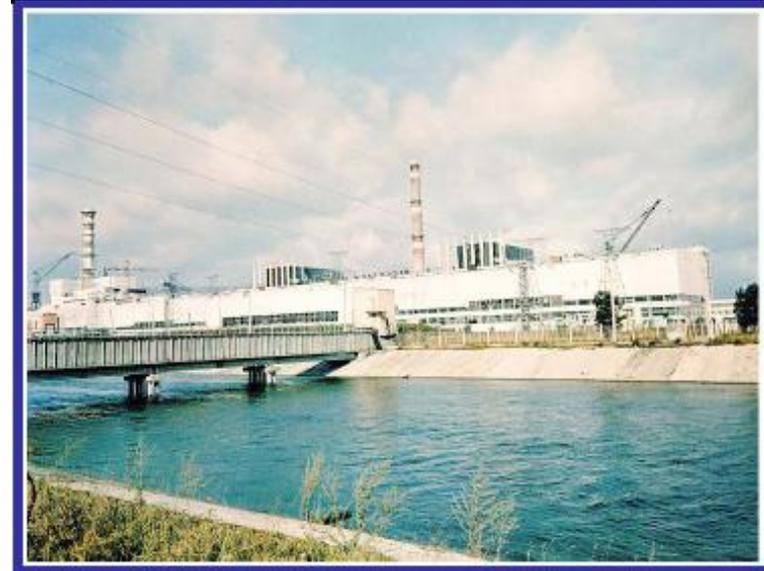
Lezioni da TMI-2: c) il sistema

- Profonda riorganizzazione complessiva in USA; sviluppo della **Cultura della Sicurezza e della Qualità**.
- Si definiscono ambiti e responsabilità tra Istituzioni, Autorità di sicurezza (standard, linee guida, vigilanza) e l'intero sistema di fornitura (progetto, sito, costruzioni, fabbricazioni) ed esercizio dell'impianto.
- Ampia partecipazione delle istituzioni internazionali (IAEA in primis) nel diffondere la cultura della sicurezza nei sistemi nazionali (USA, U.E., Giappone)
- Un processo di revisione che non pare invece coinvolgere molto l'URSS.
- Anche l'Italia riorganizza profondamente il suo sistema nucleare che va concentrandosi su unica filiera, il PUN, superando precedenti difficoltà e sfasature.
- Appare cruciale il ruolo della comunicazione al pubblico

III. Chernobyl 4 NPP Accident (Ines 7)

Chernobyl, Chaos 4 Nuclear Accident

- Il differente contesto: anni '70 -'80 in URSS di forte competizione per raggiungere il benessere dell'occidente.
- Cruciali le infrastrutture a la produzione di energia elettrica (e teleriscaldamento)
- I reattori RBMK (tubi e non vessel)
- Un aneddoto (profitto = incidenti, partito = sicurezza)

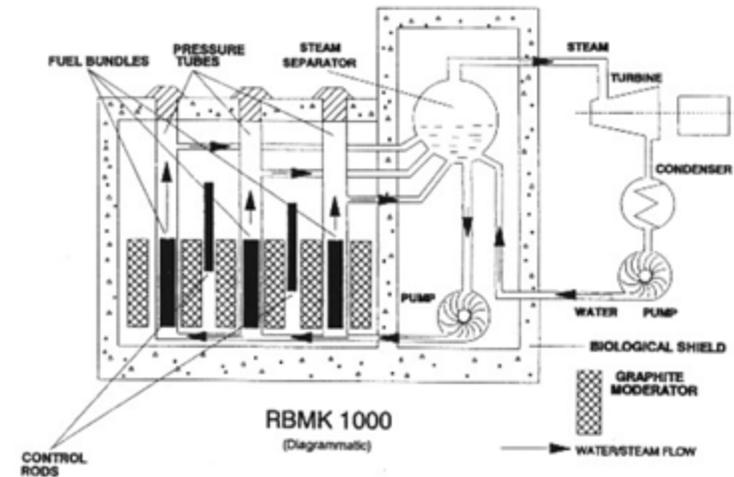


- Andronik M. Petrosyants, chairman of the Soviet Committee for the Peaceful Uses of Atomic Energy (press conference in Moscow, Aug.1986):
- **“Violation of the established order in preparation for the tests . . . violation of the testing program itself and carelessness in control of the reactor installation . . . inadequate understanding on the part of the personnel of the operating processes in a nuclear reactor . . . loss of a sense of danger.**
- **Chernobyl calamity occurred, ironically in the course of a “safety test”**

Caratteristiche del Reattore RBMK - Chernobyl 4

Reattore da 1000 MWe, del tipo a tubi in pressione moderato a grafite, refrigerato con acqua leggera in ebollizione. Il vapore è prodotto in due circuiti indipendenti di refrigerazione, ciascuno con 840 canali di combustibile, due separatori di vapore, quattro pompe di circolazione.

I generatori di vapore forniscono il vapore a due turbogeneratori di 500 MWe ciascuno con proprio condensatore e sistema di acqua di alimento. Il reattore è rifornito di combustibile con macchina di carico che opera con reattore in funzione

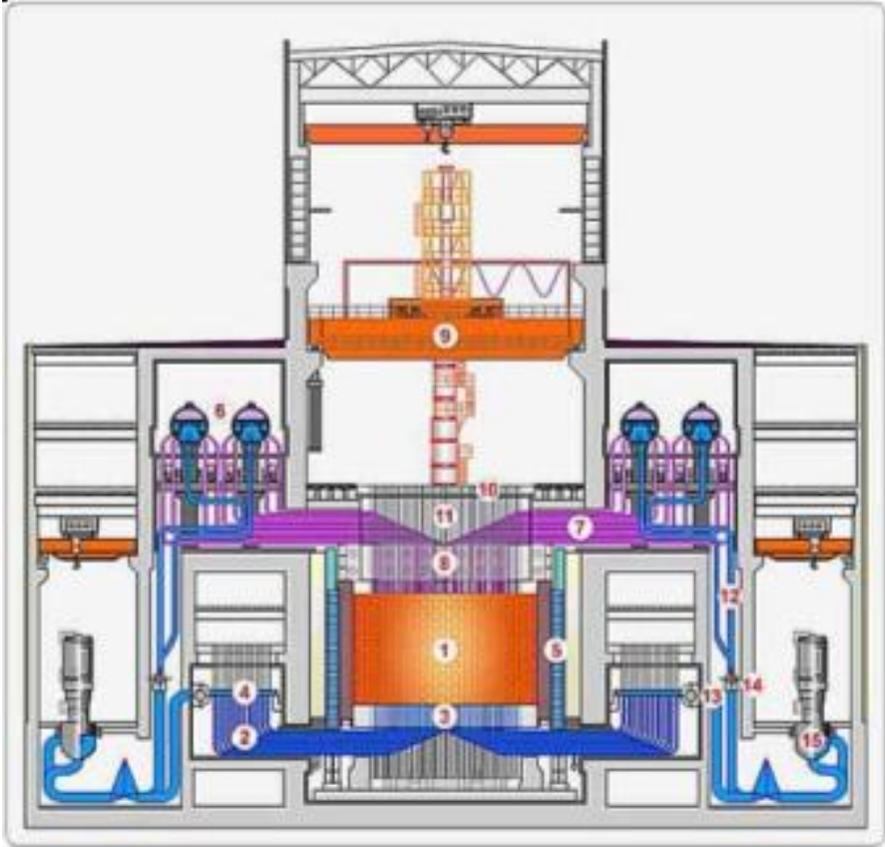
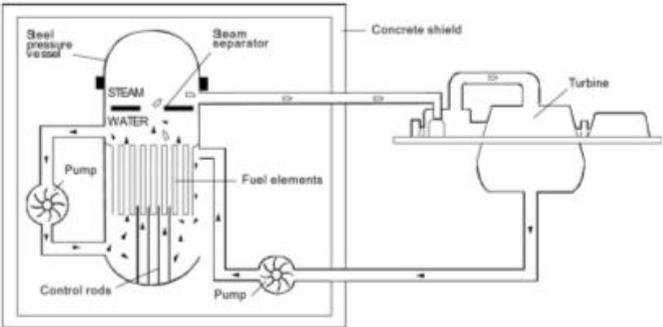


Source: OECD NEA

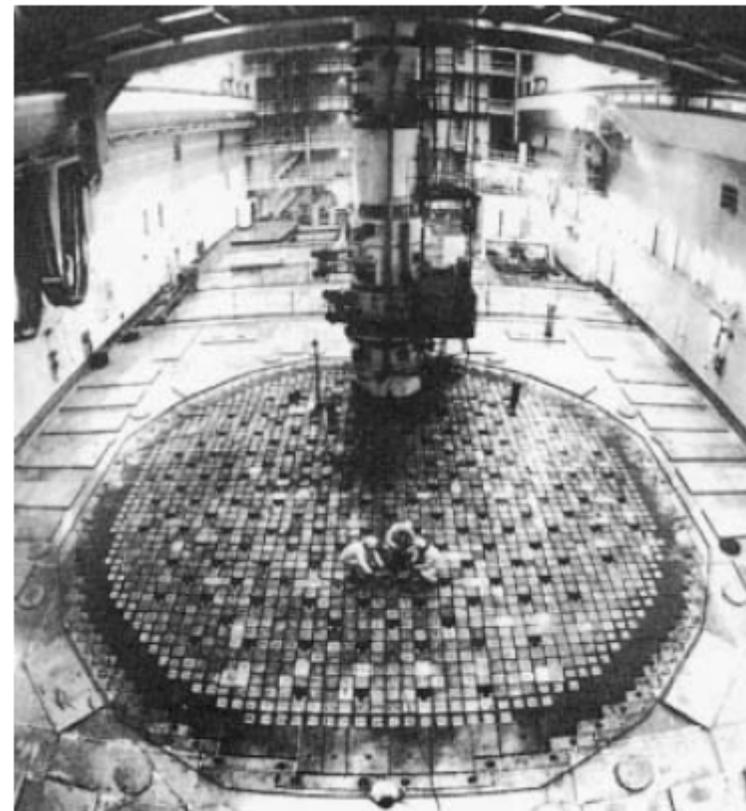
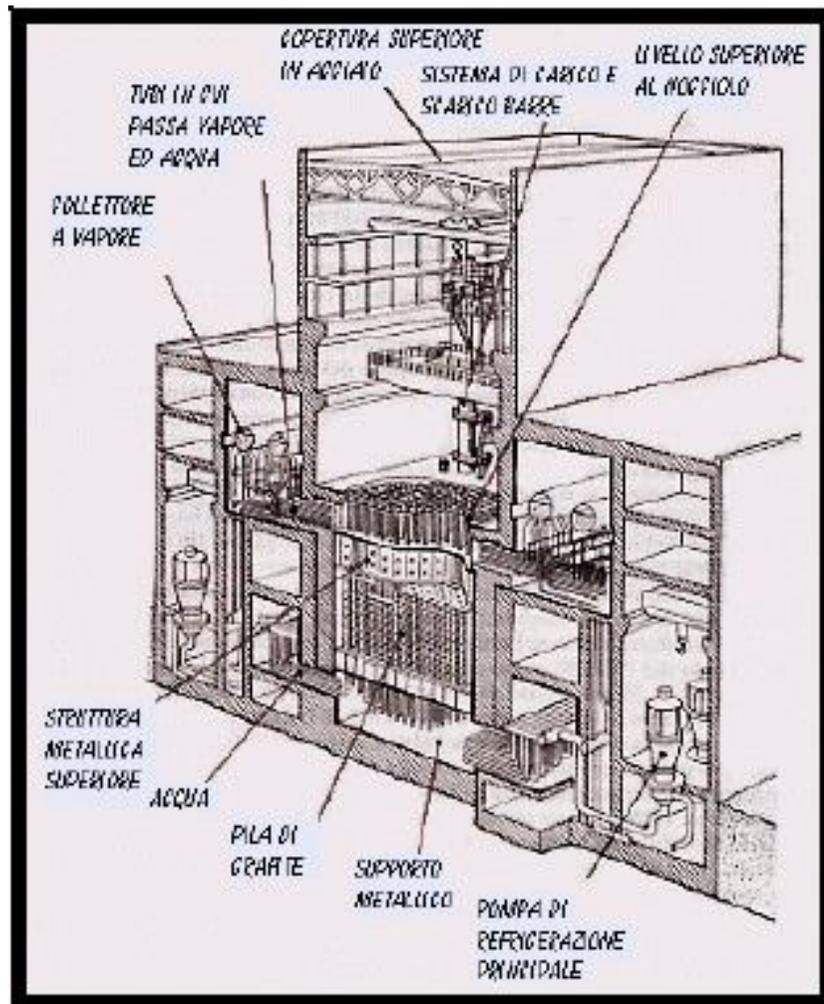
- Nocciolo: altezza 7m, diametro 12 m, con 1680 canali di combustibile.
- Il reattore con la prima carica di combustibile ha un coefficiente di vuoti negativo, ma all'equilibrio, cambiando la composizione isotopica, questo diventa positivo, compensato dai coefficienti di temperatura e di pressione. A bassa potenza alti rischi di coefficiente di vuoto positivo (da qui la prescrizione di non operare il reattore sotto 700 MW_t)
- Sono usate per il controllo della distribuzione spaziale globale e locale della potenza e per la protezione di emergenza 211 barre assorbenti di controllo.
- Nei regolamenti di esercizio è prescritto che non meno di 30 barre di controllo siano sempre inserite nel nocciolo del reattore

Schema impianto RBMK

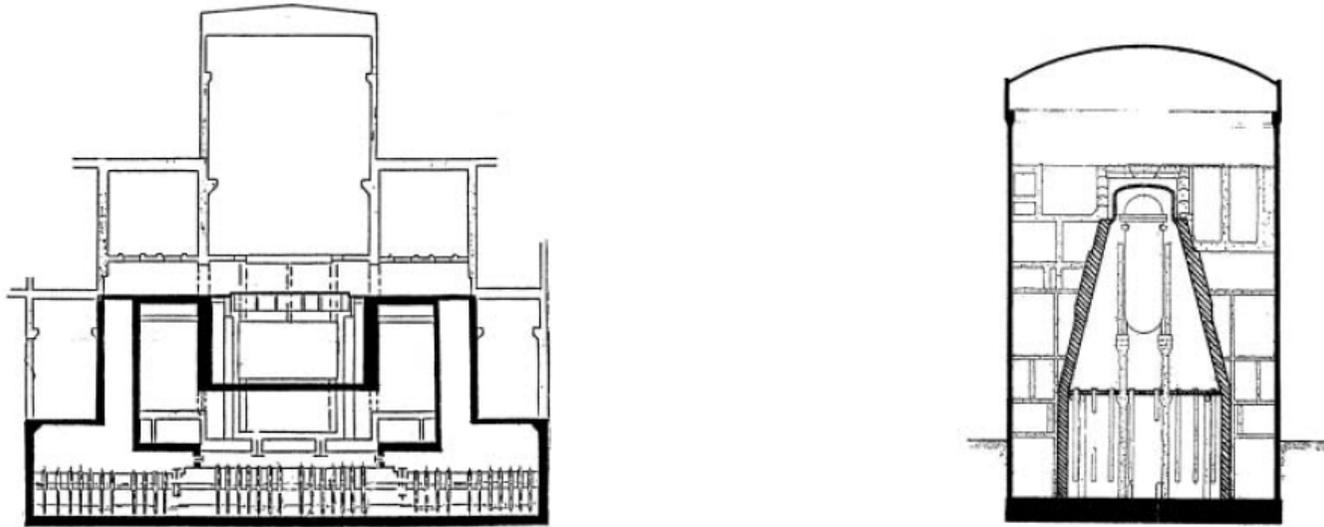
Boiling Water Reactor (BWR)



Visione assonometrica e foto della piastra superiore del nocciolo con la macchina di carico e scarico del combustibile



Contenitore d'impianto: confronto RBMK - BWR



- A differenza del BWR nel reattore RBMK la maggior parte del circuito di refrigerazione è racchiuso in una serie di camere dotate di robuste pareti di contenimento, connesse al sistema di soppressione del vapore, posto sotto il reattore, per catturare e condensare il vapore che potrebbe venire rilasciato nelle camere di contenimento a seguito di perdita del refrigerante.
- Fa eccezione, cosa di non poco conto, la parte superiore del reattore e specialmente i tappi terminali di chiusura dei canali.

La prova che determinò l'incidente

Lo scopo della prova era di dimostrare la capacità dei turbogeneratori di alimentare i sistemi di sicurezza nel caso di blackout d'impianto. Nella prova si sarebbe dovuto interrompere l'alimentazione del vapore a uno dei due turbogeneratori e verificare la capacità di fornire la corretta tensione durante la sua rotazione inerziale, usando le pompe di ricircolo per simulare il carico. La stesura delle procedure venne pertanto lasciate a esperti elettrotecnici, piuttosto che a esperti nucleari

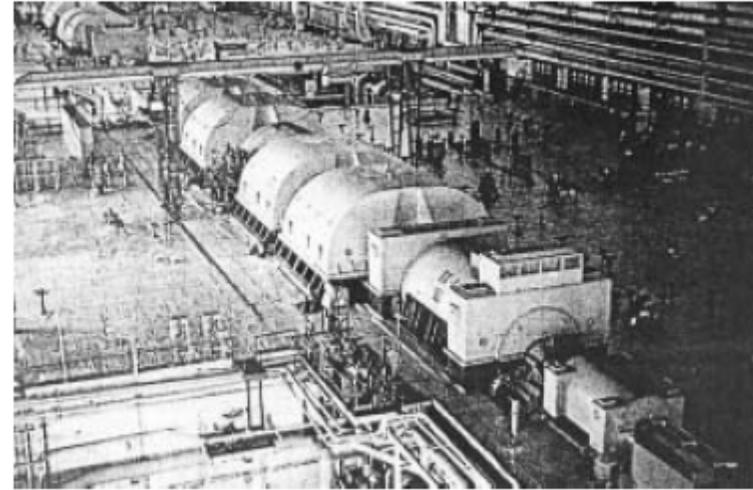


Fig. 2 - Panoramica interna della sala macchine della centrale di Chernobyl. Sono visibili le sezioni turbina-alternatore alimentate dal reattore n. 4. (Fonte: Agenzia TASS)

- La prova era stata condotta in precedenza altre volte senza esiti conclusivi
- Questa era una ripetizione, sempre con la presunzione che si avesse a che fare con una prova elettrotecnica, senza alcuna conseguenza sulla sicurezza del reattore.
- Le procedure vennero preparate in modo molto superficiale per quanto attiene la sicurezza e le responsabilità per procedere nell'esperimento vennero assegnata al personale di centrale, senza necessità di alcuna approvazione formale da parte del gruppo tecnico della sicurezza.
- Ma l'incidente non si sarebbe verificato senza la concomitanza di una serie di altri eventi tra loro correlati

Sequenza incidentale I

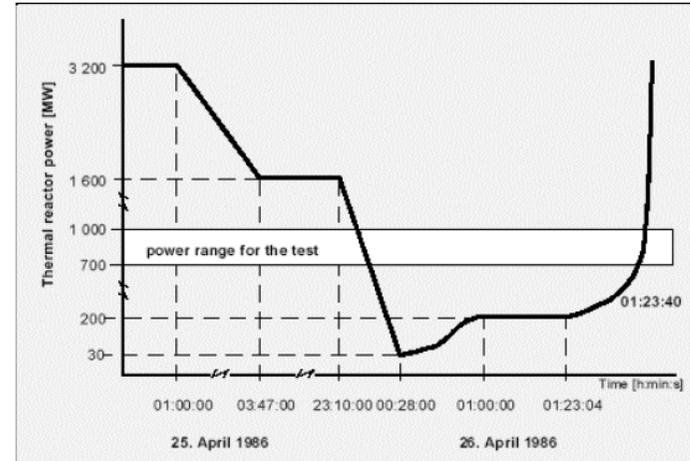
- *Cronologia eventi*
- **25 aprile 1986 , Ore 01:00** Lo staff incaricato di condurre l'esperimento inizia a ridurre la potenza del reattore n.4, per raggiungere il livello di 700-1000 MWt previsto per l'esecuzione della prova
- **Ore 13:05 del 25 aprile.** La potenza del reattore scende a 1600 MWt e come previsto 1 dei 2 turboalternatori collegati al reattore viene isolato.



- **Ore 14:00 del 25 aprile.** In accordo con il programma di prova il sistema di refrigerazione di emergenza del nocciolo viene intenzionalmente isolato, per prevenire che, entrando in funzione automaticamente, interrompesse l'esperimento.
- Il dispacciatore della rete da Kiev chiede di sospendere la riduzione della potenza e il programma di prova essendoci una emergenza in rete. Senza questo rinvio la prova si sarebbe conclusa nel pomeriggio con la stessa staff
- Il reattore ora opera a metà della potenza nominale senza sistema di refrigerazione di emergenza, in violazione delle norme di sicurezza (fatto di per se influente nella dinamica dell'incidente, ma significativo della leggerezza della staff).

Sequenza incidentale II

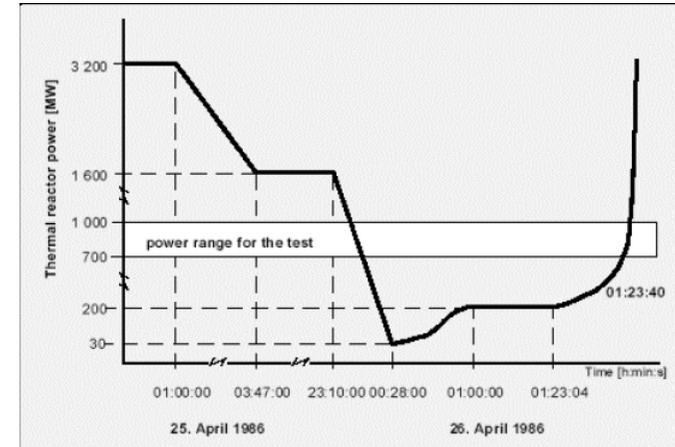
- **Ore 23:00 del 25 aprile.** Il controllore della rete autorizza l'ulteriore discesa della potenza, e l'esperimento riprende. Nel periodo precedente a bassa potenza il reattore si avvelena di Xe, e ciò rende più difficile il suo controllo.
- **Ore 23:10.** Il reattore raggiunge il livello di potenza (1000-700MWt) previsto per condurre l'esperimento.
- **Ore 00:00 del 26 aprile:** cambio turno, subentra nuova staff.



- **Ore 00:28** Per prepararsi alla prova gli operatori trasferiscono il sistema di regolazione della discesa di potenza da controllo locale a controllo globale. In questa operazione non entra il sistema di blocco per bassa potenza, e il reattore scende velocemente sotto il livello minimo ammissibile di 700 MWt, dove diventa pericoloso operare perché gli effetti del coefficiente di vuoti positivi divengono molto sensibili.
- Il reattore cade inaspettatamente fino a 30 MWt, livello molto inferiore a quello previsto per l'effettuazione dell'esperimento.
- Estruendo manualmente altre barre di controllo e contravvenendo così alla norma che esclude l'operazione del reattore con meno di 30 barre integralmente inserite, si riesce con fatica a riportare il reattore a 200MWt, livello cui è proibito operare stabilmente causa basso contenuto di vapore e coefficiente di vuoto positivo

Sequenza incidentale III

- **Ore 01:00.** La potenza del reattore si stabilizza a 200 MWt. Nel tentativo di riportarla a 700 MWt, livello minimo prefissato per l'esperimento, gli operatori disattivano il sistema di regolazione automatica. Nelle condizioni in atto il tempo minimo richiesto per spegnere il reattore in caso di emergenza (inserimento completo di tutte le barre) è di gran lunga superiore a quello di una possibile escursione di potenza dovuta al coefficiente di vuoti positivo.



- **Ore 01:03**
Non si riesce a elevare la potenza al di sopra dei 200 MWt a causa della scarsa reattività disponibile nel nocciolo, nel quale si andava accumulando Xe. Nonostante non sia possibile rispettare i requisiti di potenza previsti nel programma si decide di proseguire ugualmente l'esperimento
- Vengono azionate altre due pompe di circolazione, in aggiunta a quelle già operanti, per simulare il maggior carico elettrico che il turboalternatore dovrebbe fornire in caso di black-out
- La maggior portata d'acqua nel nocciolo riduce la quantità di vapore presente, avvicinandosi a pericolose condizioni di saturazione.

Sequenza incidentale IV

- **Ore 01:10 del 26 aprile.** In tali condizioni entrerebbe in funzione il sistema di spegnimento di emergenza del reattore. Per evitare questa eventualità, che renderebbe impossibile l'effettuazione del test, gli operatori intervengono manualmente e isolano intenzionalmente alcuni canali (livello generatore di vapore) del sistema di spegnimento di emergenza.



- Nel tentativo di aumentare la quantità di vapore prodotta si tenta di ridurre la portata dell'acqua di alimento.
- Il reattore diventa fortemente instabile, e, per mantenere costante la potenza, si deve intervenire ripetutamente a distanza di pochi secondi sulle barre di controllo.
- **Ore 01:22:30'' del 26 aprile.** Il computer di controllo segnala la necessità di procedere all'immediato spegnimento del reattore.
- Ignorando deliberatamente la segnalazione gli operatori danno inizio all'esperimento.

Sequenza incidentale V

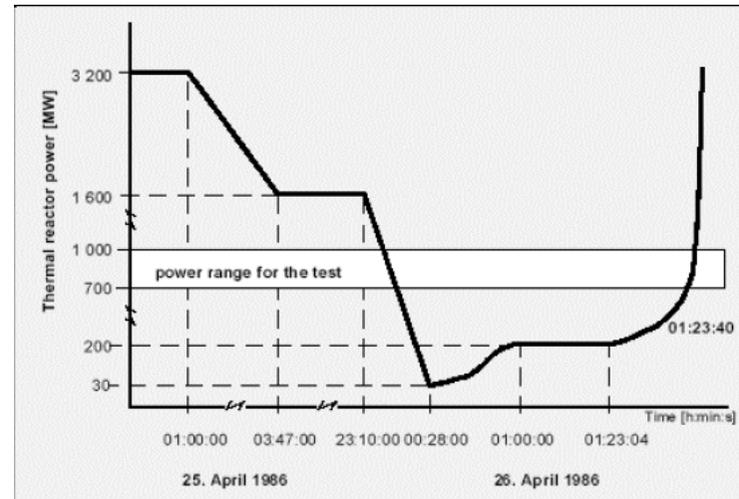
- **Ore 01:23:04” del 26 aprile.** Si dà inizio alla prova:
- Viene chiusa la valvola di ammissione del vapore alla turbina, che inizia la corsa di arresto inerziale. L'isolamento del reattore dai due turbogeneratori (1 era già stato escluso) avrebbe determinato lo spegnimento automatico di emergenza del reattore.



- Anche questo sistema viene perciò escluso onde rendere possibile la ripetizione dell'esperimento in caso di insuccesso della prima prova.
- Il reattore continua a operare alla potenza di 200 MWt senza che il calore prodotto dal nocciolo venga asportato efficacemente .
- Si ha una netta riduzione della portata del refrigerante attraverso il nocciolo, dovuta all'effetto concomitante del rallentamento delle pompe di circolazione (alimentate dalla corsa inerziale del turboalternatore) e della riduzione della portata di alimento
- Si verifica un forte incremento della produzione di vapore nel nocciolo e la potenza del reattore inizia a crescere rapidamente per effetto della rarefazione dell'acqua.

Sequenza incidentale VI: il reattore esplode

- **Ore 01:23:40''**. Sulla base delle indicazioni strumentali gli operatori si rendono conto della pericolosità della situazione.
- Il caposquadra di turno dà l'ordine di azionare il pulsante AZ-5, che comanda l'arresto rapido del reattore attraverso l'inserimento completo di tutte le barre di controllo



- Troppo tardi.
- Il pulsante viene azionato, ma dopo alcuni secondi gli operatori in sala manovra avvertono una serie di urti e si rendono conto che le barre di controllo si sono arrestate prima del fine corsa.
- **Ore 01:24 del 26 aprile**. La potenza termica sviluppata dal reattore diverge, raggiungendo livelli che secondo le stime superano di 100 volte il valore nominale. Si verificano in rapida successione due forti esplosioni (di vapore la prima, probabilmente di idrogeno al seconda) che scoperciano il nocciolo e demoliscono l'edificio reattore.

La cosa più sconcertante

- *La decisione di proseguire la prova*
- La prova venne iniziata in condizioni differenti da quelle specificate e venne proseguita a dispetto dell'evidenza che l'impianto era difficile da controllare e che la "riserva di reattività" era stata violata.
- Nel corso della prova si registrarono una serie di azioni e di atteggiamenti identici da parte della staff e del management: atteggiamenti condizionati dall'eccessiva confidenza sull'impianto considerato di facile operazione, senza problemi (era il più giovane e in tre anni aveva collezionato il record di funzionamento tra gli RBMK).
- Pareva importante e urgente solo il completamento della prova: un Accademico del Partito che veniva da Mosca, ne era l'ideatore.
- Nessuno sembrava cosciente di quanto sarebbe potuto avvenire, e nemmeno, di quanto stesse avvenendo
- E si trattava di un evento estremamente distruttivo. Un incidente tra i peggiori che si potesse immaginare in termini di rischi nucleari

L'esplosione

- Le esplosioni che si verificano causano lo scoperchiamento del reattore e demoliscono le strutture che lo racchiudono, espongono il nocciolo all'atmosfera e proiettano nell'area circostante vapori, gas, polveri e frammenti di combustibile, grafite e materiali strutturali.
- L'intenso effetto camino che si determina porta a qualche chilometro di altezza polveri e ceneri, e con essi parte del contenuto del nocciolo.
- Il fuoco si trasmette all'edificio turbine adiacente e incendia i serbatoi del gasolio per i generatori diesel di emergenza



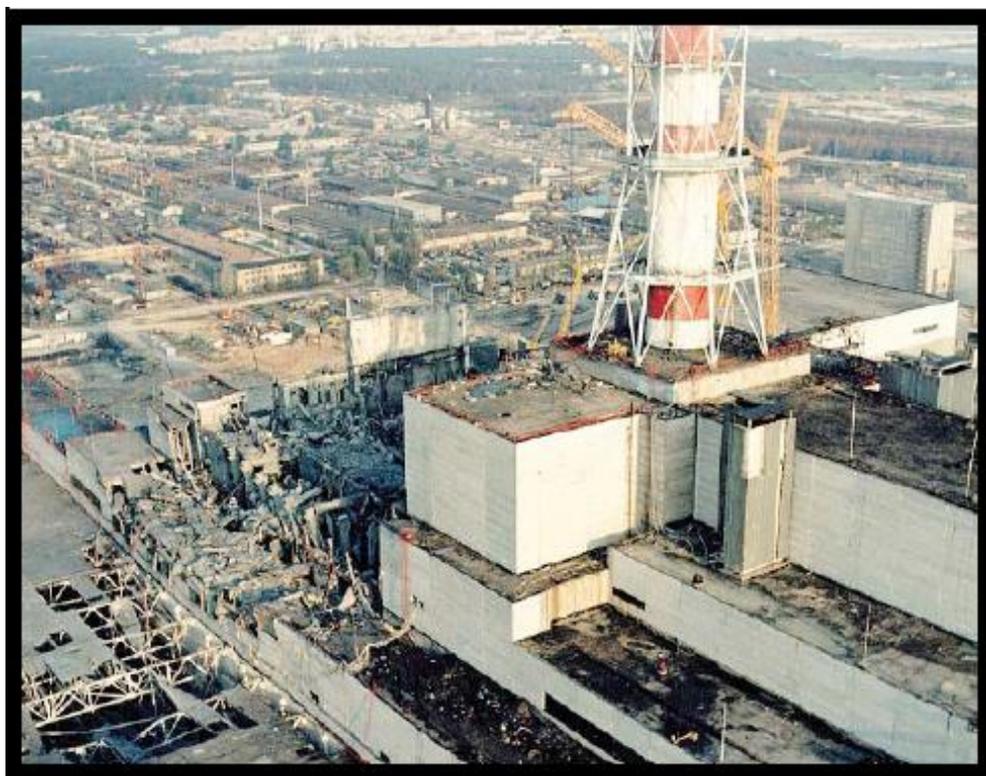
L'incendio del reattore

- L'incendio della grafite rappresenta fin dall'inizio un problema pressoché insormontabile. Tanto nell'URSS quanto nel resto del mondo mancavano precedenti esperienze nel fronteggiare simili disastri. Le modalità di intervento classiche (uso di acqua, polveri e liquidi estinguenti) rischiavano da un lato di incrementare la dispersione di sostanze radioattive e dall'altra di stabilire nuove condizioni di criticità nel nocciolo semidistrutto.
- Nei giorni successivi gli elicotteri scaricarono sull'edificio reattore semidistrutto oltre 5.000 tonnellate di carburo di boro (assorbitore di neutroni), dolomite (per assorbire calore e per contrastare l'incendio attraverso la liberazione di CO₂), piombo (per schermare le radiazioni), sabbia e argilla (per ridurre l'emissione di ceneri e particolato).

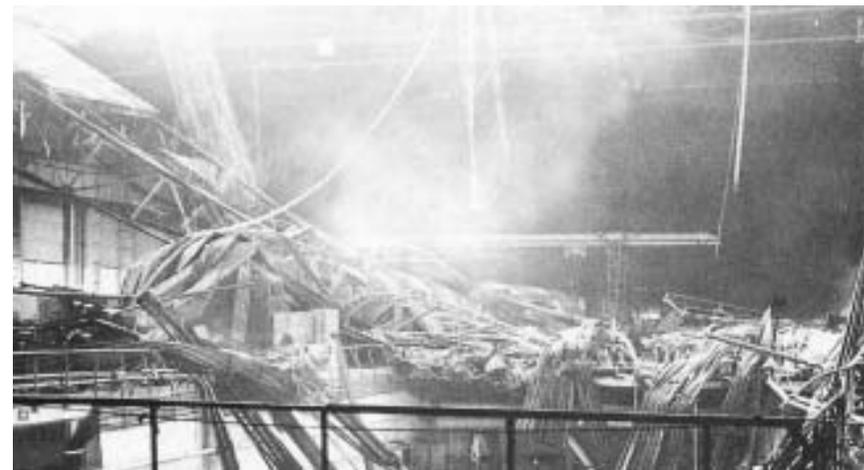
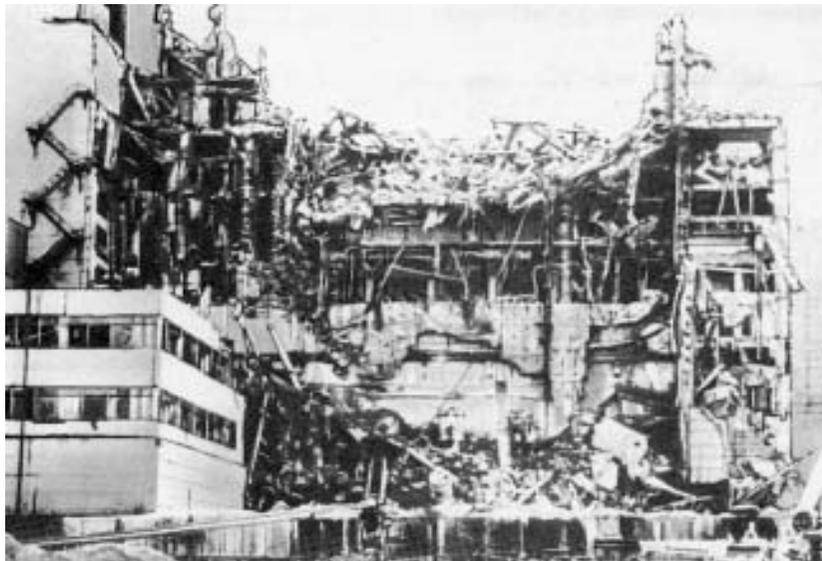
Lo spegnimento dell'incendio

- L'effetto dello scarico di materiale sull'incendio fu positivo ma il nocciolo semidistrutto finì con l'essere ricoperto da uno strato termicamente isolante che ne elevò ulteriormente la temperatura, determinando nei giorni successivi un brusco aumento del rilascio radioattivo
- Il 6 maggio si verificò il cedimento strutturale dello schermo inferiore del reattore, evento che contribuì insperatamente a determinare una drastica riduzione dell'emissione radioattiva, probabilmente in seguito al cambiamento di configurazione del combustibile fondente.
- Il 9 maggio l'incendio della grafite era finalmente estinto,

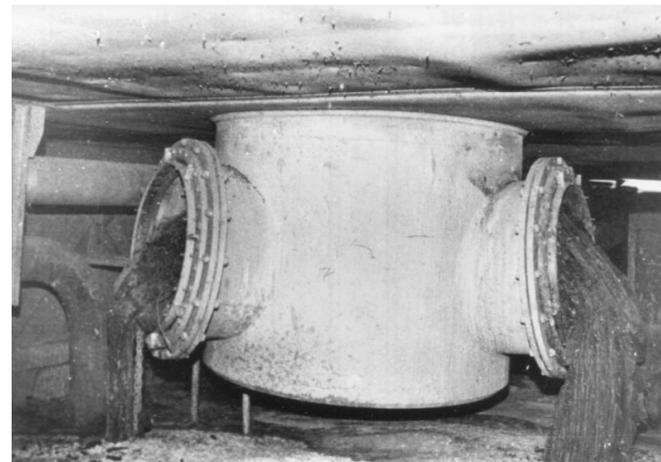
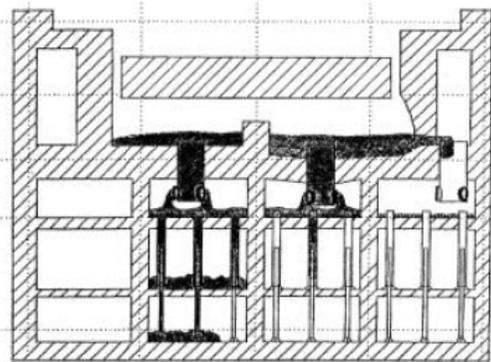
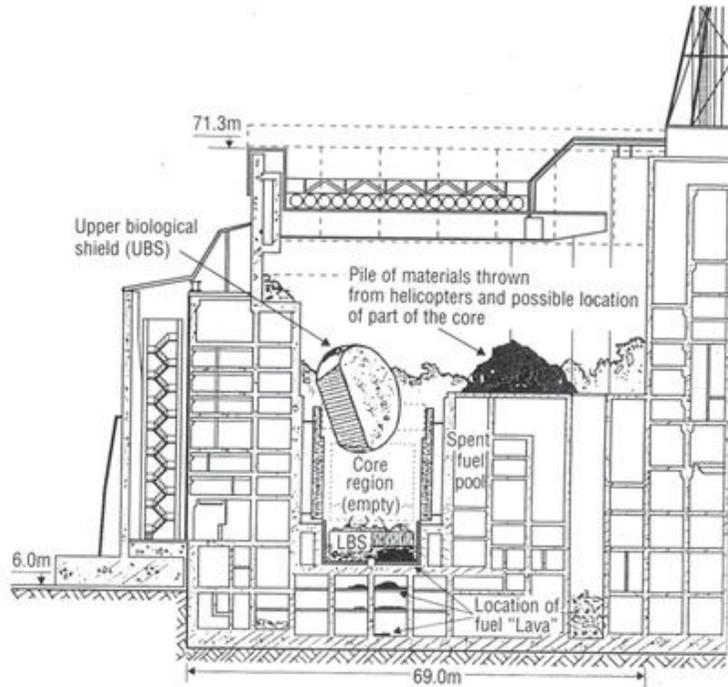
Il reattore esploso



Immagini dell'impianto distrutto. In senso orario a) incendio appena domato, b) hall del reattore, c) edificio turbine, d) lato nord edificio reattore



La distruzione del reattore

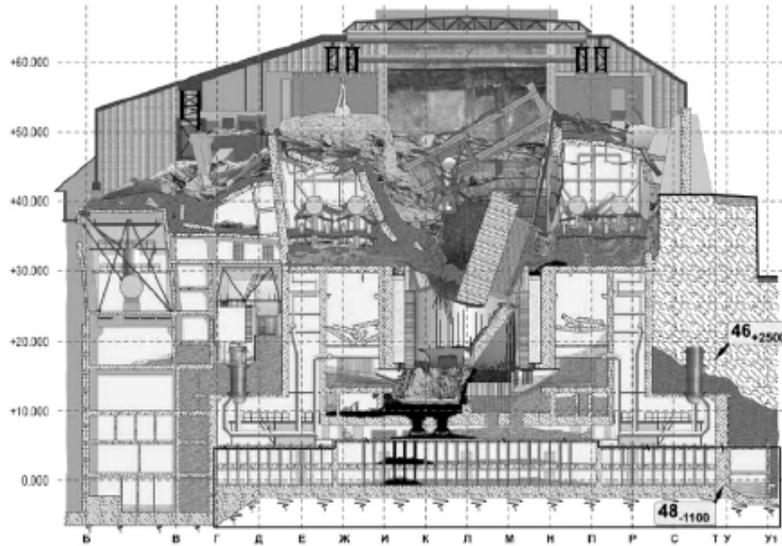


Ripulitura e decontaminazione del sito

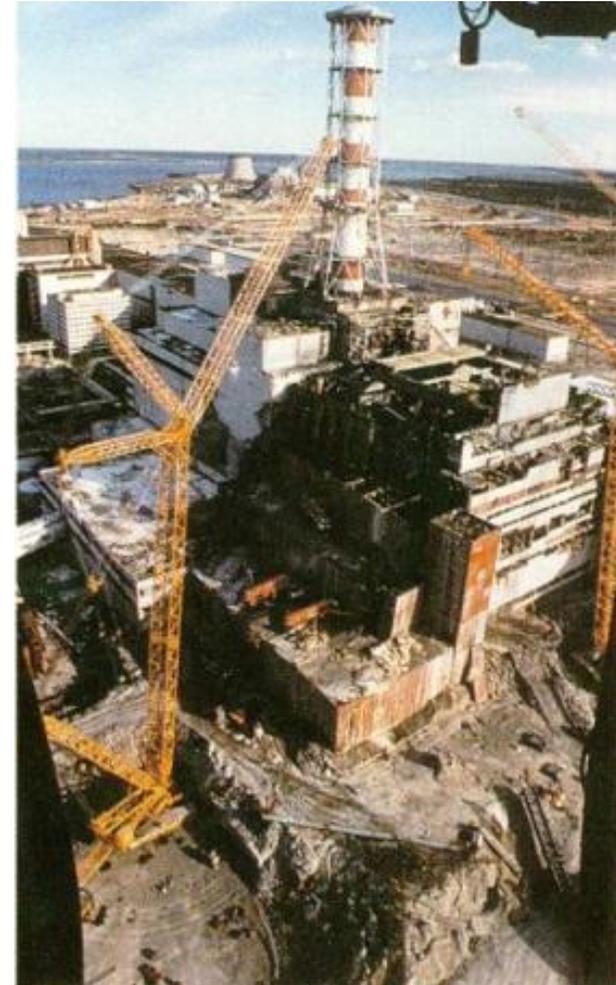
- Pesante la decontaminazione del sito e i lavori per schermare efficacemente il reattore esploso e rimettere in funzione gli altri 3 reattori.
- Furono coinvolti circa 200mila persone (i liquidatori), poi saliti a 600mila.
- La maggior parte di essi ricevette basse dosi:
 - in media 100 mSv,
 - 20mila arrivarono a 250 mSv
 - ma, nei primi giorni, alcuni arrivarono a 500 mSv



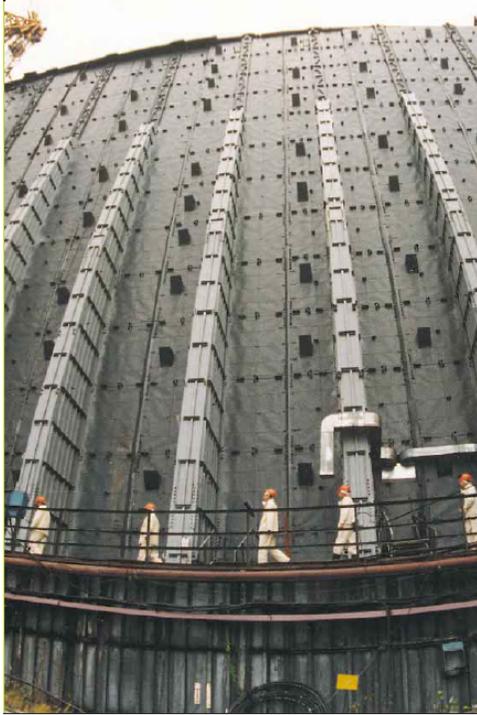
Costruzione del sarcofago di protezione



- Subito si iniziò a lavorare alla costruzione di un nuovo basamento di rinforzo in calcestruzzo dotato di un sistema di refrigerazione autonomo sotto il reattore incidentato. La costruzione del basamento impegnò circa 400 operatori per 15 giorni, e fu portato a termine con successo.



Il sarcofago attuale e il prossimo



The damaged Chernobyl plant in 1992. The accident led to the first in-depth study of the long-term effects of low-level nuclear radiation, carried out by UNSCEAR.

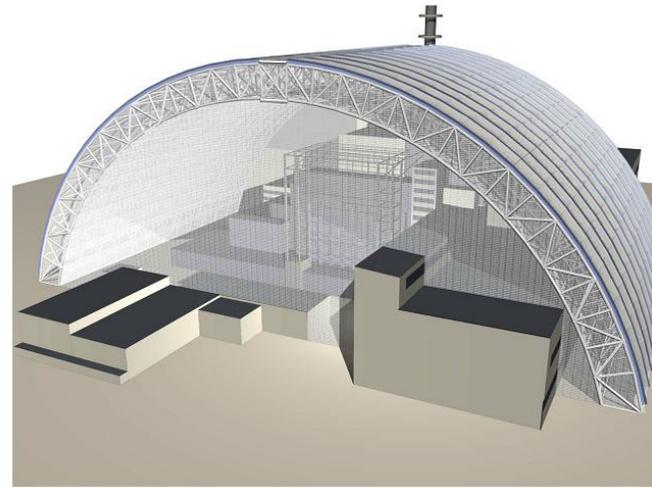
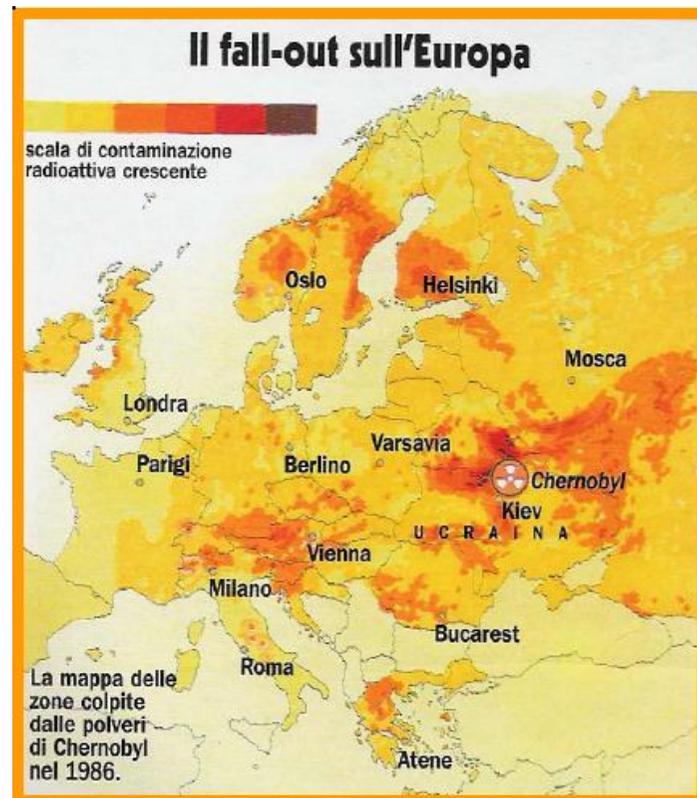


FIG. 6.6. Planned New Safe Confinement (NSC).

La contaminazione radioattiva

- La fuoriuscita del materiale radioattivo ebbe luogo come gas, vapori, polveri sospese e combustibile frammentato.
- Le stime condotte collocano il rilascio in atmosfera al 100% dei gas nobili accumulati in reattore (xeno e krypton) e al 3,5% circa del materiale costituente il combustibile, equivalente a circa 6 tonnellate di combustibile frammentato e polverizzato. Furono in tal modo liberati circa 11 EBq di radioattività.
- Vaste aree furono interessate a livelli di deposizione superiori ai 40 kBq/m² di Cs¹³⁷. L'area più contaminata è inclusa nel cerchio di 30 km di raggio intorno al reattore, dove generalmente si superano 1,5 Mbq/m² di Cs¹³⁷.
- Si raggiunsero anche punte di 5 MBq/m².
- Circa 3.100 km² di territorio sovietico arrivarono a livelli di contaminazione superiori a 1,5 MBq/m² di Cs¹³⁷,
- 7.200 km² a livelli compresi tra 0,6 e 1,5 MBq/m² di Cs¹³⁷ e
- 103.000 km² a livelli tra 0,04 e 0,2 MBq/m².

Il fall-out in Russia e in Europa



Areas of Europe contaminated with Cs^{137} (km²)^[60]

Country	37-185 kBq/m ²	185-555 kBq/m ²	555-1480 kBq/m ²	+1480 kBq/m ²
Russia	49 800	5 700	2 100	300
Belarus	29 900	10 200	4200	2200
Ukraine	37 200	3 200	900	600
Sweden	12 000	-	-	-
Finland	11 500	-	-	-
Austria	8 600	-	-	-
Norway	5 200	-	-	-
Bulgaria	4 800	-	-	-
Switzerland	1 300	-	-	-
Greece	1 200	-	-	-
Slovenia	300	-	-	-
Italy	300	-	-	-
Moldavia	60	-	-	-

Gestione dell'emergenza: le popolazioni nelle aree contaminate

- Le autorità locali e centrali dell'Ucraina e dell'URSS furono colte impreparate dalla gravità e dagli effetti dell'incidente, e si trovarono a gestire l'emergenza in una situazione di cronica carenza di informazioni e di continue pressioni politiche
- Nelle prime ore successive all'incidente la popolazione dell'area circostante la centrale non fu avvertita, e non fu assunta alcuna misura di mitigazione delle conseguenze sanitarie del disastro. In effetti la città di Pripjat non fu seriamente contaminata dal primo rilascio di radioattività che accompagnò l'esplosione del reattore.
- Nelle aree contaminate furono attuati subito interventi di decontaminazione ad opera di personale militare, con operazioni di lavaggio a edifici e aree residenziali, rimozione di suolo contaminato abbattimento delle polveri attraverso la costante bagnatura delle strade.
- Furono inoltre somministrati alla popolazione farmaci a base di iodio stabile, per ostacolare l'accumulo di iodio radioattivo alla tiroide

L'evacuazione nelle aree più contaminate

- Nella tarda serata del 26 aprile (a 20 h dall'incidente) si decise di trasferire i 49mila abitanti di Prypiat e si predisposero le misure per il trasporto e a sistemazione degli evacuati.
- La decisione fu comunicata alla popolazione alle ore 11 del giorno successivo 27 aprile), e l'operazione fu portata a termine fra le 14 e le 17 del 27 aprile (40 ore dopo l'incidente utilizzando circa 1200 autobus dell'azienda di trasporto di Kiev)
- Nelle prime settimane successive all'incidente furono evacuate circa 135000 persone residenti nel raggio di 30 km dall'impianto.
- Molte di queste persone hanno continuato a essere esposte anche nelle zone di trasferimento dopo l'evacuazione

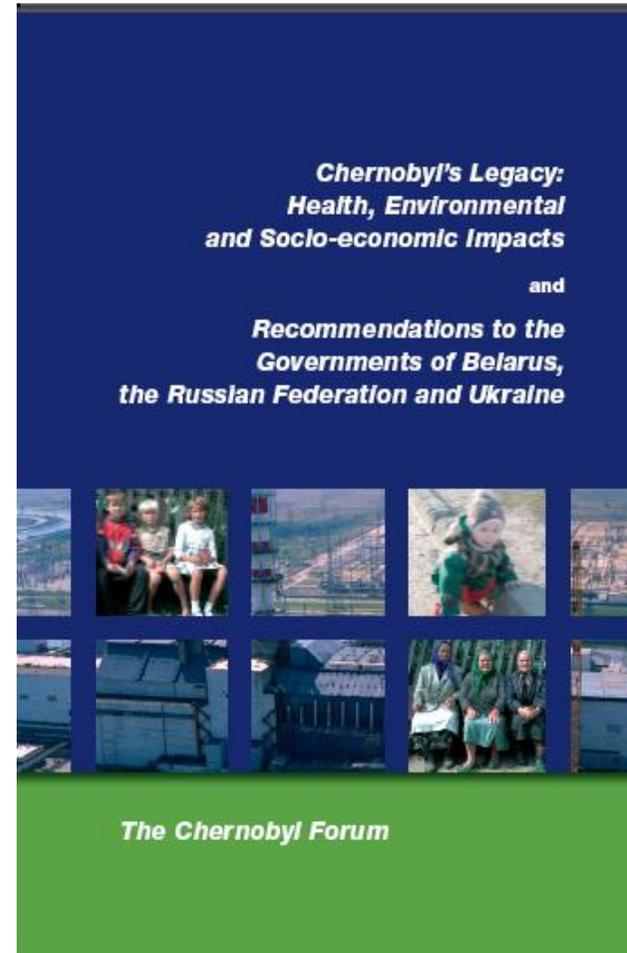
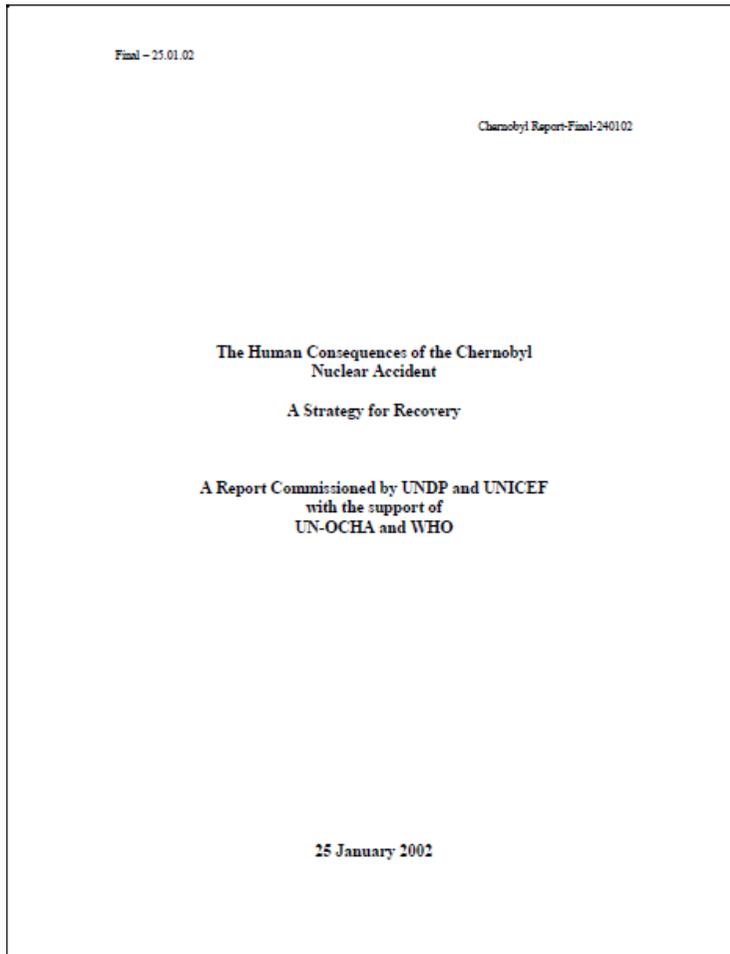


- Nel maggio '91 si evacuarono le aree della Russia interessate da una contaminazione di Cs^{137} superiore ai 1480 kBq/m² o dove la dose equivalente annuale superasse i 5 mSv, poi estese a zone con contaminazione di Cs^{137} superiore ai 105 kBq/m²
- Queste nuove misure cautelative condussero nel 1991 all'evacuazione temporanea di circa 250.000 abitanti.

Le cause dell'incidente: caratteristiche intrinseche del reattore RBMK ed errori umani

- Le inadeguatezze tecniche e progettuali ebbero un peso rilevante nella determinazione della cause e sull'evoluzione di un incidente, cui quel reattore poteva considerarsi predisposto per:
 - **instabilità del reattore a bassa potenza,**
 - **bassa velocità di inserimento e disegno delle barre di arresto del reattore,**
 - **mancanza di un'efficace struttura di contenimento** (favorì il rilascio in atmosfera di un'enorme quantità di radioattività)
- Valutazione assolutamente inadeguata dell'**esperimento** all'origine dell'incidente, **che mai si sarebbe dovuto fare su impianto collegato a un reattore**
- **Interventi indebiti degli operatori. Ma nessuno aveva avvertito gli operatori di quei rischi;** più volte il personale agì *inconsapevolmente*, quindi non addestrato
- **Assenza di un'Autorità di controllo indipendente** che vigilasse sulla sicurezza degli impianti e loro esercizio

Le conseguenze sanitarie 20 anni dopo, come risultato dell'intenso lavoro fatto sul campo da Russia, Ucraina e Bielorussia con l'assistenza delle Nazioni Unite (IAEA, WHO ecc.)



Effetti sanitari da irraggiamenti acuti

- Nel giorno stesso dell'incidente e nei giorni immediatamente successivi furono ricoverati in ospedale, colpiti da sindrome acuta da radiazioni 237 operatori appartenenti al gruppo intervenuto sull'impianto per limitare le conseguenze sul disastro, suddivisi in funzione della dose in:

Gruppo 1,	dose tra 6-16 Gy,	persone 21	decedute 20
Gruppo 2,	dose tra 4-6 Gy,	persone 21	decedute 7
Gruppo 3,	dose tra 2-4 Gy	persone 55	decedute 1
Gruppo 4,	dose < 2 Gy	persone 140	decedute 0
- Nei quattro mesi successivi all'incidente persero la vita complessivamente 28 dei 237 ricoverati, portando a 31 il numero complessivo delle vittime per effetti acuti dello incidente (3 morti il giorno dell'incidente a causa dell'esplosione)
- Nessun membro della popolazione civile, invece, evidenziò sintomi di sindrome acuta da radiazioni.

Il dramma dei tumori alla tiroide

- Circa 4000 bimbi, nati intorno al periodo dell'incidente, furono affetti da tumore alla tiroide, risolto per la maggior parte di loro. Ma nove morirono, portando a 56 i morti accertati al 2004.
- Si tratta di malattia endemica in zone rurali distanti dal mare. Un tumore curabile. Gli interventi fatti e le strutture create permetteranno di ridurre sensibilmente vittime future
- Nessuno al di fuori del sito della centrale soffrì per effetti acuti di radiazioni o per specifiche forme tumorali. Tuttavia vaste aree della Bielorussia, dell'Ucraina e della Russia risultarono contaminate in differente grado.
- Un rapporto delle Nazioni Unite, del 2000, concluse che non vi era alcuna evidenza scientifica di conseguenze sulla salute a causa di effetti delle radiazioni per la popolazione esposta. In particolare nessun incremento di leucemie, come ci si sarebbe aspettati.
- Questo venne confermato da un più accurato accertamento compiuto negli anni 2005 e 2006. Peraltro risultò impossibile identificare qualche migliaio di vittime per tumori da radiazioni, essendo di oltre centomila i morti per tumori in quelle zone per altre cause.
- Il disastro di Chernobyl è stato l'unico evento, e il solo incidente nella storia dei reattori commerciali di potenza, dove ci siano state vittime dovute a eccesso di radiazioni.

La tragedia umana: dall' iniziale sradicamento e le incertezze sul futuro all'attuale ripresa dell'economia e della vita nella maggior parte dei territori contaminati

- Più rilevanti le conseguenze sulla popolazione evacuata soprattutto per le persone più deboli, che più avevano subito lo sradicamento, con cambiamenti di abitudini di vita e alimentari.
- Ansie e depressioni si generarono, a livello individuale, a causa di carenti informazioni e confusioni sugli effetti delle radiazioni, e, a livello sociale, in aree rurali di per sé già povere, dal concomitante crollo e depressione economica prodotta dal disfacimento dell'Unione Sovietica. L'emigrazione della parte più giovane della popolazione rese più lenta la ripresa dell'economia locale.
- Tuttavia i notevoli interventi compiuti dai tre Stati più coinvolti nell'incidente e l'ampia assistenza internazionale ha permesso, tra la fine degli anni '90 e i primi 2.000, di ribaltare la situazione di economia assistita.
- I livelli di radiazione ridottisi nel tempo di molte centinaia di volte e le contromisure prese permisero, tra la fine degli anni '90 e i primi del 2000, di restituire gran parte dei territori contaminati alle attività economiche e di tornare a vivere nelle zone circostanti l'area interdetta (circa 30km dalla centrale esplosa).
- L'agricoltura ha potuto riprendersi con produzioni dedicate a usi alimentari e pascolo nei territori ove la radioattività (essenzialmente da Cs137) era scesa sotto i limiti consentiti, e a usi industriali (legnami da costruzione, bio-combustibile) nelle zone ancora soggette a restrizioni sull'uso della terra.
- Molto istruttivo in merito il rapporto "The Chernobyl Legacy: Health, Environmental and Socio-economic Impacts"

Le lezioni per l'occidente

- Le lezioni di questo incidente, così folle quanto devastante, risultò di scarso interesse per il mondo occidentale, dati i provvedimenti già presi e in sviluppo dopo TMI-2
- Tuttavia l'incidente mise in evidenza la valenza globale del nucleare, cui fece seguito una serie di tempestivi ed efficaci interventi di assistenza per portare l'URSS a un adeguato livello di sicurezza.
- L'Italia, pur abbandonando irrazionalmente la tecnologia nucleare nel proprio paese a seguito di quell'incidente, fu in prima linea nella assistenza alla riorganizzazione del sistema di sicurezza sovietico, la comprensione della dinamica dell'incidente e la conseguente messa in sicurezza degli impianti RBMK, 15 dei quali ancora in esercizio.
- E quell'incidente fece capire che un nucleare militare sarebbe stato ancora più folle, e proprio dal "maledetto Chernobyl", con l'incontro a Reykjavik di Reagan-Gorbaciov nell'autunno dello stesso anno si avviò concretamente il disgelo e il piano di smantellamento dei missili nucleari

Pripyat, la città fantasma



A Wildlife Refuge?



FIG. 5.8. A white-tailed eagle chick observed recently in the Chernobyl Exclusion Zone. Before 1986, these rare predatory birds had rarely been found in this area. Photo – courtesy of Sergey Gaschak, 2004.



A species apart from domestic horses, Przewalski's horses were, until very recently, extinct in the wild and survived only in captivity. The world's largest program for breeding the sturdy wild horses is at the Askania Nova reserve in southern Ukraine.

La ripresa e il ritorno nelle zone evacuate



- Baba Olga, who lives in the exclusion zone



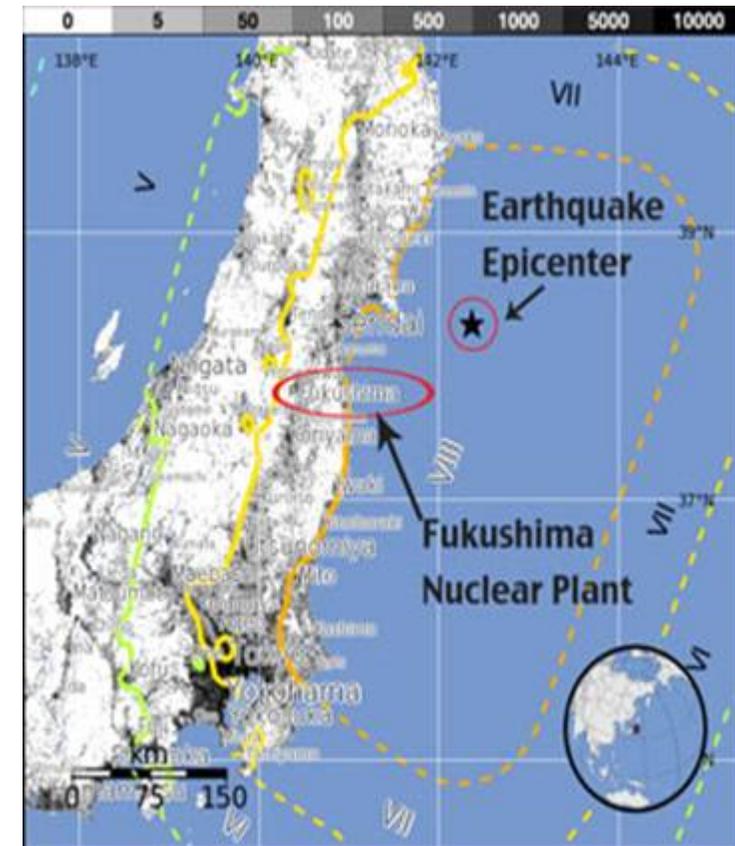
IV. Fukushima Daiichi NPP Accident (Ines 7, temp.)

Fukushima Nuclear Power Plant



Source: Tokyo Electric Power Company

Venerdì 11 marzo 2011, un terremoto di magnitudo 9 colpisce la costa Nord-Orientale del Giappone –
Gli impianti nucleari contigui all'epicentro



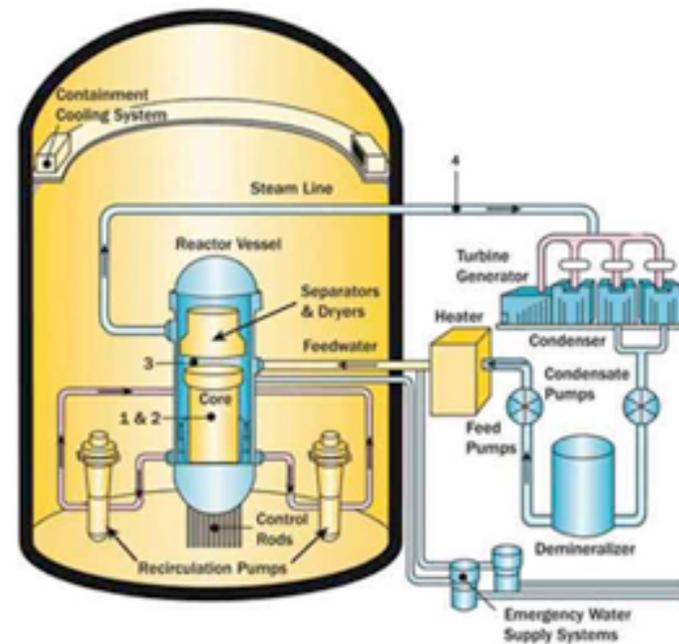
I reattori a Fukushima Daiichi

Reattori	Tipo	Modello	Potenza elettrica	Operatore	Fornitore isola nucleare	Inizio costruzione	Prima connessione in rete	Inizio esercizio	Fattore di carico 2000-2009
FUKUSHIMA-DAIICHI-1	BWR	BWR-3	440	TEPCO	GE	1967	1970	1971	48
FUKUSHIMA-DAIICHI-2	BWR	BWR-4	760	TEPCO	GE	1969	1973	1974	67
FUKUSHIMA-DAIICHI-3	BWR	BWR-4	760	TEPCO	TOSHIBA	1970	1974	1976	69
FUKUSHIMA-DAIICHI-4	BWR	BWR-4	760	TEPCO	HITACHI	1973	1978	1978	62
FUKUSHIMA-DAIICHI-5	BWR	BWR-4	760	TEPCO	TOSHIBA	1972	1977	1978	67
FUKUSHIMA-DAIICHI-6	BWR	BWR-5	1067	TEPCO	GE	1973	1979	1979	67
FUKUSHIMA-DANI-1	BWR	BWR-5	1067	TEPCO	TOSHIBA	1976	1981	1982	75
FUKUSHIMA-DANI-2	BWR	BWR-5	1067	TEPCO	HITACHI	1979	1983	1984	66
FUKUSHIMA-DANI-3	BWR	BWR-5	1067	TEPCO	TOSHIBA	1981	1984	1985	60
FUKUSHIMA-DANI-4	BWR	BWR-5	1067	TEPCO	HITACHI	1981	1986	1987	59
ONAGAWA-1	BWR	BWR-4	498	TOHOKU	TOSHIBA	1980	1983	1984	52
ONAGAWA-2	BWR	BWR-5	796	TOHOKU	TOSHIBA	1991	1994	1995	70
ONAGAWA-3	BWR	BWR-5	796	TOHOKU	TOSHIBA	1998	2001	2002	66

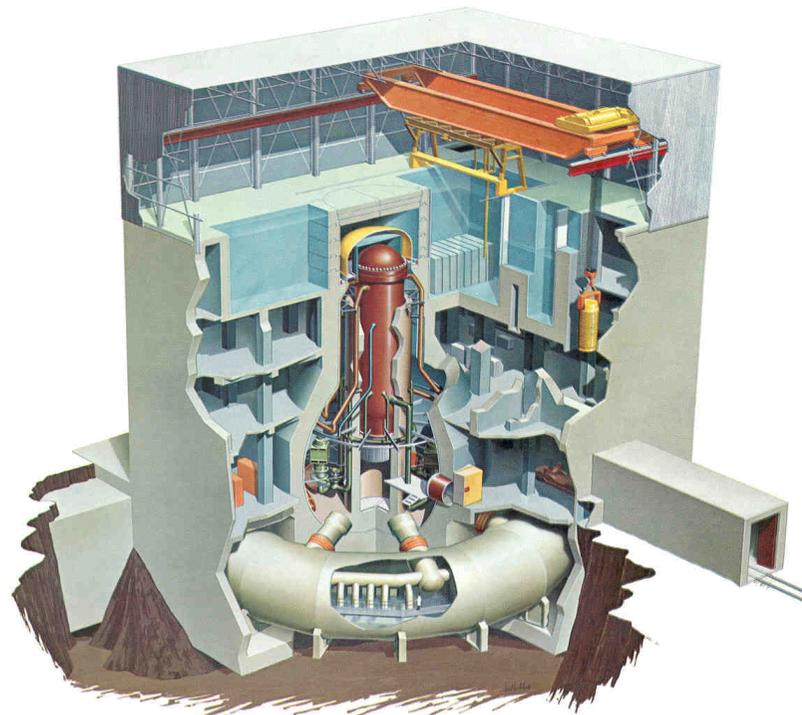
Caratteristiche degli impianti nucleari giapponesi interessati dall'evento sismico del 11 marzo 2011

BWR: Sistema refrigerazione emergenza e intercettazione contenitore

- In caso di evento esterno anomalo o di comportamento anormale del reattore le barre di controllo (in basso in figura) vengono istantaneamente e automaticamente inserite; la potenza del reattore scende al livello della potenza di decadimento dei prodotti di fissione in poche decine di secondi.
- Il circuito del vapore (punto 4) e dell'acqua di alimento sono intercettati. Il contenitore rimane isolato dall'esterno.
- Il nocciolo del reattore viene refrigerato solo attraverso il circuito di iniezione di acqua di emergenza (in basso in fig.)



Contenitore d'impianto e piscina di stoccaggio combustibile esaurito nei reattori di Fukushima (assonometria e foto in cantiere)
Dry-well a forma di pera - Wet-well a forma di toro



DRYWELL TORUS

GENERAL  ELECTRIC

GEZ-4396



en.wikipedia.org/wiki/Browns_Ferry_Nuclear_Power_Plan

Parte superiore edificio contenitore reattore - area movimentazione combustibile

The Fukushima Daiichi Incident 1. Plant Design



► Service Floor

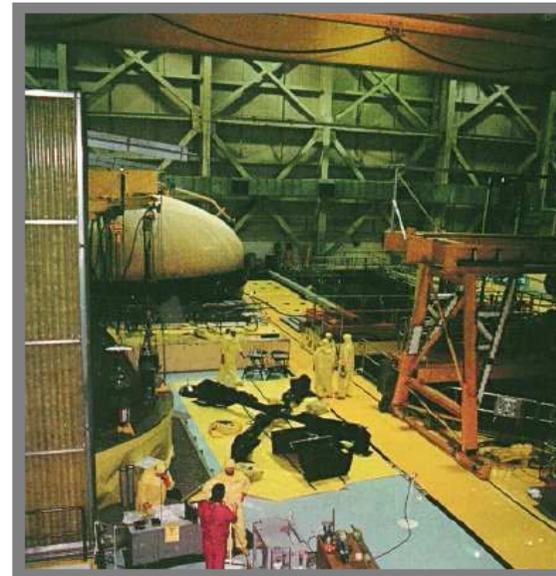
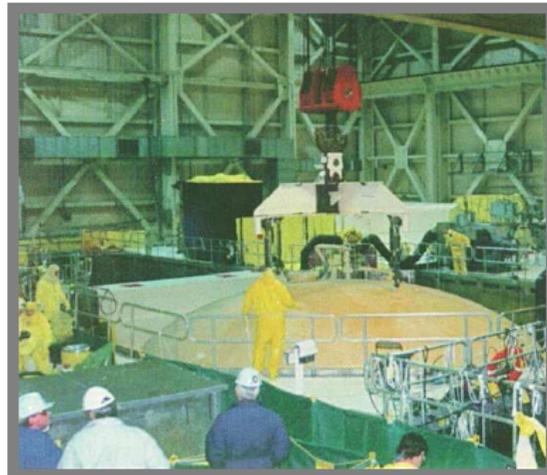


Parte superiore edificio contenitore reattore - movimentazione testa contenitore

The Fukushima Daiichi Incident 1. Plant Design

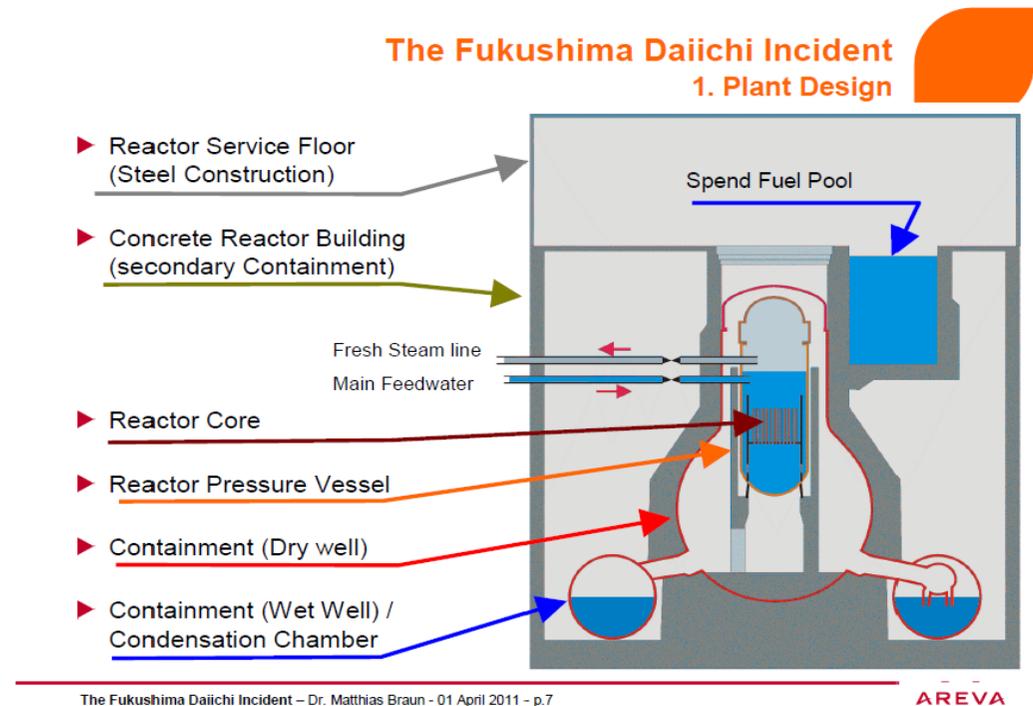


► Lifting the Containment closure head



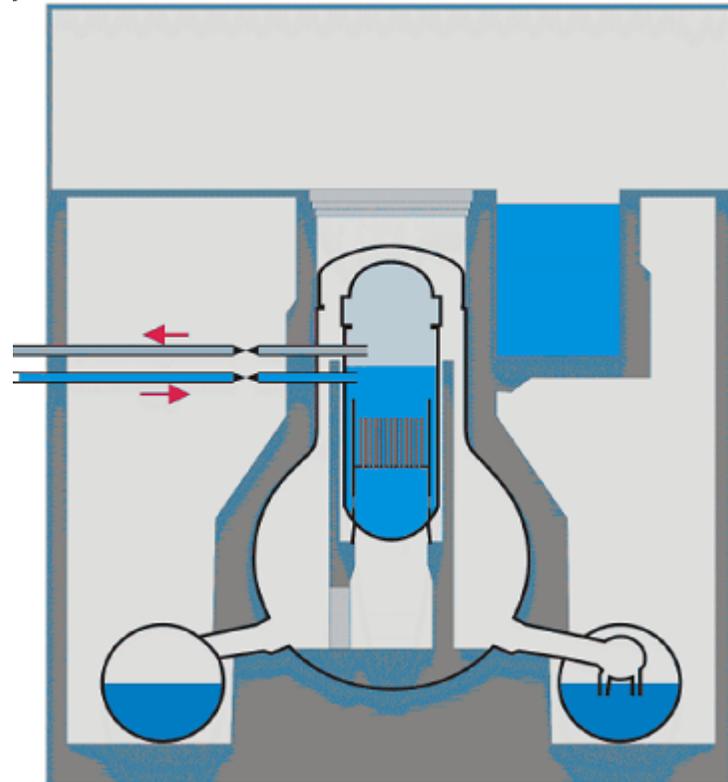
Schema edificio reattore con nocciolo, vessel, contenitore d'impianto (Dry well e Wet well), sistema refrigerazione di emergenza, piscina stoccaggio combustibile esaurito

- **Dry well:** volume per condensa vapore in caso perdita primario
- **Wet well:** serbatoio toroidale di acqua che agisce da camera di condensazione vapore

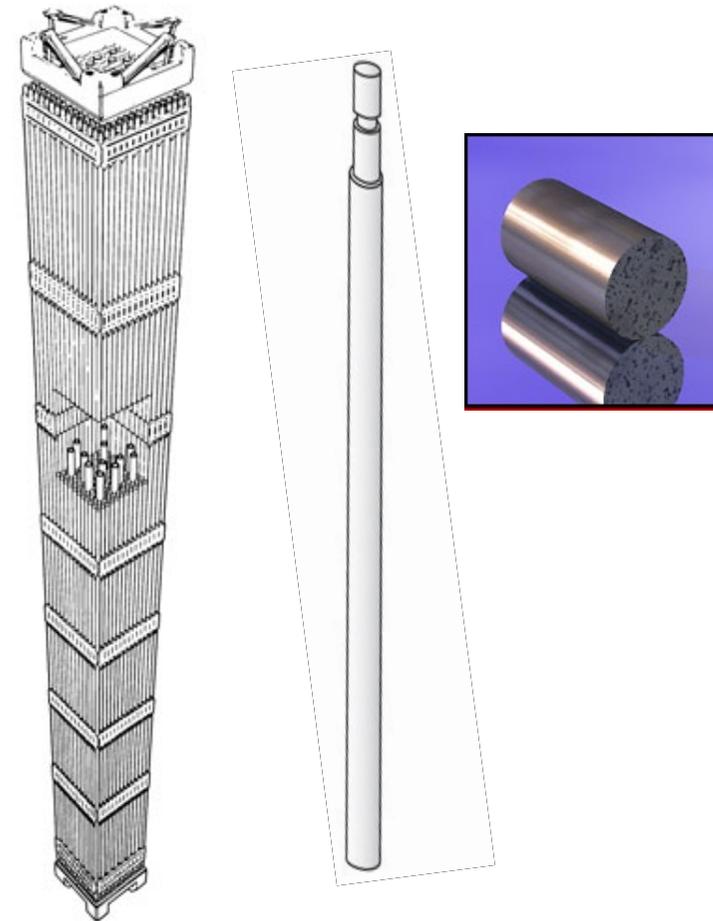
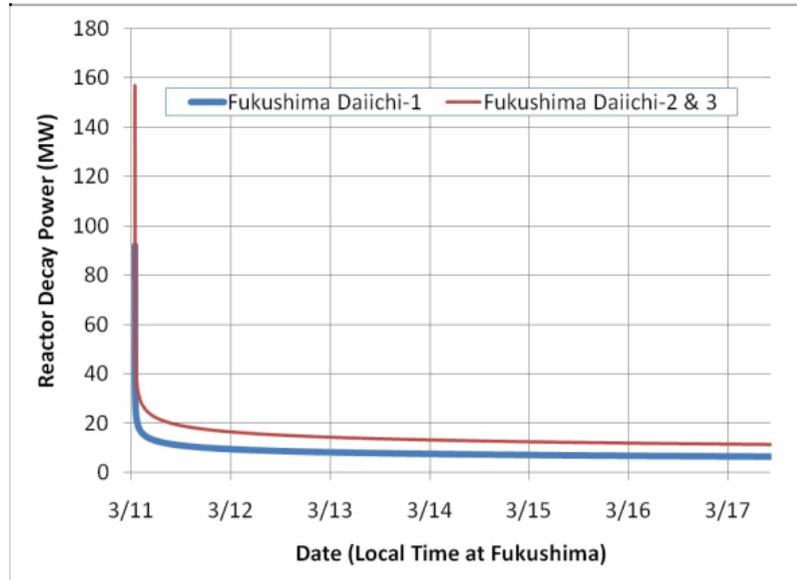


Evento iniziatore incidente

- Venerdì 11 marzo 2011, h: 15,46
- Terremoto di magnitudo 9 colpisce il Nord del Giappone
- Collasso della rete elettrica
- I reattori 1, 2, 3 non paiono subire danni, e vanno in shut-down automatico istantaneo.
- Il reattore n°4 è vuoto per manutenzione; la carica di combustibile è situata nella piscina di stoccaggio
- Si avviano automaticamente i diesel per la refrigerazione di emergenza del calore residuo di decadimento
- Gli impianto sono sicuri, in stato stabile, i contenitori isolati



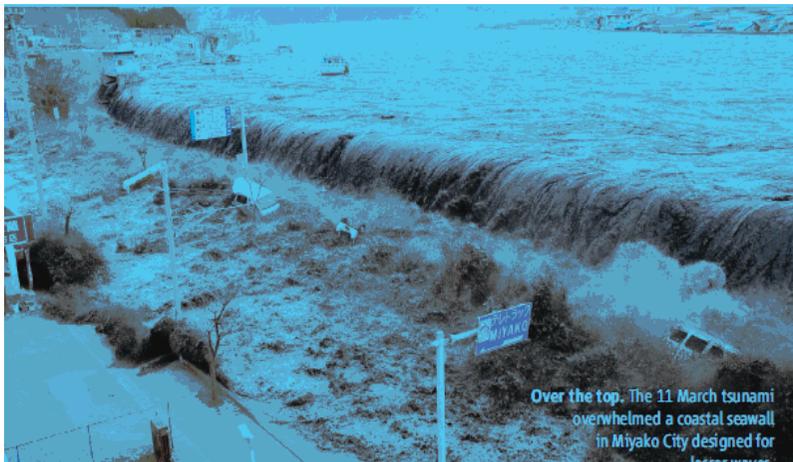
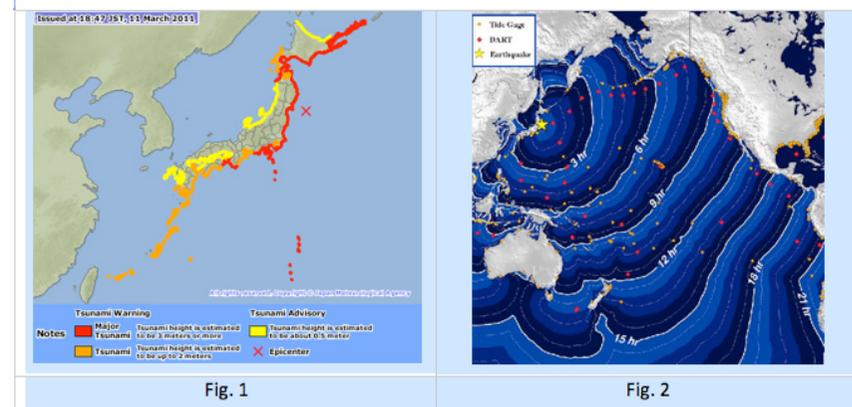
Il calore residuo di decadimento dei prodotti di fissione



- **Il calore di decadimento dei prodotti di fissione provoca, se non asportato, il surriscaldamento del combustibile sino alla sua fusione ($\sim 2800^\circ$), con rilascio massiccio di radioattività**

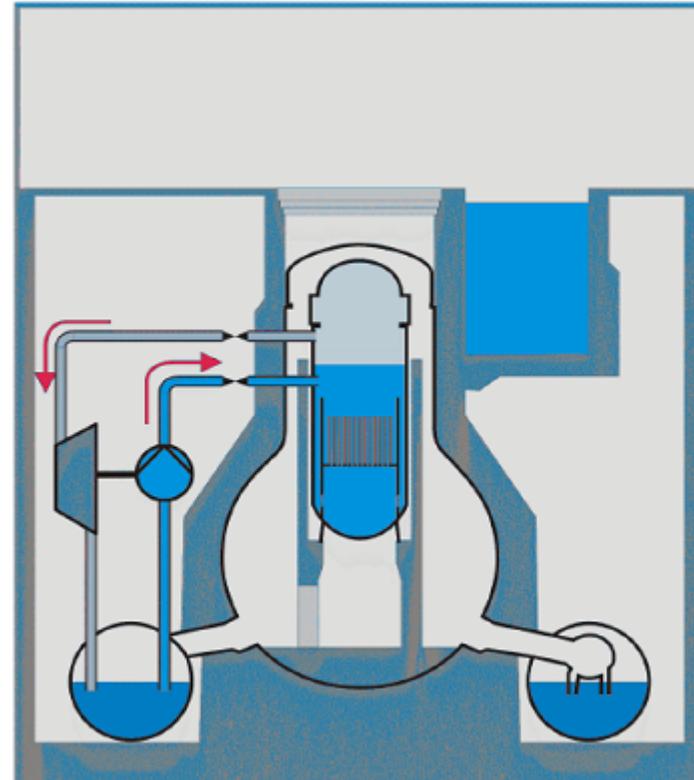
Lo tsunami colpiscel'impianto 11/3/2011 ore 15,41

- Un'onda di 14 m raggiunge il sito
- L'impianto è difeso contro un'onda di progetto di 6,5 m.
- **Perdita dei generatori di emergenza**
- **Station Blackout (elevata probabilità di incidente severo)**



Blackout di centrale, progressivo blocco della refrigerazione nei reattori 1, 2 e 3

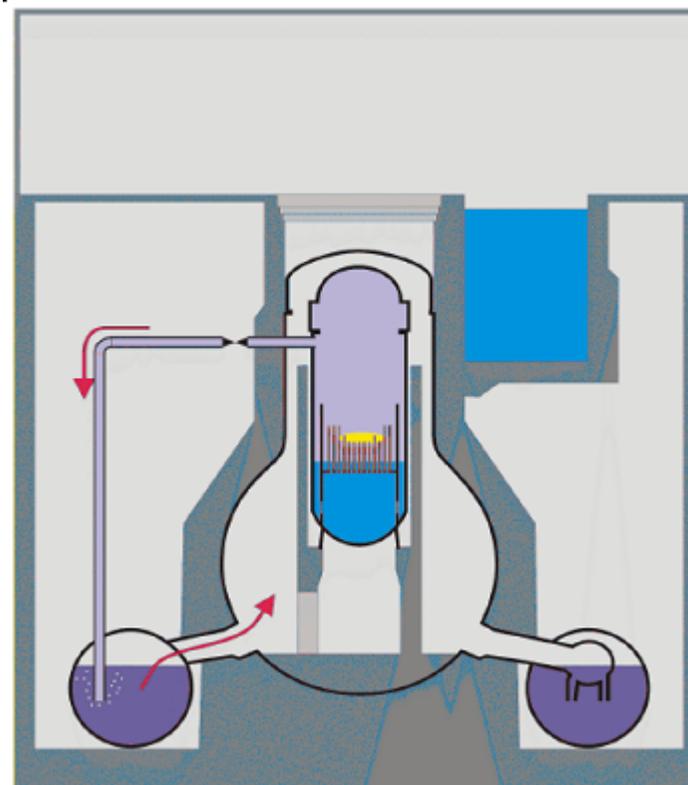
- Lo tsunami inonda l'edificio diesel e i serbatoi di combustibile
- Solo le batterie possono fornire potenza elettrica per tempi limitati:
- 11.3 16:36 blocco pompa Unità 1
(batteria scarica)
- 13.3 2:44 blocco pompa Unità 3
(batteria scarica)
- 14.3 13:25 blocco pompa Unità 2
(rottura della pompa)
- Il vapore di scarico dal reattore alimenta tramite turbina e pompa coassiale la refrigerazione da wet well (possibile finché la temperatura dell'acqua è $< 100^{\circ}\text{C}$)



Da: AREVA – The Fukushima Daiichi Incident, Dr. Matthias Braun, 2011

Progressiva scopertura del nocciolo e prime fusioni barrette di combustibile (Reattori 1, 2 e 3)

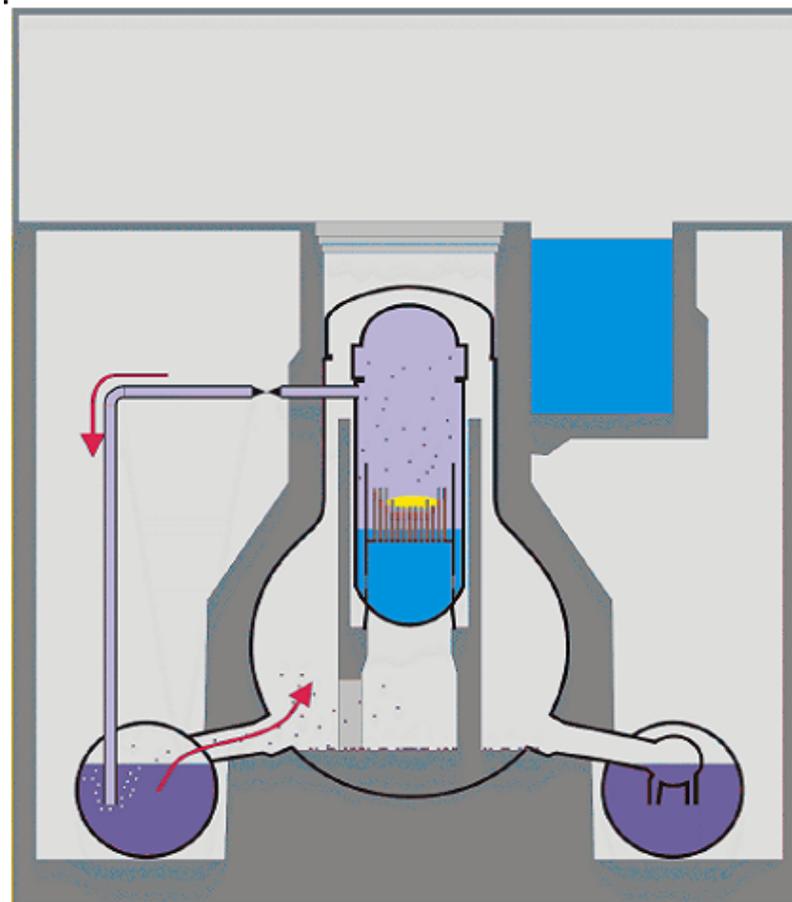
- Impossibilità di asporto calore. La pressione nei reattori sale
- Si apre la valvola di sicurezza del reattore
- Il vapore si scarica nel wet well
- Privo di acqua di alimentazione il livello in reattore scende e scopre il nocciolo
- Le barrette di combustibile si arroventano, si ossidano e a $T > 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ rilasciano idrogeno:
$$\text{Zr} + 2 \text{H}_2\text{O} = \text{Zr O}_2 + 2 \text{H}_2$$
 (reazione esotermica che riscalda ulteriormente il nocciolo)
- Vapore e idrogeno fanno salire la pressione nel wet well e da qui, apertesi le valvole, irrompono nel dry well



Da: AREVA – The Fukushima Daiichi Incident, Dr. Matthias Braun, 2011

Situazione critica bloccata solo dagli sforzi di ripristino alimentazione acqua dall'esterno

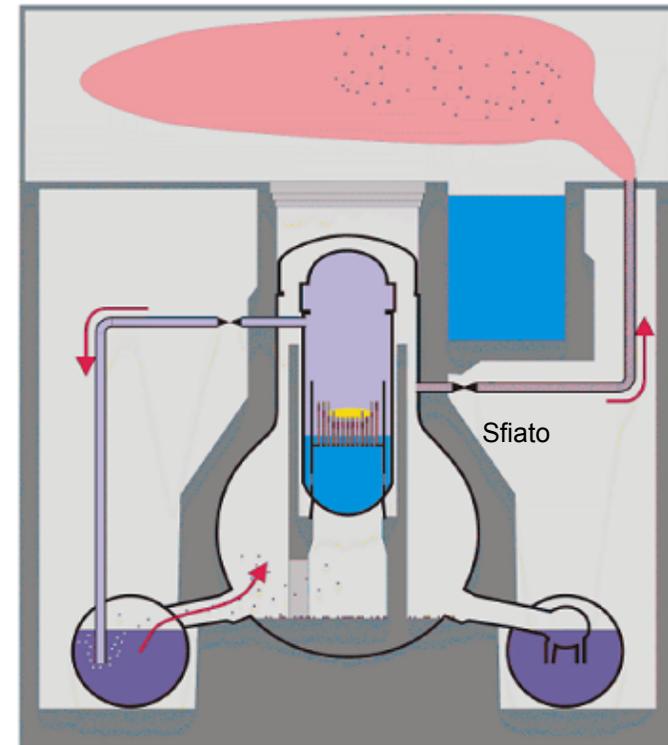
- Ripristino acqua dall'esterno ai reattori:
12 marzo, 20:20 Unità 1 (27 h senza acq.)
13 marzo, 09:38 Unità 3 (07 h " ")
13 marzo, 20:33 Unità 2 (07 h " ")
- Produzione H₂, Unità 1 300 - 600 kg,
Unità 2, 3 300 - 1000 kg
- Le barrette ad alta temperatura (1800-2500 °C) si frammentano e/o fondono, detriti e U/Pu rimangono nel nocciolo, gas nobili (Xe e Cr) e prodotti di fissione volatili (I e Cs) sono trascinati nel wet well
- Si formano aerosol radioattivi trasportati da vapore e idrogeno, parte si sciolgono nell'acqua bollente del wet well, parte si posano sulle superfici del dry well decontaminando in parte la miscela che li trasporta



Da: AREVA – The Fukushima Daiichi Incident, Dr. Matthias Braun, 2011

Sfiato del contenitore (dry well)

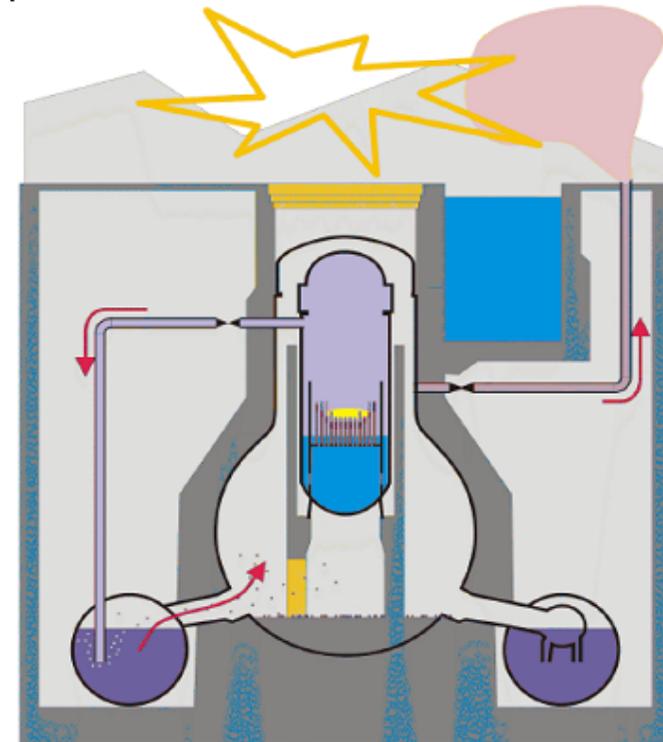
- Il contenitore è l'ultima barriera tra p.d.f. e esterno
- Esso è progettato per una pressione di 4 – 5 bar, riempito di azoto
- Vapore e idrogeno nel dry –well, fanno crescere la pressione che sale raggiungendo 8 bar
- Si sfiatano i contenitori: 12.3 h: 04.00 Unità 1
13.3 h: 00.00 Unità 2
13.3 h: 08.41 Unità 3
- Si riduce così la pressione e si asporta calore dai reattori
- Si rilasciano peraltro anche piccole quantità di p.d.f. (I e Cs) e tutti i gas nobili
- Gas viene rilasciato all'esterno, nell'edificio reattore, al piano Servizi



Da: AREVA – The Fukushima Daiichi Incident, Dr. Matthias Braun, 2011

Vapore e idrogeno sono rilasciati al piano servizi, edificio reattore

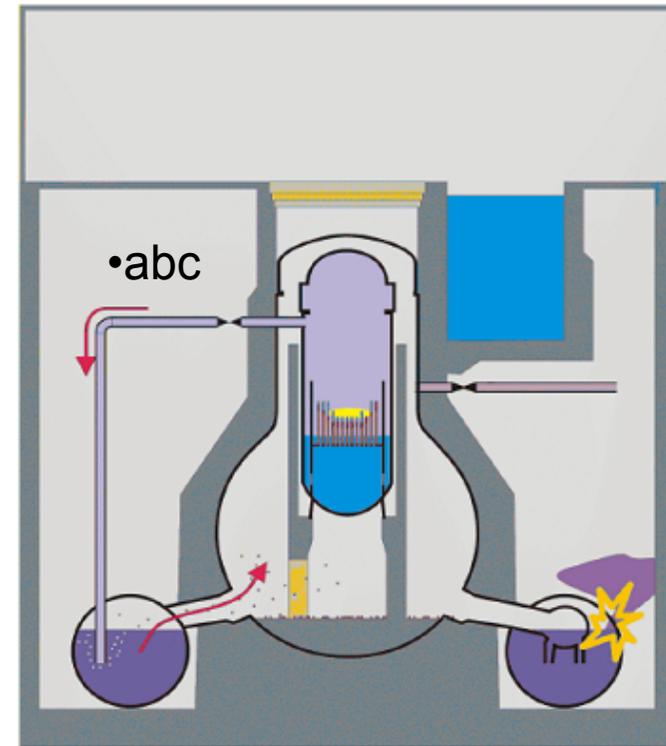
- H₂ è infiammabile ed esplosivo
- Esplosioni e incendi nelle Unità 1 e 3
- Viene distrutto il tetto in acciaio reticolato degli edifici
- Le esplosioni non paiono aver danneggiato i contenitori reattore in cemento rinforzato
- Esplosioni spettacolari con effetti minori sulla sicurezza



Da: AREVA – The Fukushima Daiichi Incident, Dr. Matthias Braun, 2011

Sviluppo dell'incidente nell'Unità 2

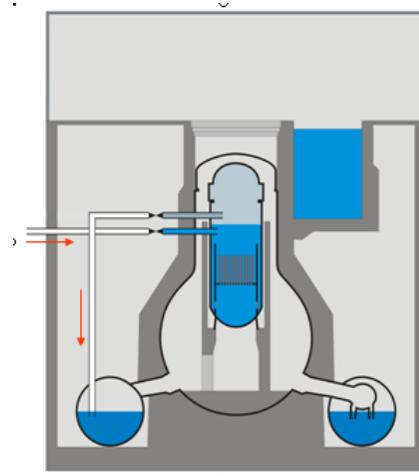
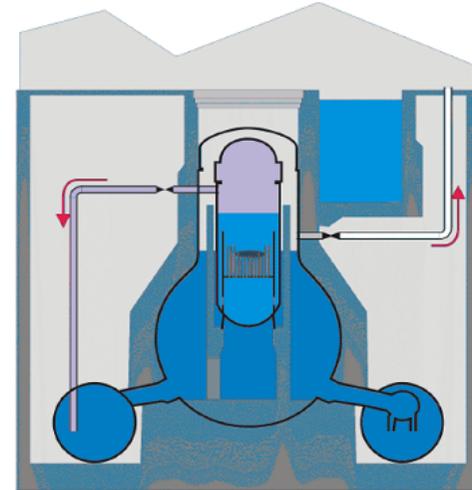
- L'idrogeno si infiamma e sviluppa un incendio nell'edificio reattore
- Probabile danneggiamento della camera di condensazione. Acqua molto contaminata
- Rilascio incontrollato di gas dal contenitore
- Elevati rilasci di prodotti di fissione nell'edificio reattore, tanto da costringere a una temporanea evacuazione dello stesso.
- Gli alti valori di dose registrati nello edificio rendono difficili gli interventi di ripristino
- Non ci sono ancora informazioni sufficienti per capire perché l'impianto si sia comportato in modo diverso dagli altri



Da: AREVA – The Fukushima Daiichi Incident, Dr. Matthias Braun, 2011

Situazione nelle Unità 1, 2 e 3

- Noccioli danneggiati, Unità 1, 2, 3
- Edifici reattore danneggiati da vari incendi, Unità 1 – 4
- Contenitori d'impianto inondati di acqua (almeno quello dell'Unità 1)
- Vessel dei reattori pieni d'acqua, riempiti con pompe mobili
 - immissione di acqua attraverso la linea di alimento (reattore 1) o la linea antincendio (reattori 2 e 3) e spurgo di vapore nel wet-well (feed and bleed)
- Ci si può aspettare ora solo esigui rilasci di prodotti di fissione

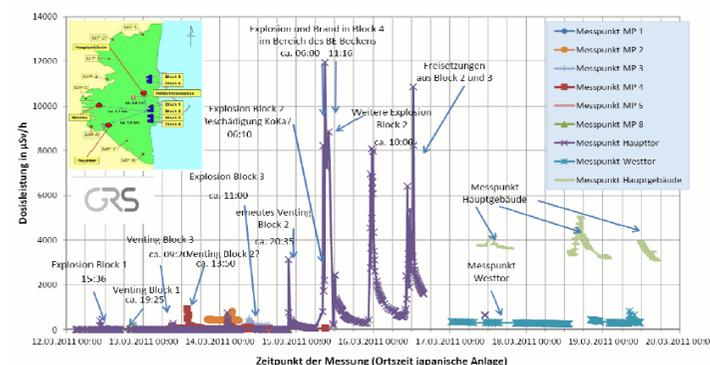


Da: AREVA – The Fukushima Daiichi Incident, Dr. Matthias Braun, 2011

I rilasci di radioattività nel sito dell'impianto

- **Prima dell'esplosione nell'Unità 2 (15 marzo)**
 - Rilasci inferiori a 2 mSv/h dovuti principalmente ai gas nobili
 - Possibili influenza direzione del vento nel ridurre le dosi misurate
- **Dopo l'esplosione nell'Unità 2**
 - Picchi temporanei di 12 mSv/h di origine non interamente chiara
 - Picchi locali in sito fino a 400 mSv/h (in corrispondenza di detriti-macerie?)
 - Dose stabile attuale al sito di 5 mSv/h
- **Necessaria la limitazione del tempo di intervento lavoratori**
 - Causa più alte dosi negli edifici

The Fukushima Daiichi Incident 3. Radiological releases

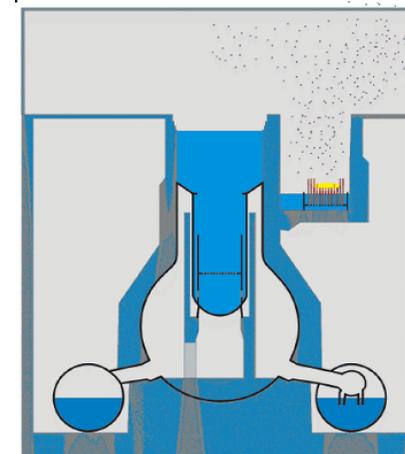
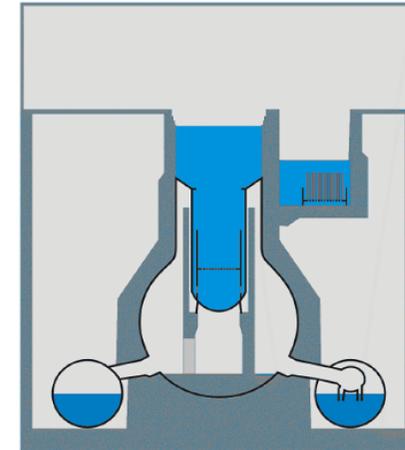


Rilasci esterni al sito

- **All'esterno dell'impianto**
 - La maggior parte dei contenitori è rimasta intatta, per cui le dosi principali rilasciate erano dovute ai gas nobili che si diluiscono rapidamente nell'atmosfera
 - Non c'è fall-out di gas nobili, quindi ridotta anche la contaminazione al suolo
 - Altri pdf (I, Cs ecc.) hanno col vapore formato aerosol pesanti con ricadute essenzialmente in prossimità degli impianti
- **Oltre 20 km dall'impianto**
 - Corretta e adeguata l'evacuazione della zona
 - Dose massima registrata di 0,3 mSv/h per brevi periodi
 - Possibile la distruzione della produzione agricola e casearia di quest'anno
 - Probabilmente non necessaria alcuna evacuazione permanente dalla terra

Il combustibile esaurito nelle piscine di decadimento

- Il combustibile esaurito, scaricato dal reattore, viene collocato nelle piscine attigue poste sul piano servizi
- A seguito di manutenzione del reattore n° 4 l'intero suo nocciolo era collocato nella piscina attigua
- Le quantità di acqua nelle piscine è tale che, anche in assenza di refrigerazione, essa non sarebbe evaporata in meno di
 - 10 giorni, per la piscina dell'Unità 4
 - alcune settimane, per le piscine delle Unità 1, 2 e 3
- Quindi possibili perdite da fessure o in guarnizioni causate dal terremoto?
- Le conseguenze in tal caso diventano pesanti:
 - fusione del combustibile in aree non protetta
 - difficoltà di trattenere i prodotti di fissione
 - grandi rilasci
- Le prime misure fatte sulla piscina del reattore n° 4 non rivelano però alti rilasci di prodotti di fissione



Esplosioni e incendi di idrogeno



Evacuation Status

- Evacuation zones around Fukushima Dai-ichi and Fukushima Dai-2, are 20 km and 10 km respectively, with overlap.
- Approximately 185 000 people living in the these zones have been evacuated.

Slightly Contaminated Individuals

- 23 of 133 monitored individuals leaving the area showed some level of contamination. These individuals were decontaminated (using soap and water) and sent to the evacuation center.

Rischi radiologici operatori e popolazione

- tre deceduti a causa terremoto e tsunami, più circa 15 persone ferite a causa delle esplosioni di idrogeno, circa 15
- tre operatori contaminati ai piedi con dosi locali (β) di 2-3 Sv, modesto eritema e nessuna altra conseguenza
- 21 operatori con esposizione fino ad una dose massima di 170 mSv dose entro l'intervallo della soglia "epidemiologica" dei cosiddetti effetti stocastici,
- alcune centinaia di individui della popolazione contaminati di fino a valori del centinaio di migliaia di becquerel, senza alcuna conseguenza sanitaria;
- contaminazione della tiroide con valori inferiori a 0,2 mSv, cioè di nessun significato sanitario
- contaminazione del territorio a valori variabili, ma in ogni caso inferiori a 1400 Bq/m² di I¹³¹ e 500 Bq/m² di Cs¹³⁷, valori di picco del 31 marzo, che sono rapidamente decaduti a valori dell'ordine della decina di Bq/m²;
- Il quadro sanitario, anche agli effetti di future sviluppi è oggi attentamente monitorato e in futuro potrà fornire ulteriori dati a conferma dei modesti effetti delle contaminazioni riscontrate

Tutto ciò va però confrontato con le devastazioni causate da terremoto e tsunami (14.000 morti e 14.000 dispersi)
mai visto nulla di simile



e questo nell'area circostante all'impianto



Like many coastal zones in northeastern Japan, the area near the nuclear power plant was utterly devastated (Image: Tepco)

Competenze specifiche e robotizzate per interventi su incidenti severi



Concrete pump truck used to collect samples from the Fukushima Daiichi 4 spent fuel pool (Image: [Tepco](#))



The [PackBots](#) make their way into the reactor building of unit 3 at Fukushima Daiichi

Persiste emergenza per immagazzinamento e trattamento acqua contaminata edificio Reattore 2

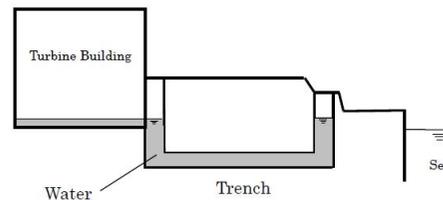
- Acqua altamente contaminata penetra va in un cavidotto e attraverso una falla, ora bloccata, usciva in mare
- Grandi quantità di acqua gettate sulle piscine e sui reattori per il raffreddamento e abbattere la radioattività
- Per recuperare volumi necessari per acqua molto contaminata, scaricate in mare 11500 ton di acqua debolmente contaminata.



This leak to sea has now been plugged, water levels are rising within the building and must be dealt with



Concrete poured into the shaft in attempts to stop the crack



the position of the trenches



The Mega-Float as a fishing park (Image: Shizuoka City)

Previsioni per il ripristino della centrale di Fukushima Daiichi

- Sulla base di un Piano di Intervento esposto il 18 aprile 2011 dalla Tokyo Electric Power Co (Tepco), proprietaria della centrale, **si prevede di riportare sotto controllo gli impianti nucleari di Fukushima Daiichi entro un periodo da sei a nove mesi**
- di avere cioè sotto controllo il rilascio di ogni materiale radioattivo e “significativamente ridotto” le dosi di radiazione
- lavori per i quali permangono ancora non poche incertezze e rischi



The damaged Fukushima Daiichi plant (Image: Tepco)

Prime azioni annunciate

- **Tutti i paesi hanno annunciato revisioni degli standard e verifiche sugli impianti esistenti**
- **I paesi EU hanno concordato di effettuare degli stress test:**
 - **Rivalutazione degli eventi esterni, in particolare per rischio di perdita della rete elettrica**
 - **Affidabilità delle sorgenti interne in caso di perdita della rete esterna**
 - **Possibilità di rimozione del calore di decadimento dal reattore, dal contenimento e dalla piscina del combustibile irraggiato**
 - **Disponibilità di personale qualificato per gestire gli incidenti sul lungo termine**

Spunti per ulteriori riflessioni

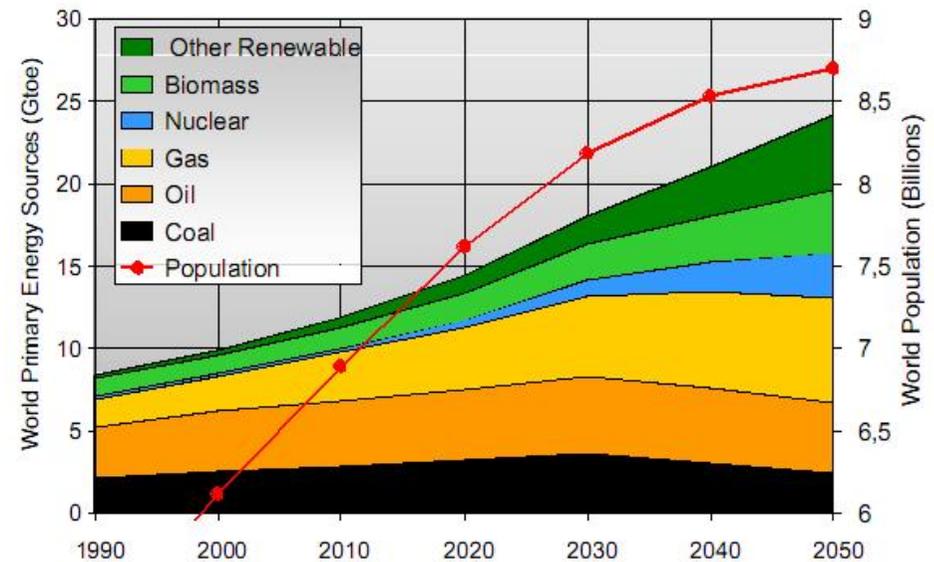
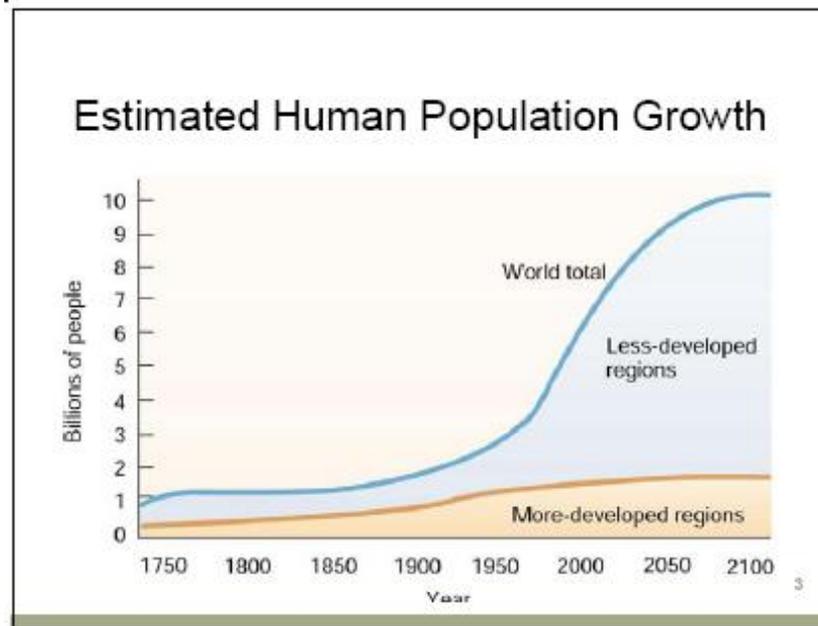
- L'incidente di Fukushima, pur avvenuto con impianti vecchi e nel contesto di un evento naturale di estrema gravità, dimostra che persistono ancora smagliature nel sistema di sicurezza.
- Il nuovo nucleare non può basarsi solo su difese passive (generazione III), ma deve essere anche in grado di controllare gli incidenti severi, una volta avvenuti.
- Occorre pertanto sviluppare misure particolari di gestione, che diano ampia confidenza di essere in grado di fronteggiare anche eventi "*inverosimili*", sia negli impianti nucleari sia negli altri impianti industriali ad alto rischio, minimizzando le conseguenze degli incidenti alle popolazioni

V. Considerazioni finali sull'Energia Nucleare

Avviandomi a concludere

- Non è affatto facile, né senza conseguenze, pensare di escludere l'energia nucleare
- I problemi che l'umanità dovrà affrontare sono sempre più complessi e globali, indipendentemente dalle posizioni assunte in Italia
- Anche in Italia l'energia nucleare dovrà essere sempre meglio conosciuta, senza assurde demonizzazioni
- La **politica della paura** è controproducente e, nei tempi lunghi, tragica

Previsioni di crescita della popolazione e della domanda di energia



Perché anche noi abbiamo bisogno dell'energia nucleare

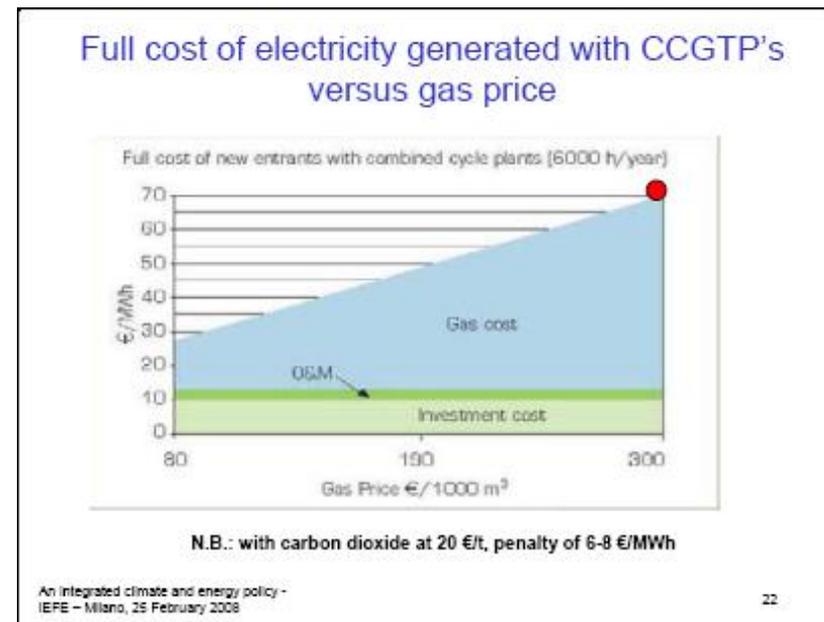
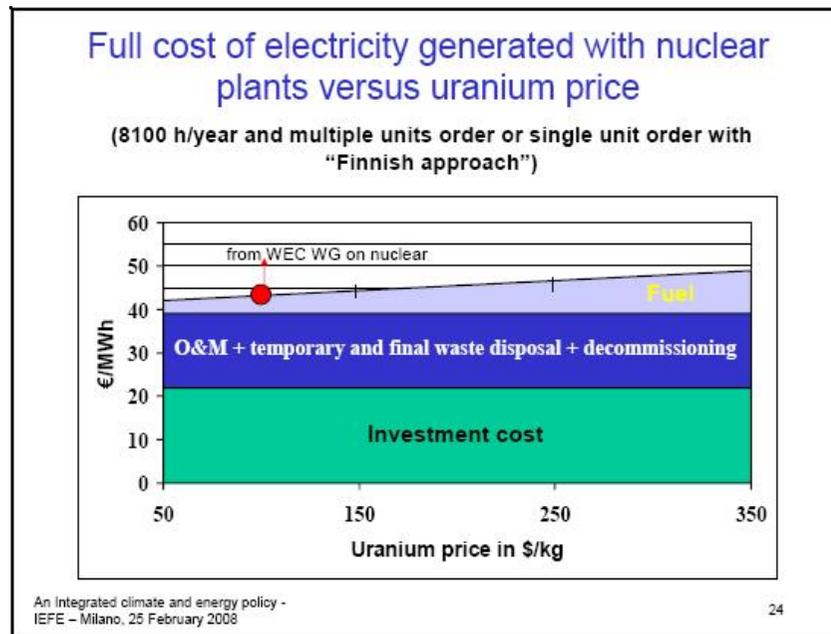
- L'energia nucleare comporta alti investimenti privati immediati con forte ricaduta occupazionale non precaria, e di alta qualità.
- Il costo del combustibile incide poco sul costo del kWh, che quindi risulta poco sensibile a suoi possibili futuri aumenti
- E' la fonte energetica col minimo numero di vittime nell'intero ciclo
- Permette di sostituire costi all'estero di materie prime energetiche con lavoro e forniture italiane
- Con i suoi sviluppi tecnologici (IV generazione) è in grado di assicurare un 'energia rispettosa dell'ambiente per molti secoli

Pericolosità delle varie fonti energetiche

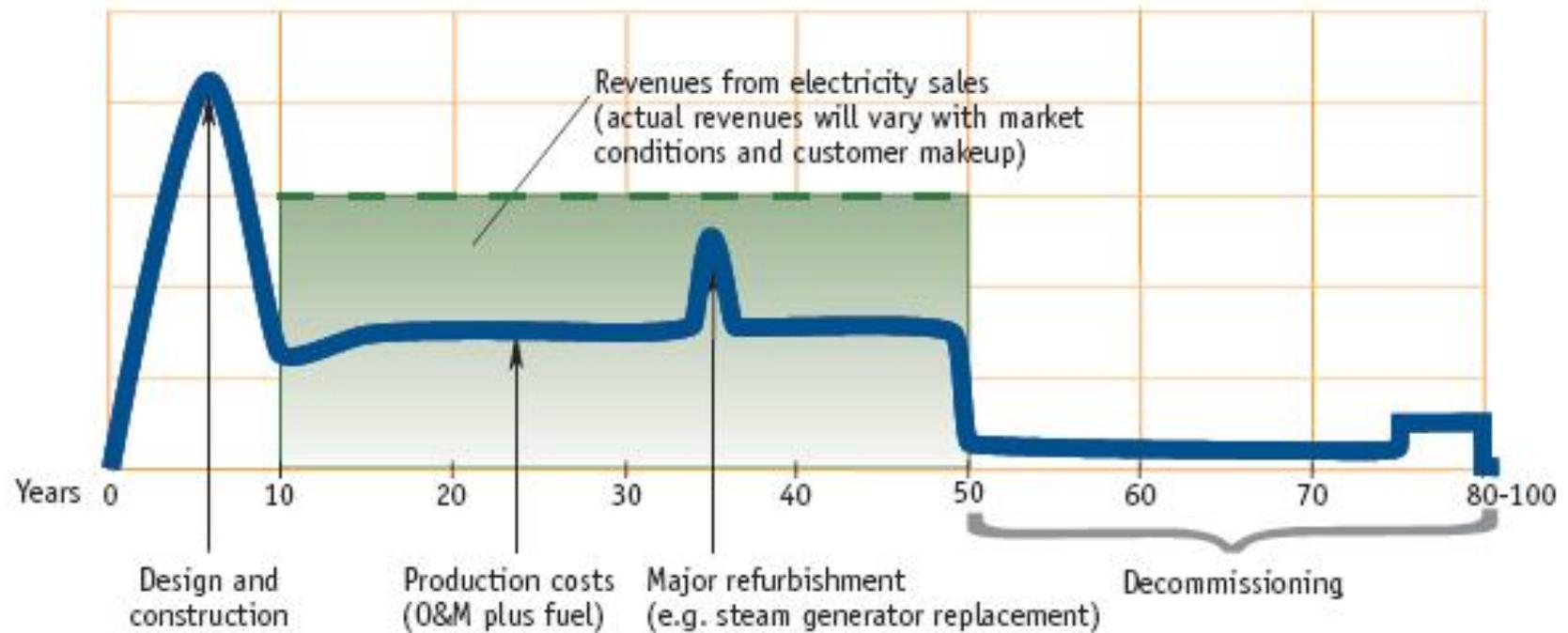
Combustibile	Tasso di mortalità (per TWh prodotto)
• Carbone	161
• Petrolio	36
• Gas	4
• Torba/Biomasse	12
• Idroelettrico	1,4
• Nucleare	0,04

Fonti: E.U. Commission
World Health Organisation

Variazioni del costo del Kwh_e nucleare e da impianto a gas col prezzo del combustibile



Cash Flow of a Nuclear Power Plant



L'energia nucleare in Italia

- L'energia nucleare in Italia non si potrà fare senza un largo consenso dei cittadini. Nulla è stato fatto ancora per informare correttamente i cittadini.
- Abbiamo bisogno di organismi autorevoli, e tra questi, in primo luogo, un'Autorità della Sicurezza preparata e qualificata
- Ma senza energia nucleare, e la capacità di controllarla, siamo un paese senza futuro
- In sua assenza il prossimo futuro sarà dominato dai combustibili fossili, con tensioni enormi sui prezzi ed elevate conflittualità
- Abbiamo urgente bisogno di un Piano Energetico Strategico
- Oggi ci avviamo a pagare 5-6 miliardi di euro l'anno per 20 anni, per sovvenzionare pochi punti percentuali di energia da fonti rinnovabili, peraltro prodotte con tecnologie obsolete
- Dovremo importare (un non senso importare energia elettrica, come ancora stiamo facendo) e pagare sempre più l'energia

Grazie per l'attenzione



Bibliografia

- Nuclear Energy Today , OECD Nuclear Energy Agency 2005
- Rapporto Kemeny, 1979
- Rapporto INSAG (International Nuclear Safety Advisory Group), Energia Nucleare, Anno 1 n° 3, ENEA, Dicembre 1986
- Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts, (IAEA) 2005
- Human Consequencies of the Chernobyl Nuclear Accident. A Strategy for Recovery, (IAEA) 2002
- Ugo Spezia, “Chernobyl 25 anni dopo”, 21^{mo} Secolo 2006
- AREVA – The Fukushima Daiichi Incident, 2011
- Documenti e schede sugli incidenti e loro effetti, delle principali Organizzazioni Internazionali, quali :
- International Atomic Energy Agency, World Nuclear Association, OECD-Nuclear Energy Agency, World Health Organization, reperibili nei rispettivi siti