



Chernobyl e Fukushima

marzo 2025

La centrale di Chernobyl

Sede: Pripyat, Ucraina

4 reattori RBMK (Reaktor Bol'shoi Moshchnosty Kanal'nyi) da 1GWe (3,2 GWt)

R1 1970-77, R2 1973-78, R3 1976-81, R4 1979-83,

R5 e R6 in costruzione

fonte idrica: fiume Pripyat

pozzo termico: fiume Pripyat



Fukushima Daiichi

Sede: Ōkuma

6 reattori BWR (boiling water reactor)

R1 1967-70, 460 MWe

R2 1969-73, R3 1970-74,

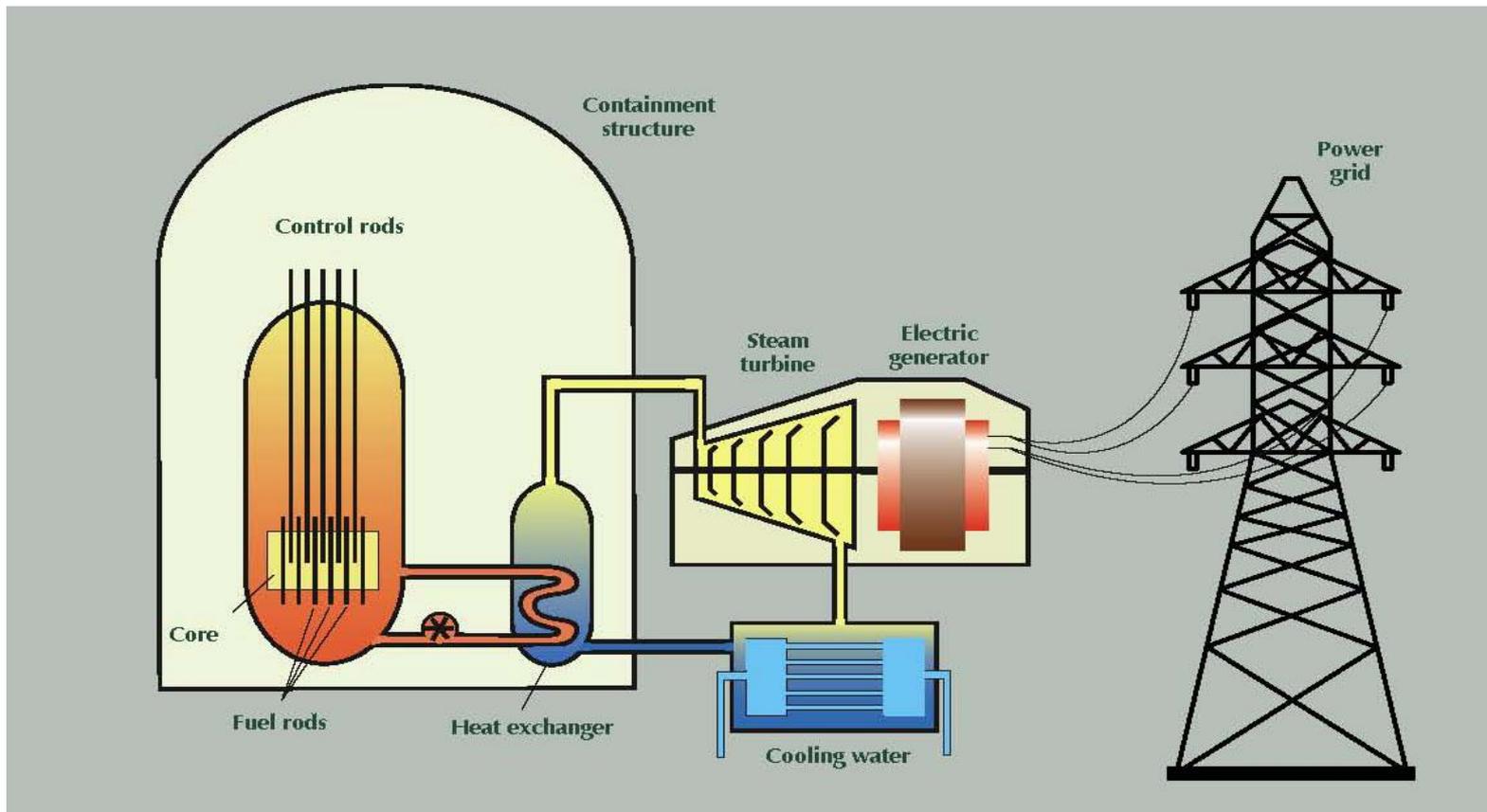
R4 1973-78, R5 1972-78, 784MWe

R6 1973-79, 1100 MWe

Fonte idrica: oceano

pozzo termico: oceano





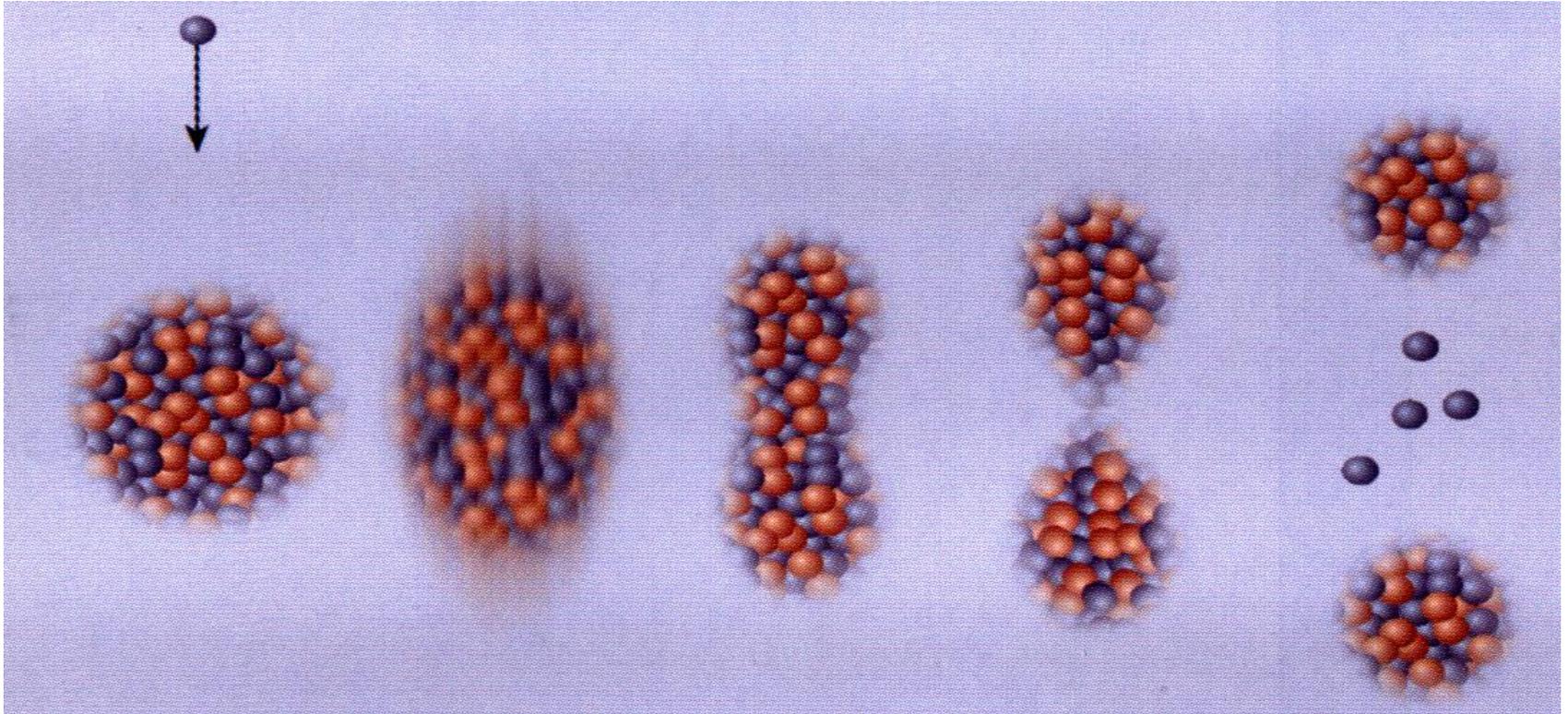
gli impianti elettronucleari sono impianti termoelettrici

- **riscaldano acqua per produrre vapore ad altissima pressione, che fa girare turbine accoppiate a un generatore elettrico collegato alla rete**
- **come combustibile usano la fissione dell'uranio-235**
- **l'uranio-235 è una componente rara dell'uranio naturale (0,72%)**

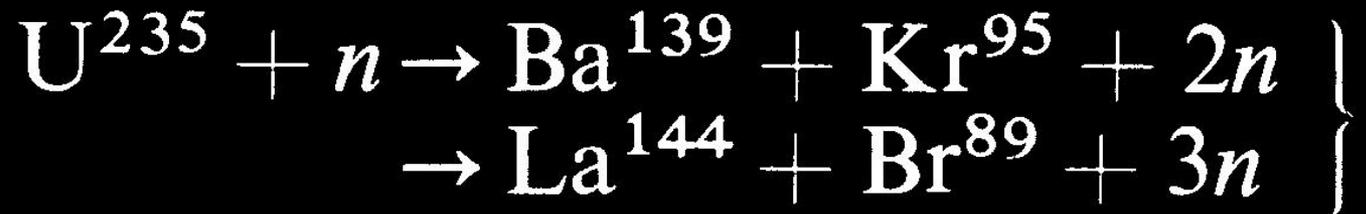
la fissione nucleare è una reazione che riguarda i nuclei di certi atomi pesanti:

- **uranio-235 (92 protoni e 143 neutroni) raro: solo lo 0,72% dell'uranio naturale**
- **plutonio-239 (94 protoni e 145 neutroni) non esiste in natura**
- **il processo è molto energetico: produce un'energia 20 milioni di volte quella della più energetica reazione chimica**
- **una centrale elettronucleare da 1GWe "brucia" l'uranio lentamente: bastano circa 47 mg di uranio-235 al secondo, ossia 1,3 t all'anno**
- **una centrale a carbone da 1GWe "brucia" carbone alla velocità di circa 100 kg al secondo, ossia 3,2 milioni di tonnellate all'anno**

la fissione nucleare: un nucleo fissile assorbe un neutrone e si deforma fino a spaccarsi in due nuclei (radioattivi) con l'emissione di nuovi neutroni

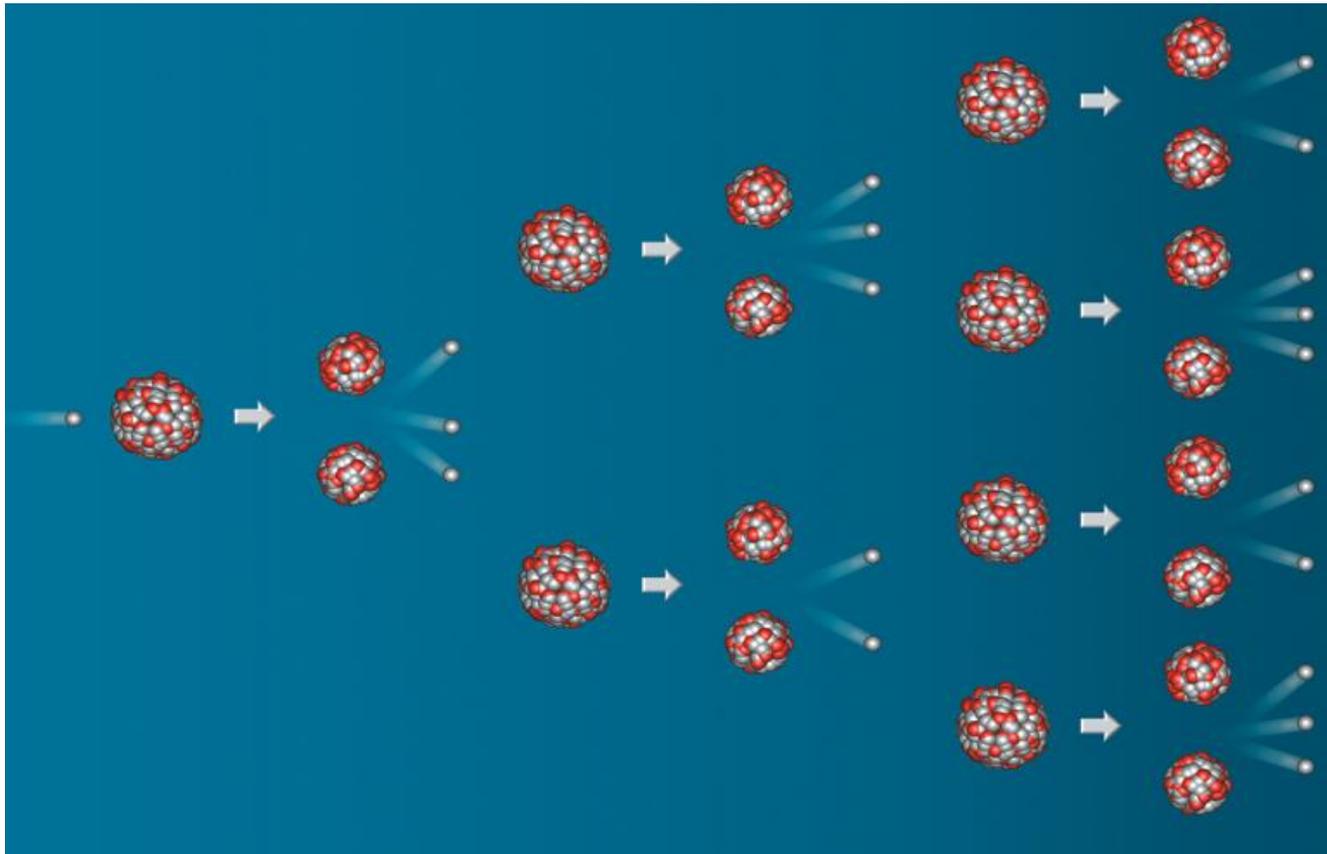


per esempio



reazione a catena

se ogni fissione produce due neutroni e ognuno di essi induce una nuova fissione si produce una reazione a catena con un aumento esponenziale di fissioni (2^n) e di energia liberata



schema del nucleo di un reattore nucleare

rosso: elementi di combustibile
in barre rivestite di
zirconio

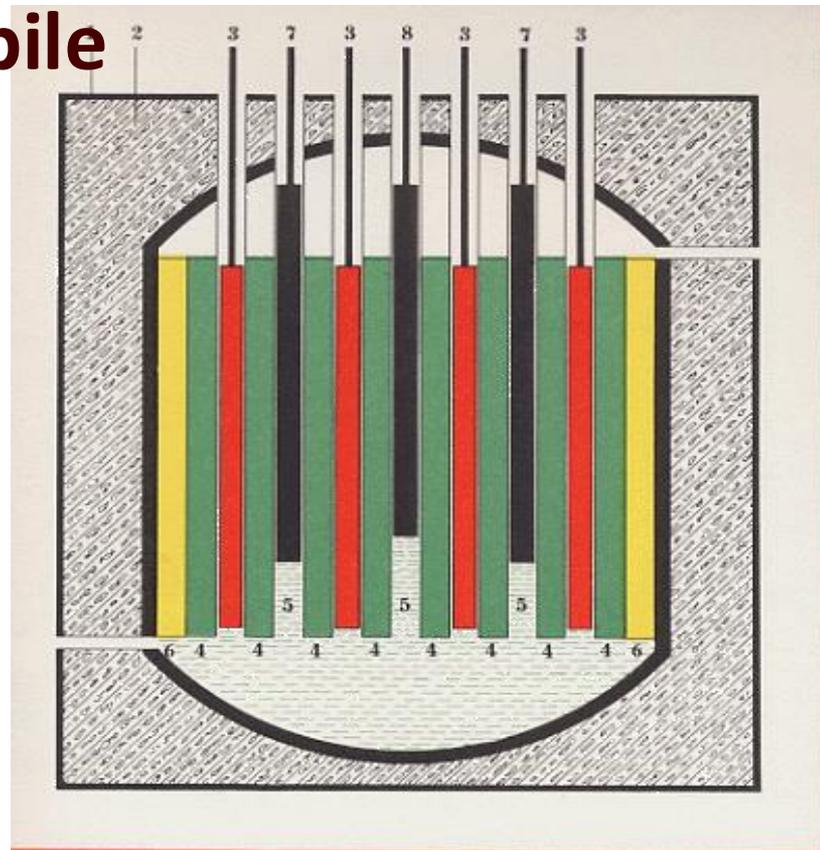
verde: moderatore

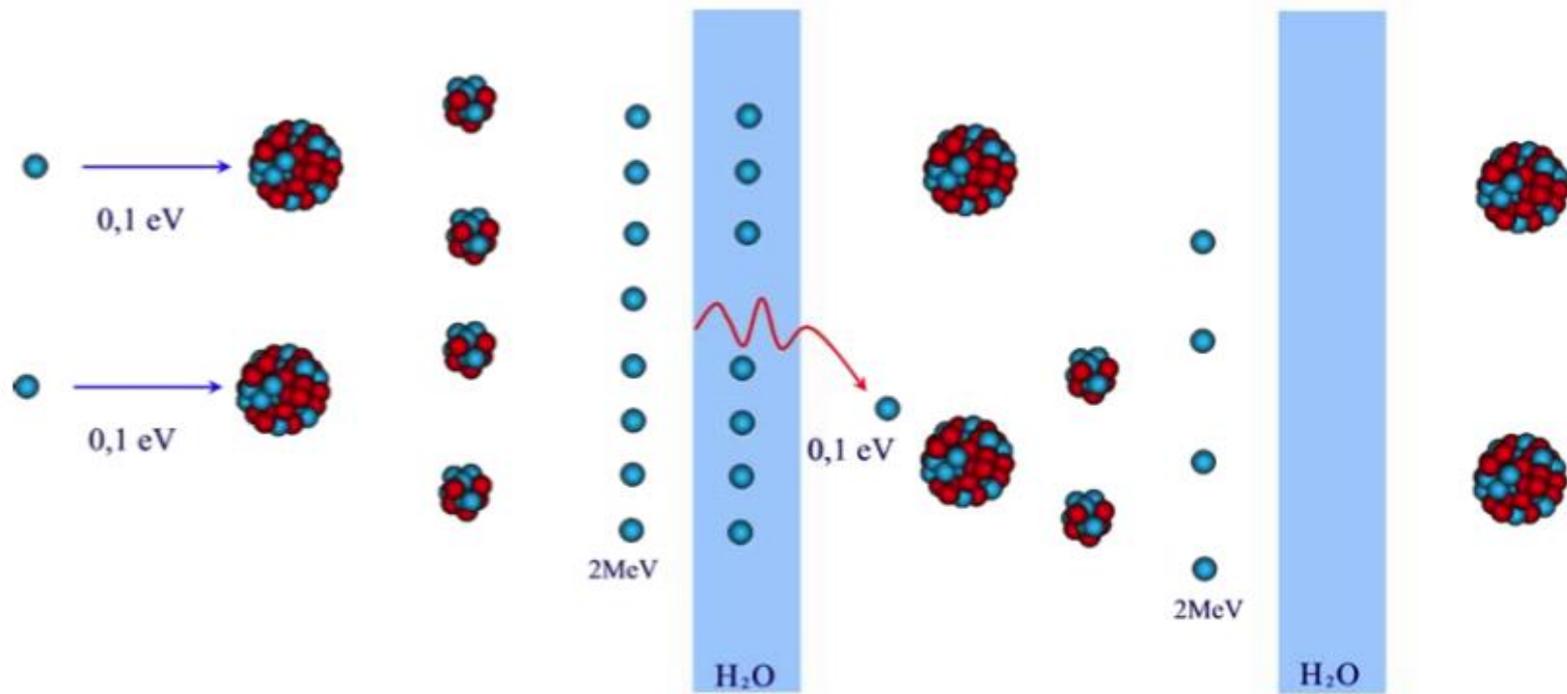
nero: barre di controllo di
materiale che assorbe
neutroni

giallo: riflettore di neutroni

azzurro: refrigerante

grigio: schermo biologico (cemento)





Il moderatore rallenta i neutroni prodotti nella fissione dall'energia di 2 MeV all'energia termica di 0,1 eV

I neutroni termici hanno una probabilità di produrre fissione 300 volte maggiore di quelli veloci

I reattori mantengono la reazione a catena anche con uranio naturale o leggermente arricchito in U-235 (2 – 4%)

Possibili moderatori sono acqua, acqua pesante, grafite

Il parametro caratteristico della reazione a catena è il fattore k di moltiplicazione dei neutroni:

k = rapporto fra il numero di neutroni nella generazione corrente e quello nella generazione precedente

$k < 1$ condizione sottocritica

$k = 1$ condizione critica

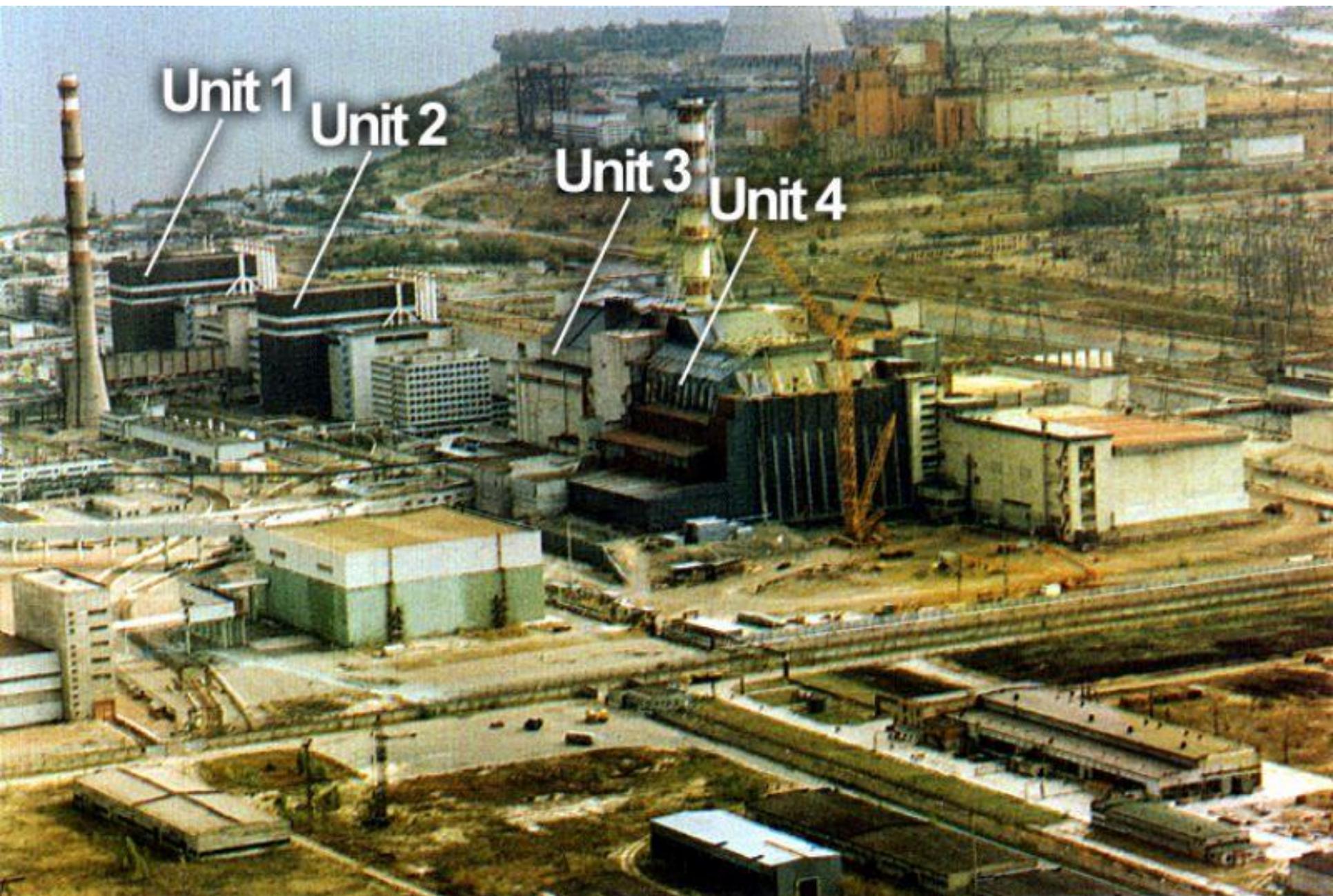
$k > 1$ condizione supercritica

la reazione a catena si mantiene se k è maggiore o uguale a 1

Sistemi di raffreddamento

In condizioni operative normali operano due sistemi di raffreddamento:

- il sistema primario introduce acqua a bassa temperatura nel nocciolo a mantenere costante il livello e compensare il vapore generato che viene estratto per far girare le turbine**
- il sistema secondario raffredda il vapore all'uscita dalle turbine condensandolo in acqua che viene ripompata nel nocciolo**
- il calore residuo del circuito secondario viene disperso nel pozzo termico**



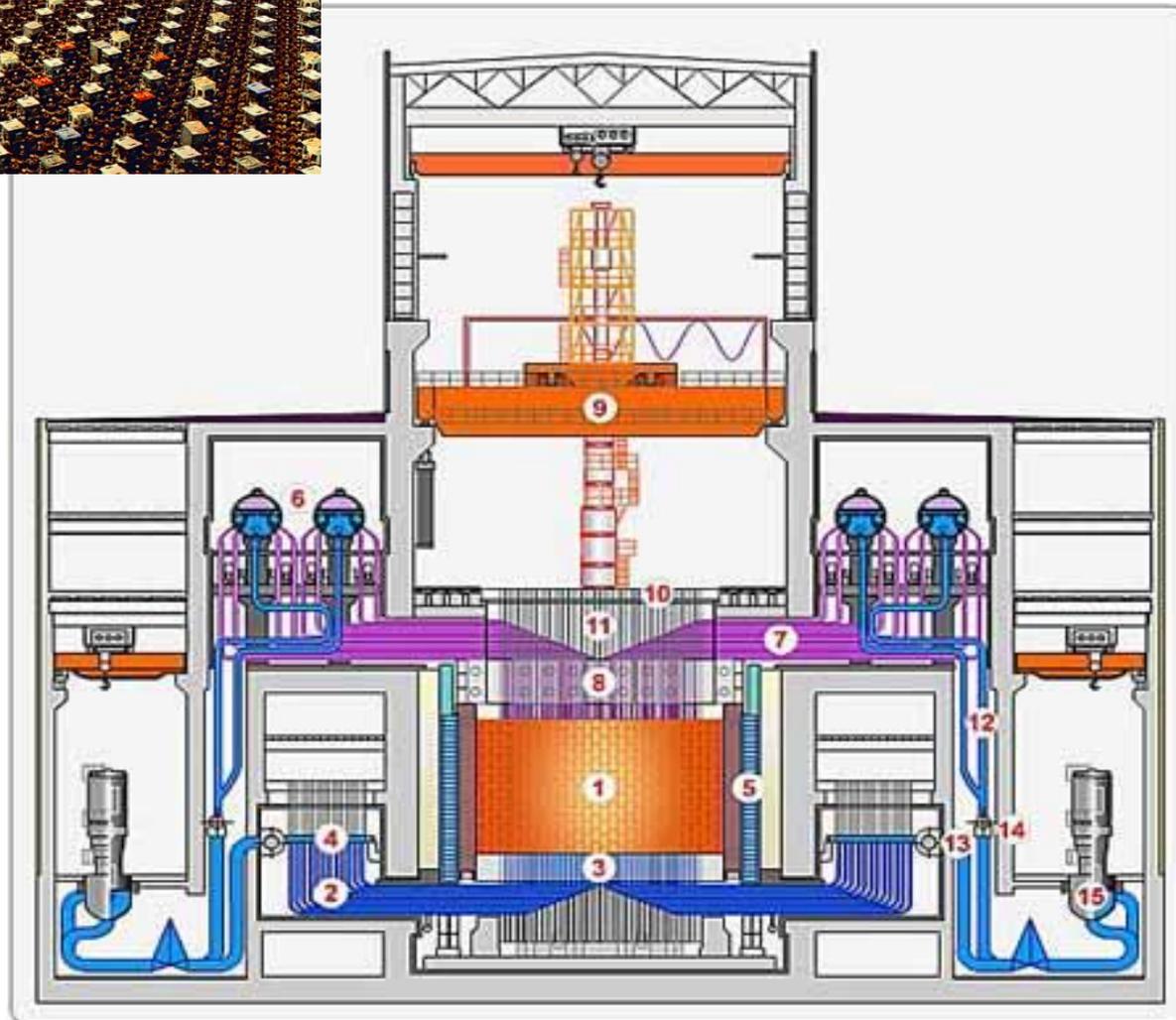
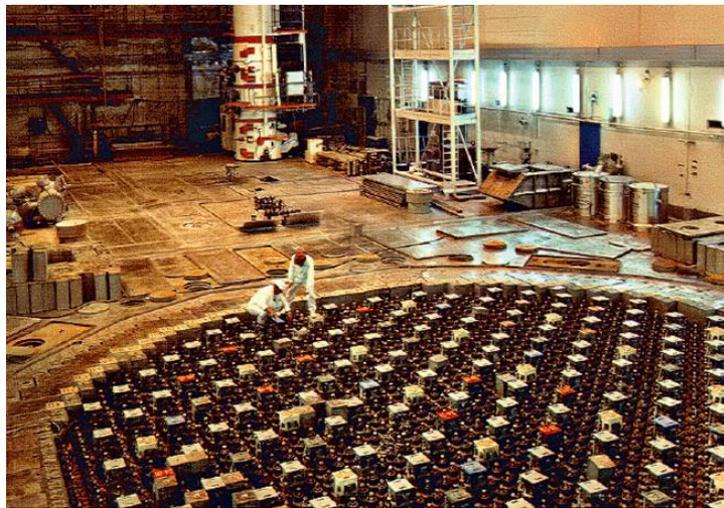
Unit 1

Unit 2

Unit 3

Unit 4

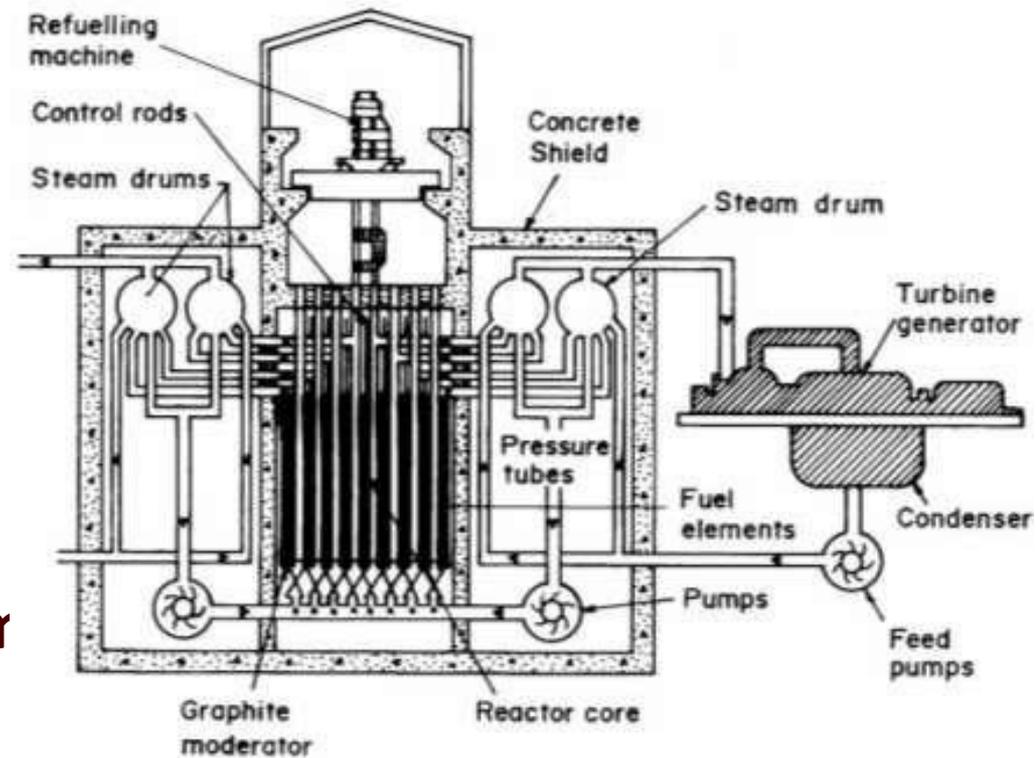
reattori RBMK



reattori RBMK

"reattore di grande potenza a canali"

- potenza: 3200 MWt
- dimensione: diametro 12m
altezza 7m
- moderatore: grafite (2488 blocchi)
- temperatura della grafite: 600°C
- combustibile: uranio arricchito al 2%
in 1661 canali entro i blocchi di grafite
- refrigerante: acqua, in canali indipendenti
- barre di controllo: 211 di carburo di cadmio,
con punta di grafite e 1m d'acqua



punti di forza dei reattori RBMK

- **tecnologia consolidata**
- **possibilità di incrementare la potenza con semplice aggiunta di elementi modulari**
- **carico e scarico del combustibile con reattore in funzione e quindi migliore produttività**
 - ▷ **dovuto all'impiego per l'estrazione del plutonio di qualità militare**

Sistemi di sicurezza dei RBMK:

- gli ambienti contenenti la pompa di circolazione principale, il sistema refrigerante di emergenza, e i separatori di vapore, possono resistere ad alte sovrappressioni (fino a 4,5 atmosfere)**
- nel caso di rottura di un tubo a pressione, il vapore e l'idrogeno che si possono formare vengono raccolti in un sistema chiuso d'acciaio in grado di sopportare alte sovrappressioni**
- i sistemi di controllo che segnalano eventuali situazioni di rischio intervengono automaticamente a spegnere il reattore in caso di necessità**

carenze dei reattori RBMK

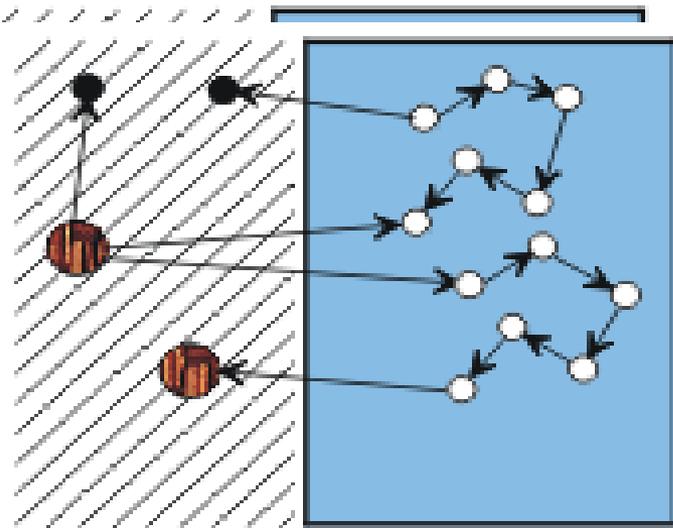
- **eccessiva dipendenza della regolazione e controllo dell'impianto da interventi degli operatori**
- **incompatibilità chimica dei materiali presenti nel nocciolo (grafite-acqua) con possibile produzione di idrogeno**
- **reazione positiva fra reattività e vapore (instabilità intrinseca)**
- **instabilità dinamica del nocciolo (vibra!)**
- **limitata efficacia del sistema di protezione (insufficiente rapidità di inserzione delle barre di controllo)**
- **inadeguatezza della refrigerazione di emergenza (sistema complesso, insufficiente ridondanza)**
- **assenza di un sistema di contenimento (solo una parte dei circuiti primari è in compartimenti a tenuta)**
- **mancanza di un tubo di calandra che separi il tubo col combustibile dalla grafite**
- ❖ **mancanza di una cultura di sicurezza dei dirigenti e operatori**

relazioni fra reattività e vapore

se la reazione diverge ($k > 1$), o viene meno il raffreddamento, l'acqua si riscalda ed evapora

- nei reattori moderati e refrigerati ad acqua
 - si ha una reazione **negativa** fra reattività e vapore
 - ▷ il vapore non è in grado di moderare i neutroni
 - ▷ la reazione a catena si spegne
- nei reattori moderati a grafite
 - si ha una reazione **positiva** fra reattività e vapore
 - ▷ il vapore non assorbe neutroni
 - ▷ aumenta il tasso di neutroni termici
 - ▷ la reazione a catena accelera e diverge

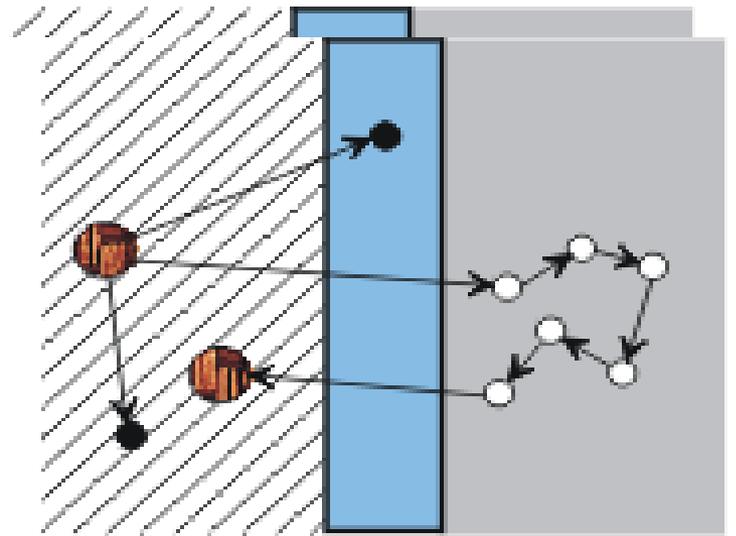
A



Uranium

Water

A

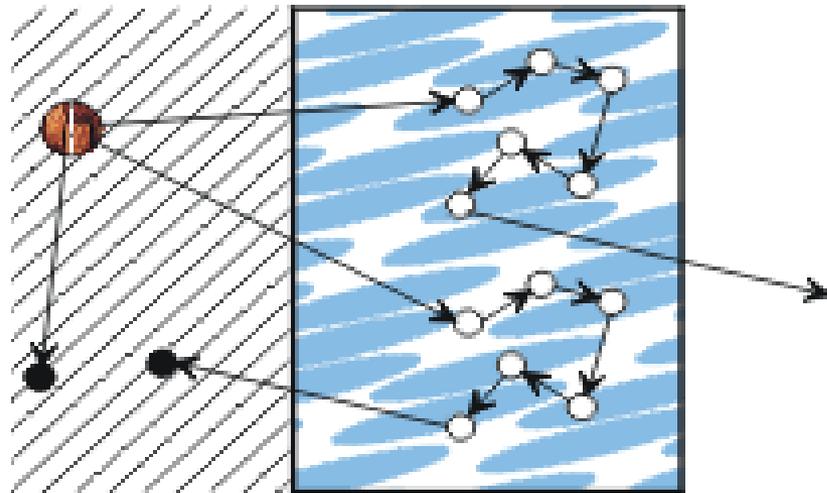


Uranium

Water

Graphite

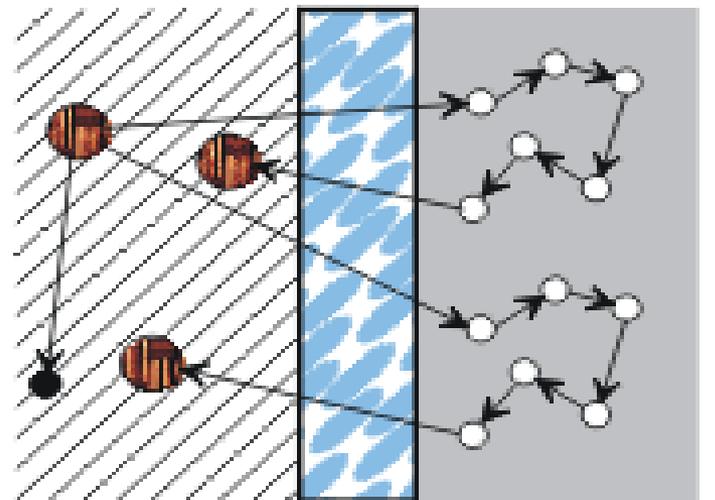
B



Uranium

Water steam

B



Uranium

Steam

Graphite

Reactors PWR and WWER

Reactor RBMK (Chemobyl)

Chernobyl: l'esperimento

verificare se in caso di perdita di potenza elettrica – e quindi del mancato funzionamento delle pompe di raffreddamento – le turbine in fase di rallentamento possono far funzionare le pompe fino all'accensione dei generatori diesel d'emergenza

- (a Chernobyl impiegano 60-75 s)**
- esperimenti precedenti senza esito**
- si approfitta dello spegnimento programmato**
- diretto da ingegneri elettrotecnici senza competenza nucleare**
- il personale di sicurezza addestrato non disponibile per l'esperimento**



Chernobyl cronologia

venerdì 25 aprile

13:05 diminuzione della potenza, verso lo spegnimento dell'impianto

14:00 sconnessione del sistema di raffreddamento di emergenza:

- il sistema di regolazione automatica viene spento
- la potenza scende a 1600 MWt

23:10 si riprende a diminuire la potenza per raggiungere un valore fra 700 e 1000 MWt (700 MWt è il minimo permesso)

sabato 26 aprile

0:00 si passa dal sistema di controllo automatico a quello manuale

- la potenza crolla a 30 MWt
- si forma xenon che "avvelena" il reattore
- per aumentare la potenza si estraggono barre di controllo fino al limite di sicurezza di 30 barre

1:00 si aumenta la potenza a 200 MWt rimuovendo ulteriori barre – ne rimangono solo 11

1:07 si aggiungono 2 pompe di riciclo portando il totale a 8 superando il flusso di sicurezza

- **si formano bolle nel circuito dell'acqua**
- **si lasciano solo 6 barre di controllo**
- **si bloccano i segnali di protezione di emergenza**

1:19 aumenta la reattività oltre i limiti; il sistema di controllo richiede lo spegnimento immediato.

L'allarme viene ignorato e si procede con l'esperimento

1:22:30 si diminuisce enormemente il flusso d'acqua

**1:23 la temperatura nel reattore comincia a salire
le pompe funzionano al ritmo delle turbine
diminuisce il flusso d'acqua nel reattore**

1:23:04 si chiudono le valvole di immissione acqua nelle turbine

- **la potenza del reattore cresce**
- **l'esperimento si conclude**
- **l'operatore vede le barre muoversi**

- 1:23:40** si aziona il sistema di spegnimento urgente AZ-5 con inserimento veloce delle barre; le barre efficaci si deformano per il calore e non riescono a entrare in operazione i frammenti di combustibile causano vuoto nei tubi l'acqua diventa vapore ad altissima pressione
- 1:23:43-45** la potenza aumenta rapidamente per l'effetto positivo del vuoto e per l'inserzione veloce delle barre (oltre 32000 MWt)
- 1:23:48** il vapore acqueo raggiunge un'altissima pressione e causa una prima esplosione seguita da una seconda dovuta all'idrogeno

- la copertura biologica viene divelta
- l'edificio viene scoperchiato
- la grafite ad alta temperatura in contatto con l'aria prende fuoco

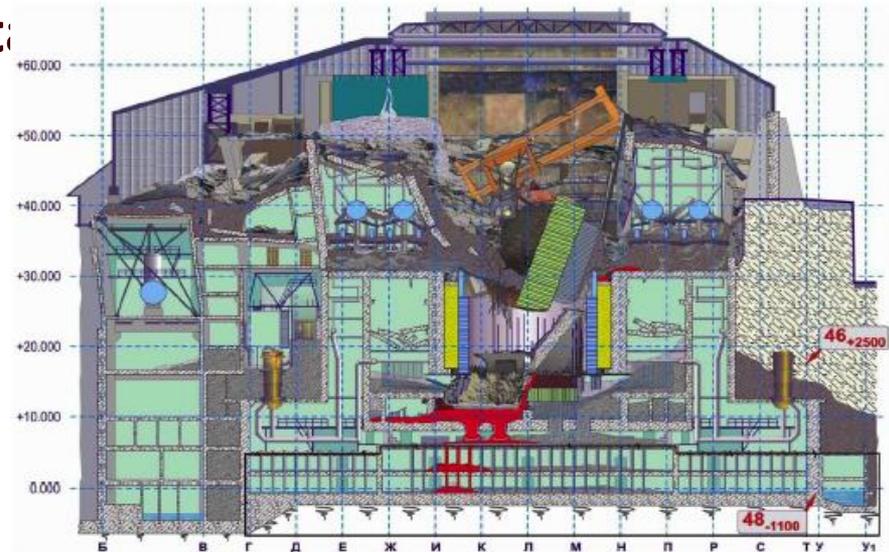
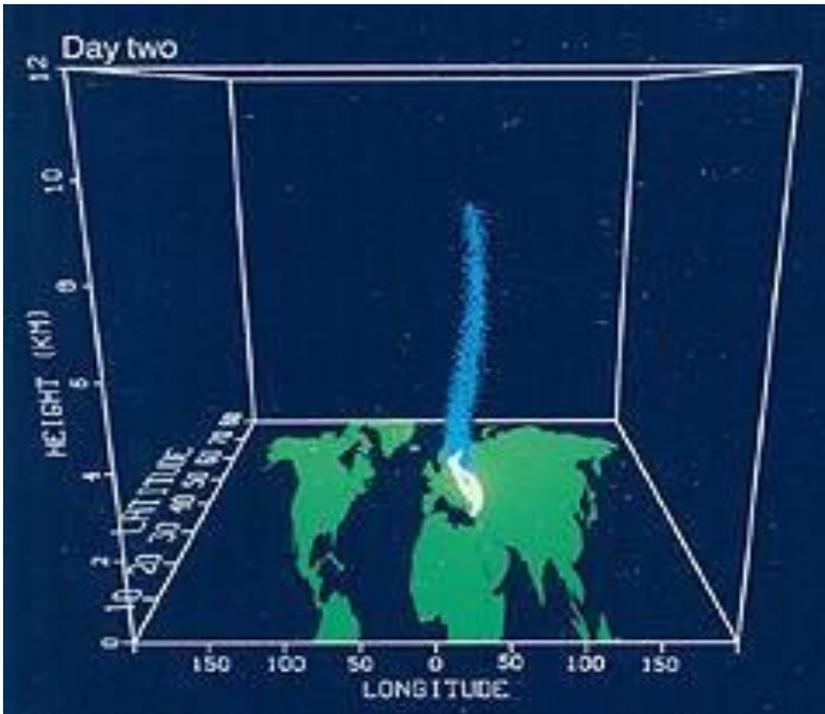


Figure 4. Sectional view of the Shelter (south-north). Solidified LFCM flows are indicated in red.

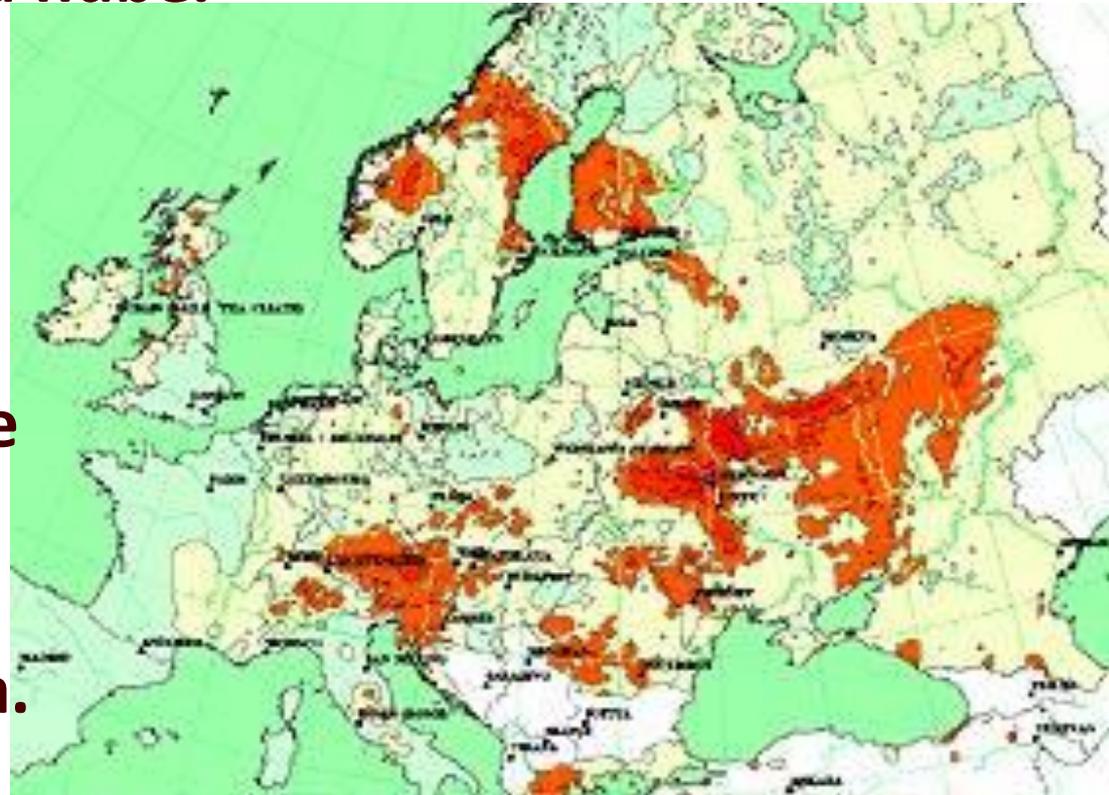
l'incendio della grafite crea una nube di fumo e fuliggine che porta materiale radioattivo ad alta quota e viene poi guidata dal vento



La nuvola radioattiva si sposta guidata dai venti: si dirige prima a nord-ovest interessando Scandinavia, Olanda, Belgio e Gran Bretagna; quindi devia a sud interessando l'Europa centrale, il Nord Mediterraneo e i Balcani.

La quantità di depositi radioattivi, essenzialmente isotopi di cesio, dipese soprattutto dalle precipitazioni piovose durante il passaggio della nube.

Gli effetti maggiori fuori dall'URSS, si ebbero in Austria, Svizzera, Svezia, e Germania meridionale superando in alcune zone i 30 kBq per m², mentre meno esposte furono Francia e penisola iberica.



radiazione emessa a Chernobyl

circa il 5% di quella presente nel reattore

in tutto 14×10^{18} Bq

400 volte quella di Hiroshima

1000 volte meno dei test militari

- ▷ **kripton e xenon emessi come gas $6,5 \times 10^{18}$ Bq**
- ▷ **iodio come vapore e particelle solide $1,8 \times 10^{18}$ Bq**
- ▷ **cesio e tellurio come aerosol $8,5 \times 10^{16}$ Bq**
iodio-equivalente

tempi di dimezzamento

iodio-131 8 giorni

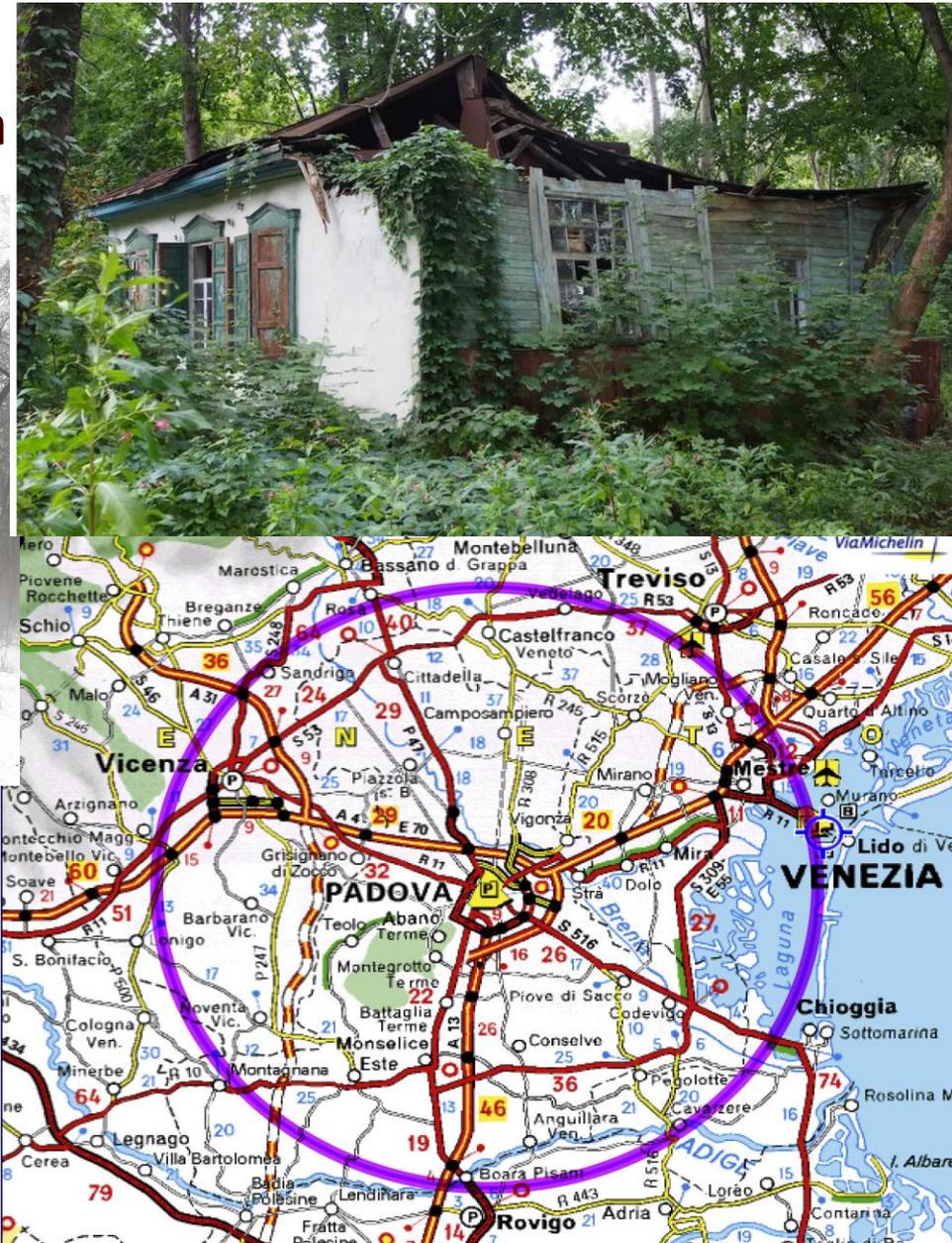
stronzio-90 e cesio-137 circa 30 anni

circa 350.000 persone furono evacuate; dopo 10 anni è iniziato un lento ripopolamento (soprattutto di anziani ex-residenti).

**784 320 ettari tolti all'agricoltura
694 200 ettari tolti alla silvicoltura**



La zona bandita di 30 km di raggio è diventata un'oasi naturalistica



Health effects (WHO / IAEA / UNDP report)

- 50 emergency workers died of acute radiation syndrome
- 5000 thyroid cancers (resulting in 15 fatalities),
- "there is no evidence of a major public health impact attributable to radiation exposure 20 years after the accident."
- no evidence or likelihood of decreased fertility nor any evidence of increases in congenital malformations

- an estimated total of 3940 deaths from radiation-induced cancer and leukemia among
 - ~ the 200 000 emergency workers,
 - ~ 116 000 evacuees and
 - ~ 270 000 residents of the most contaminated areas
- la contaminazione collettiva per tutte le persone esposte in tutto il mondo è stimata di 600 000 Sv-uomo, che può comportare in tutto 24 000 decessi per cancro (secondo il modello lineare)

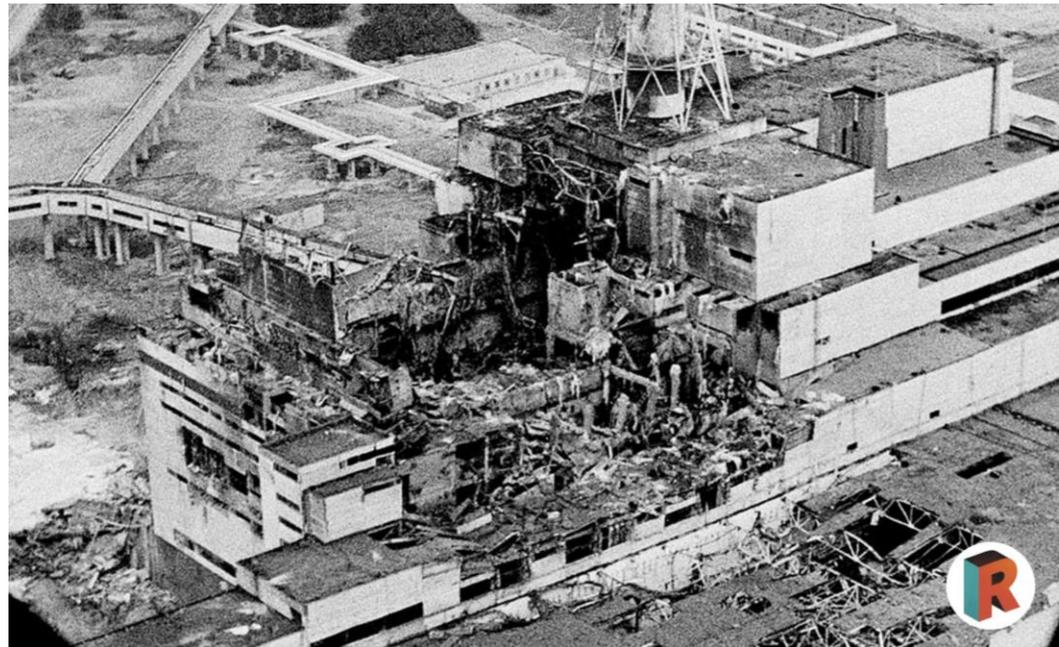
**Dei 240 000 liquidatori impegnati nella fase più critica
circa 20 000 hanno ricevuto dosi di 250 mSv
alcuni più esposti hanno subito dosi fino a 500 mSv,
per gli altri la dose media è stata di 165 mSv**



cause tecniche

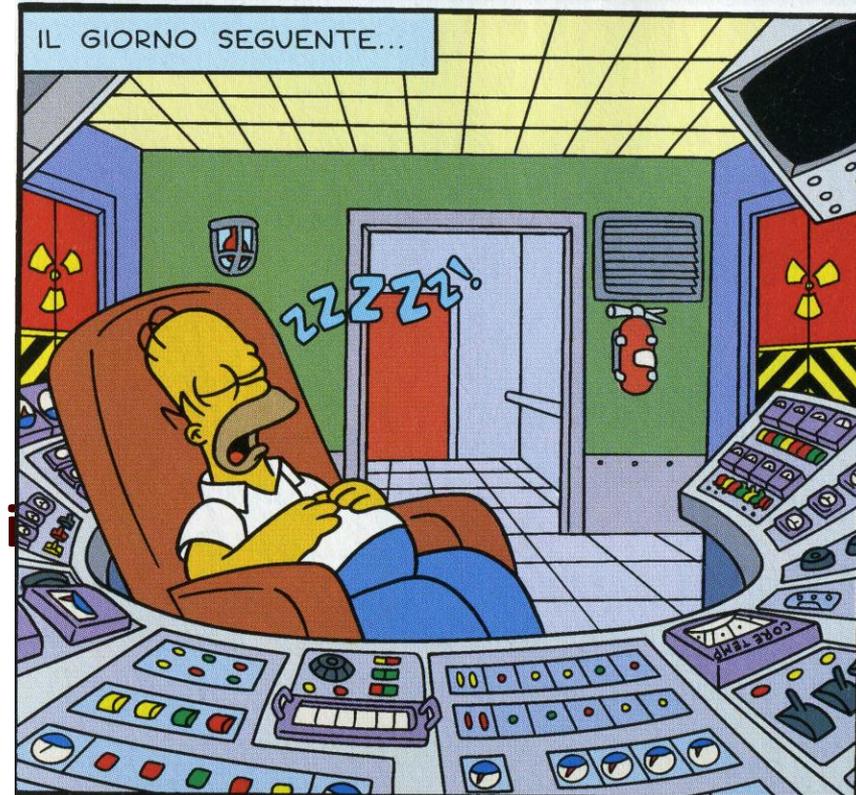
- instabilità a bassa potenza*
- sensibilità positiva al vuoto*
- la particolare forma delle barre di controllo:
appena inserite, a causa della punta di grafite e la parte cava, aumentano la reattività anziché diminuirla, anche perché espellono l'acqua*
- inadeguati strumenti di misura della radioattività

* contro l'intuizione
e ignorata dal personale



cause: il fattore umano

- il personale che dirigeva l'impianto e condusse le operazioni non era informato dei problemi strutturali del reattore
- i dirigenti non erano qualificati per gestire grandi reattori nucleari
- scarso controllo da parte degli enti preposti
- regime di segreto sui problemi degli impianti nucleari anche per i responsabili
- scarso addestramento del personale
- gli operatori procedettero con scarsa cura e violarono le procedure
- insufficiente comunicazione fra gli operatori e i responsabili della sicurezza
- gli operatori spensero molti sistemi di sicurezza del reattore



chiusura dell'impianto

- **Unità 4 – esplosione 1986**
- **Unità 2 – incendio 1991**
- **Unità 1 – chiusura 1997**
- **Unità 3 – chiusura 2000**



Piano di messa in sicurezza finale

- **contenitore sicuro per Unità 4 – novembre 2017**
- **messa in sicurezza Unità 1–3 – 2028**
- **rimozione materiali – 2046**
- **distruzione – 2064**



Effetti globali

l'evento ha scosso profondamente l'opinione pubblica mondiale, introducendo un nuovo terrore nell'immaginario collettivo, e ha minato profondamente la fiducia nella scienza e nella tecnologia, con diffuso rifiuto dell'energia nucleare

- **revisione dei programmi energetici mondiali, con ritorno ai combustibili fossili, con gravi conseguenze ambientali ed economiche e tensioni internazionali**
- **interventi sugli impianti esistenti per eliminare carenze tecniche e rafforzare le condizioni di sicurezza**
- **revisione radicale delle problematiche della sicurezza degli impianti nucleari e i problemi della radioprotezione**
- **accettazione che in ogni settore delle applicazioni tecnologiche possono avvenire gravi incidenti, con la necessità di pianificare in anticipo gli interventi**
- **riconoscimento del carattere transnazionale dei grandi incidenti e della necessità di azioni comuni e di soccorsi a livello nazionale e internazionale**
- **disposizioni caotiche di limitazioni dei generi alimentari in vari paesi europei**
- **caos nelle informazioni dei mezzi di comunicazione**



Chernobyl il 7 marzo 2022

Il sito comprende due strutture di stoccaggio provvisorio del combustibile esaurito (ISF-1 e ISF-2) e una varietà di impianti di gestione degli scarti. A Chernobyl è stata costruita una struttura centrale di stoccaggio del combustibile esaurito che riceverà e immagazzinerà il combustibile esausto delle centrali nucleari ucraine



Chernobyl nella guerra in corso

Il sito è stato occupato dalle forze russe dal 24 febbraio 2022 fino al 31 marzo in preparazione all'attacco a Kiev.

Il personale ucraino ha continuato a gestire le strutture.

Le comunicazioni con l'esterno sono state interrotte.

Dal 9 al 14 marzo il sito è rimasto privo di energia elettrica.

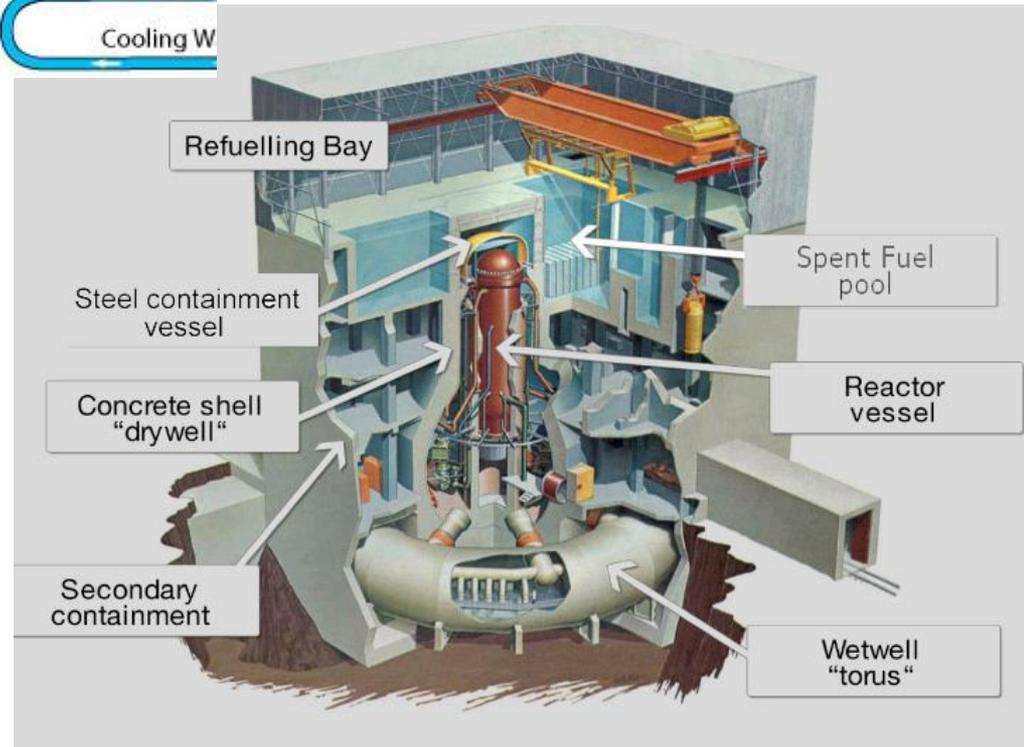
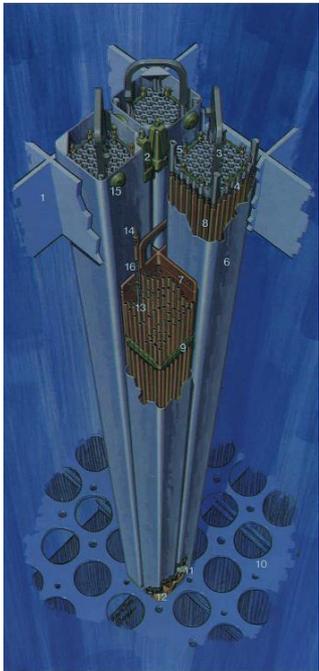
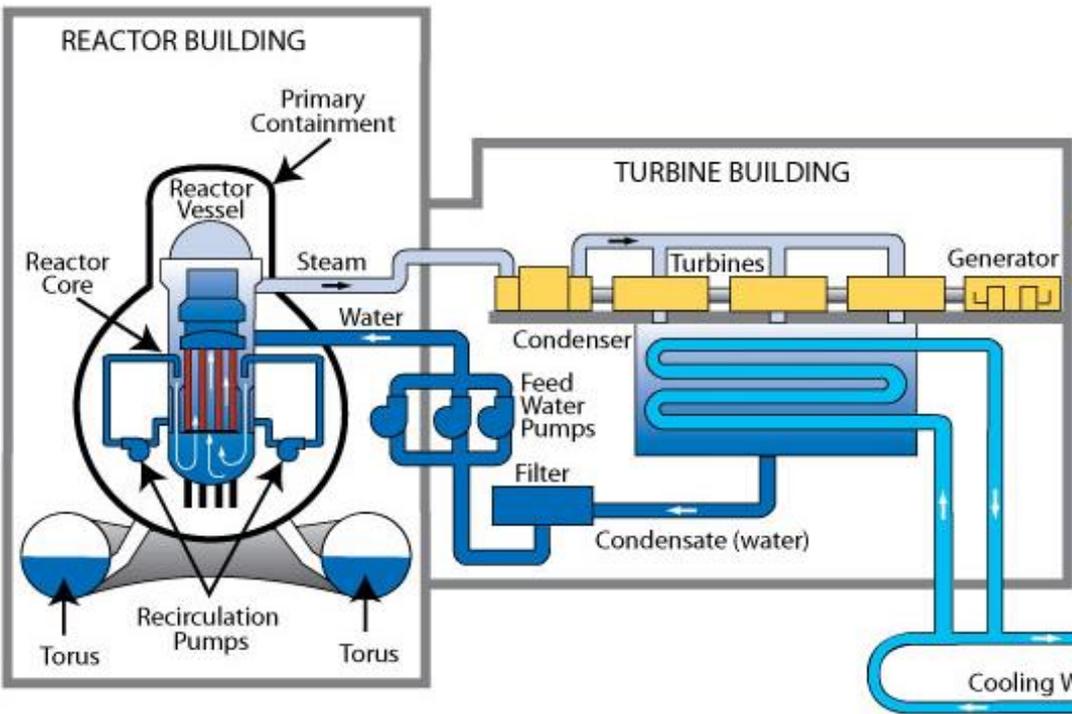
I generatori diesel di emergenza entrarono in funzione per alimentare sistemi importanti per la sicurezza, in particolare le strutture di stoccaggio.

I locali dei laboratori analitici per il monitoraggio delle radiazioni sono stati devastati e strumenti rubati, rotti o altrimenti disabilitati; il centro di informazione e comunicazione venne saccheggiato, con la distruzione delle linee per la comunicazione automatica delle misure.



L'impianto di Fukushima prima dell'incidente

reattore ad acqua bollente (BWR)

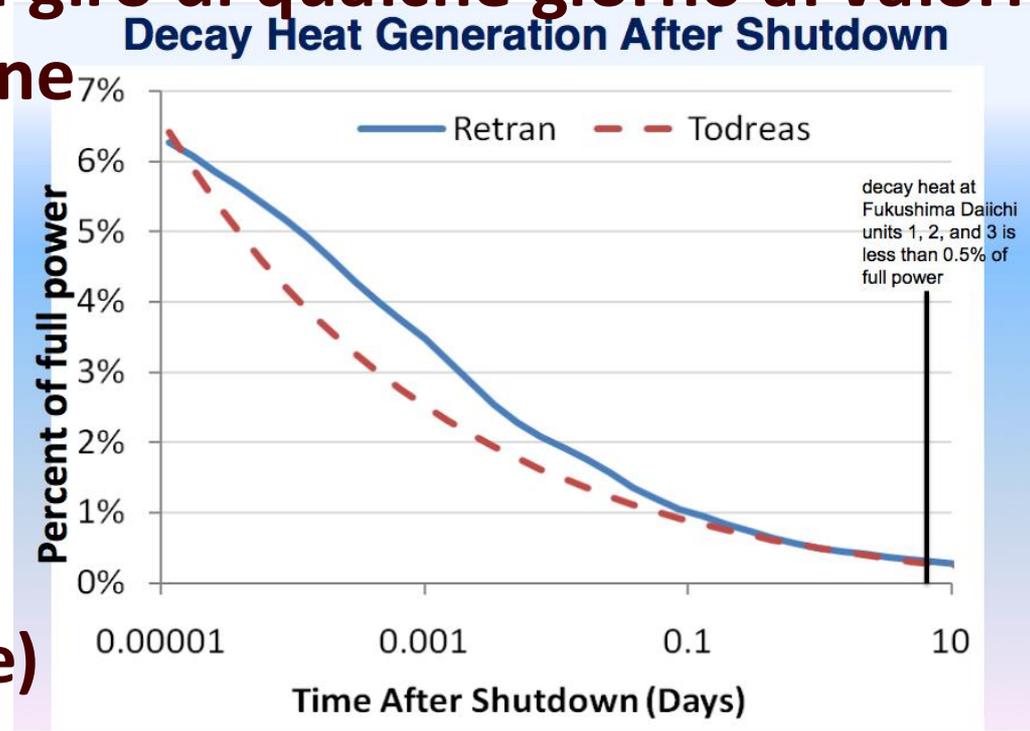


autoregolazione dei BWR

- la parte superiore degli elementi di combustibile è immersa in una miscela bifase acqua-vapore che riduce l'effetto di moderazione dei neutroni e la densità di potenza
- autoregolazione: si può variare la potenza senza agire sulle barre di controllo aumentando o riducendo il flusso d'acqua in modo da variare il livello della parte in acqua del combustibile e quindi la frequenza delle reazioni

La refrigerazione del nocciolo deve continuare anche a reattore spento:

- la radioattività del combustibile, dei prodotti di fissione e del materiale attivato dai neutroni produce calore
 - il reattore conserva una potenza residua, che allo spegnimento, raggiunge tipicamente il 6% della potenza d'esercizio, per ridursi nel giro di qualche giorno ai valori minimi della configurazione di "spegnimento freddo", se la refrigerazione continua regolarmente
- il 6% di 3,2 GWt sono 192 MWt
(bastano per un 64000 case)



rischi del riscaldamento del nocciolo

- l'acqua evapora scoprendo le barre**
- lo zirconio reagisce col vapore producendo idrogeno libero**
- l'idrogeno in presenza di ossigeno può incendiarsi o esplodere**
- le barre possono perdere la protezione e liberare sostanze radioattive**
- le barre in parte o in toto possono fondere liberando radiazione e danneggiando gli schermi di contenimento**
- la pressione del vapore aumenta fino a esplodere**

fusione del nocciolo

in assenza di refrigerante la temperatura del combustibile cresce fra i 2500 e 2850 °C e le barre del combustibile fondono creando il “corium”, una miscela di combustibile, zirconio e acciaio che cade sul fondo del vessel.

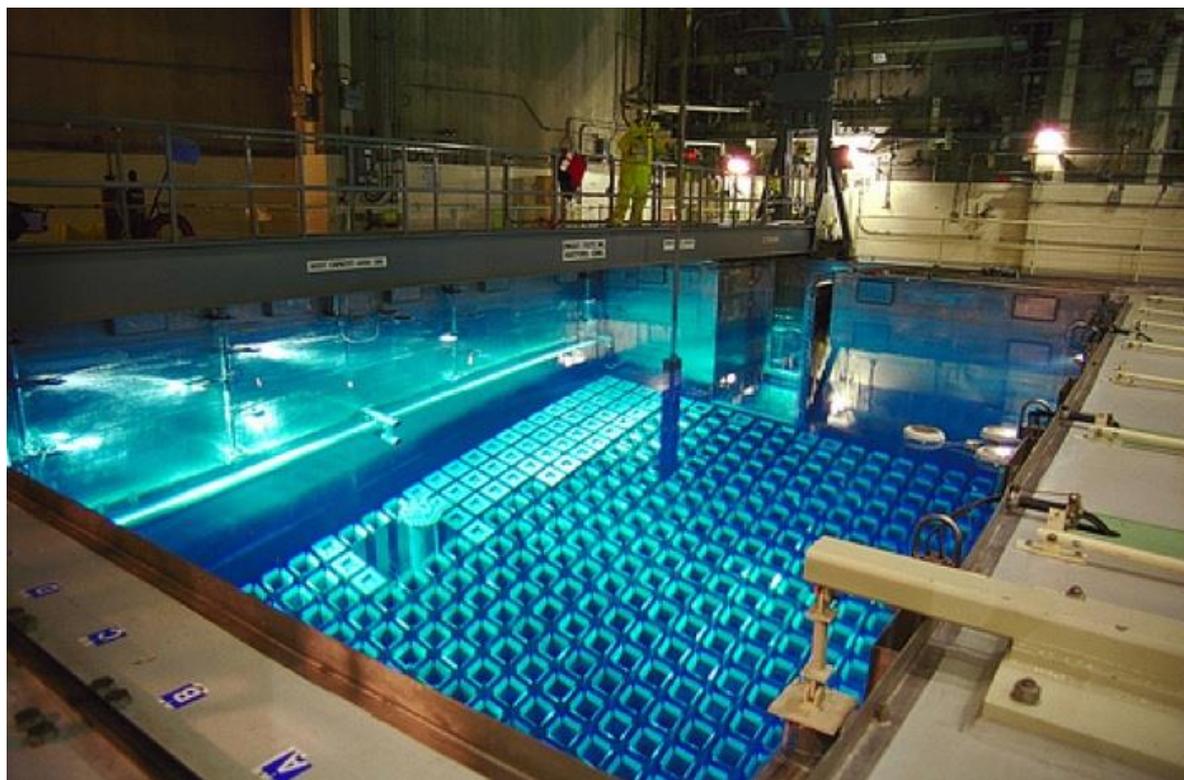
poiché l'acciaio del vessel fonde sui 1500 °C il corium può penetrare nel vessel stesso o perforarlo fino a danneggiare il contenitore primario



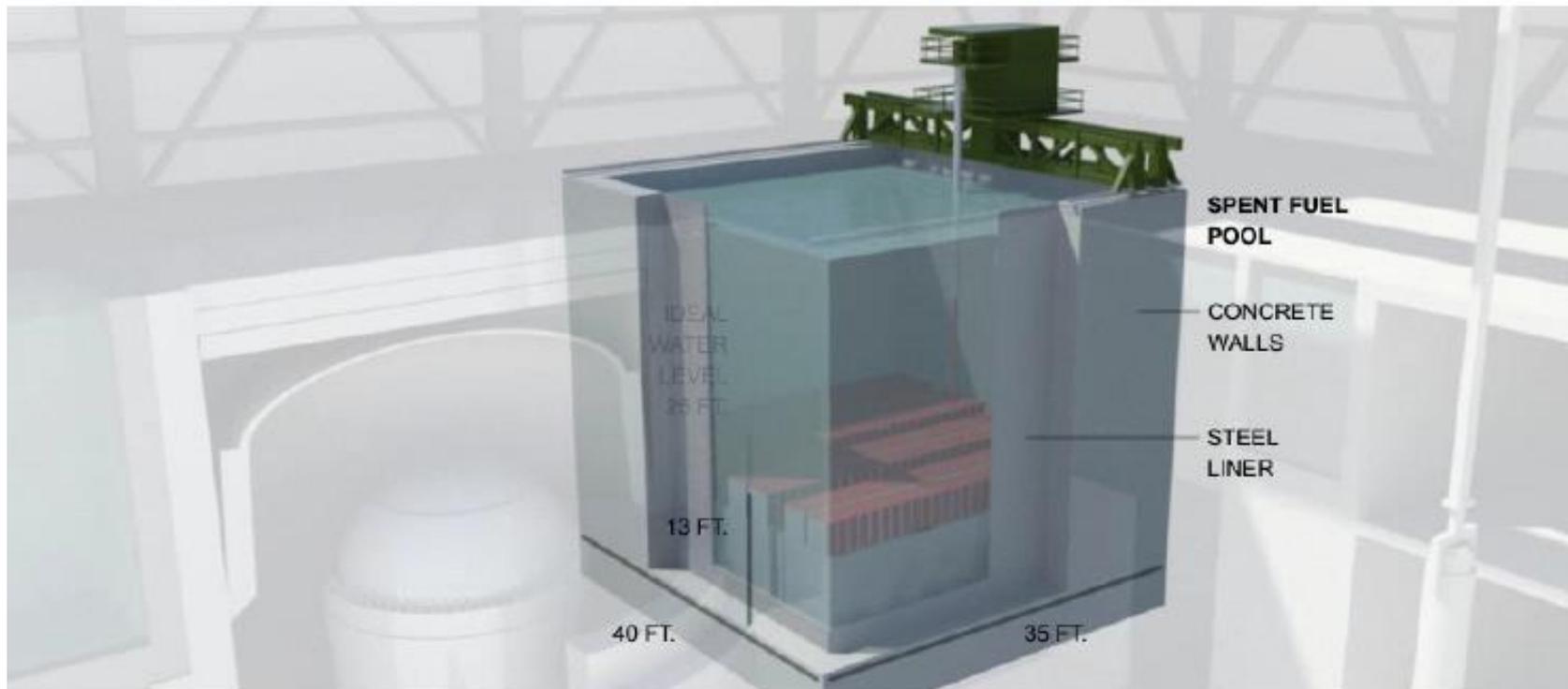
In ogni centrale esiste una piscina di stoccaggio degli elementi esausti ove restano per la fase “calda” in attesa del trattamento ulteriore

- ▷ **conservazione in forma asciutta**
- ▷ **ritrattamento per estrazione di plutonio/MOX**
- ▷ **disposizione definitiva**

la presenza di prodotti di fissione radioattivi rende necessario assicurare il raffreddamento anche delle piscine di stoccaggio



In ogni unità esiste una piscina di stoccaggio degli elementi esausti vicino alla testa del reattore per facilitare l'estrazione degli elementi mantenendoli in acqua. Le piscine sono profonde 12 m, garantendo una copertura di 7-8 m di acqua borata sopra il combustibile, e le barre vengono conservate in strutture rigide distanziate a impedire il raggiungimento di condizioni di criticità; la temperatura viene mantenuta a 30 °C mediante riciclo d'acqua con pompe elettriche (lo stoccaggio resta sicuro in piena copertura d'acqua fino a 85 °C).



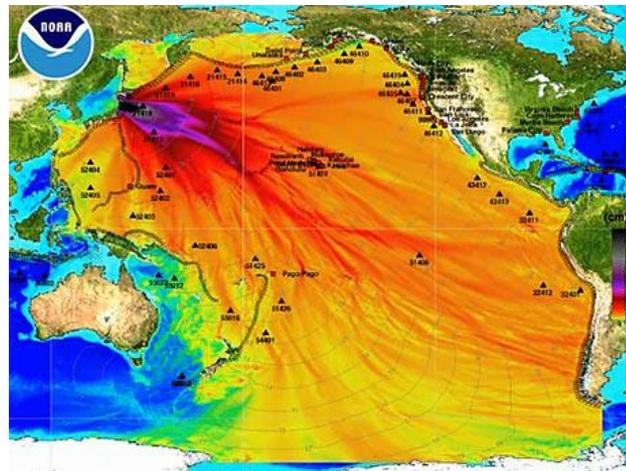
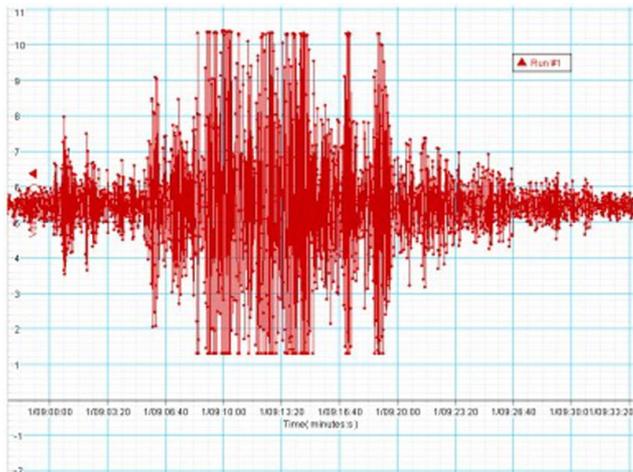
il terremoto e lo tsunami

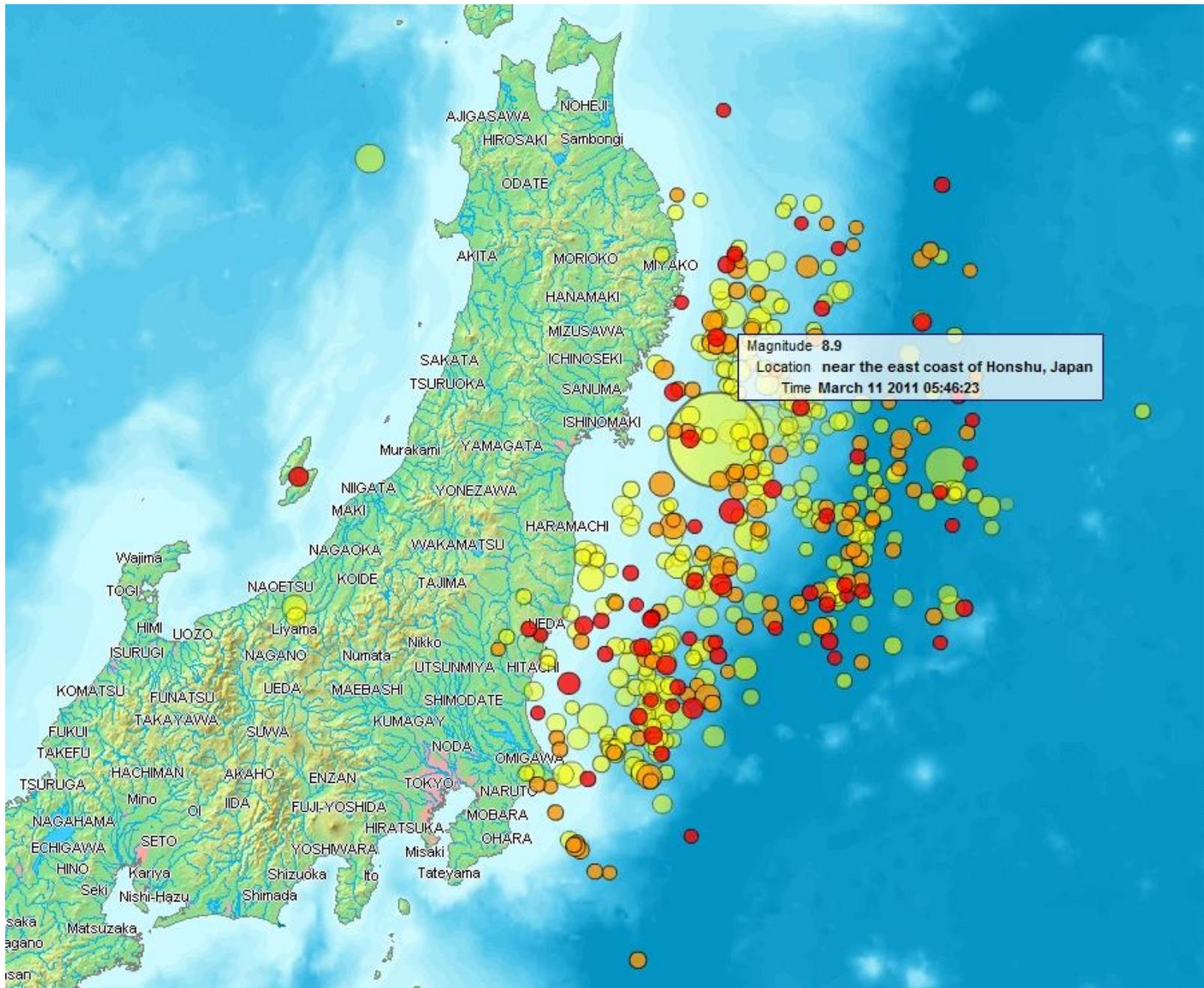
alle 14.46 (ora locale) dell'11 marzo 2011 un terremoto di magnitudo 9 MMS con epicentro in mare a 130 km dalla città di Sendai sulla costa orientale dell'isola di Honshu

- energia liberata $1,9 \times 10^{17}$ J (come 45.000 Hiroshima)
- accelerazione 29,33 Gal
- tsunami con onde alte fino a 29,6 m

precursore il 9 marzo (magnitudo 7,2 MMS)

seguito da oltre 850 scosse superiori a 4,5 MMS, ultima 26 ottobre 2013 (7,1 MMS)





In Giappone tutti i reattori sono progettati per resistere a sismi previsti su basi storiche esaminati dopo il terremoto Miyagi del 1978 (accelerazione 122 Gal per 30 s) non hanno patito danni nel 2008 la resistenza sismica è stata portata ad accelerazioni fra 441 e 489 Gal, a seconda delle unità la centrale di Fukushima è protetta dai tsunami da un muro verso il mare alto 5,7 m

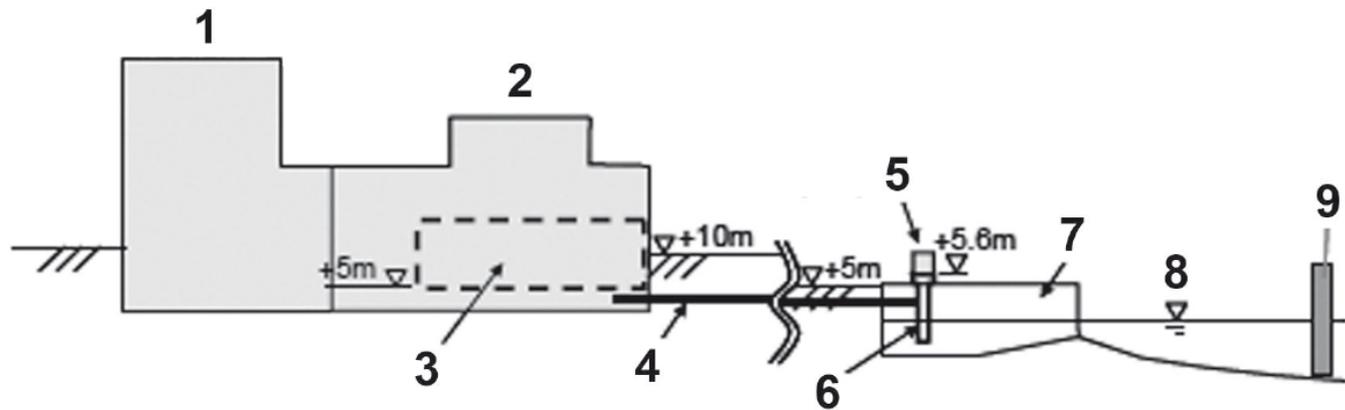


FIG.1 - Sezione della centrale di Fukushima Dai-ichi in corrispondenza all'unità 1: 1. edificio del reattore; 2. edificio delle turbine; 3. sala dei generatori diesel d'emergenza; 4. tubatura di presa dell'acqua marina; 5. motore della pompa per l'acqua marina di raffreddamento; 6. pompa per l'acqua marina di raffreddamento; 7. fossa per la presa di acqua marina; 8. superficie del mare; 9. barriera a mare (alta 10 m).

Effetti immediati

- a Fukushima Dai-ichi le unità 1, 2 e 3 si spengono automaticamente all'arrivo dell'onda sismica, che raggiunge l'accelerazione di 507 Gal, mentre sono già spente le unità 4 (combustibile rimosso), 5 e 6 (in arresto freddo).
- Il terremoto danneggia la rete elettrica della zona, la centrale resta senza corrente e i generatori diesel d'emergenza provvedono alle pompe per il raffreddamento del nocciolo dei reattori.
- Dopo un'ora arriva un'onda tsunami di 15 m, superando la protezione prevista (fino a 5,7 m).
- Lo tsunami devasta il sito, danneggia o distrugge molti edifici, fra cui la centrale elettrica principale, sistemi di chiusura, cisterne, strade e collegamenti.
- La centrale viene allagata fino a 5 m di altezza e su tutto il sito si depositano sabbia, melma, detriti e rottami.
- Due persone rimangono uccise, che si aggiungono a una vittima causata dal terremoto.

I danni più gravi riguardano le funzioni di sicurezza: vengono distrutti gli impianti di presa dell'acqua marina per i sistemi di raffreddamento; sono interrotte le connessioni alla rete idrica esterna e al pozzo di calore (l'oceano); gli edifici delle turbine sono allagati mettendo fuori uso i 10 generatori ausiliari ivi installati, per cui rimane operativo un solo generatore presso l'unità 6; le batterie delle unità 1 e 2 finiscono sott'acqua e non possono venir impiegate; in assenza di potenza elettrica tutti gli edifici, e in particolare le sale controllo, rimangono all'oscuro, gran parte degli strumenti di misura diventano inutilizzabili; vengono meno anche la distribuzione di aria compressa e altri servizi; gran parte delle attrezzature, degli equipaggiamenti di sicurezza, dei dosimetri e dei pezzi di ricambio vanno persi o sono irraggiungibili; ulteriore problema la difficoltà di comunicazioni interne e con l'esterno.

La devastazione del terremoto e dello tsunami nell'area circostante rende impossibili aiuti immediati dall'esterno.

Si devono affrontare, senza energia elettrica e acqua fresca, simultaneamente i problemi posti dallo tsunami, i danni all'impianto elettrico, e il controllo dei 6 reattori e delle cisterne del combustibile spento.

La TEPCO (Tokyo Electric Power Company) segnala la situazione di emergenza alla NISA (Nuclear and Industrial Safety Agency).

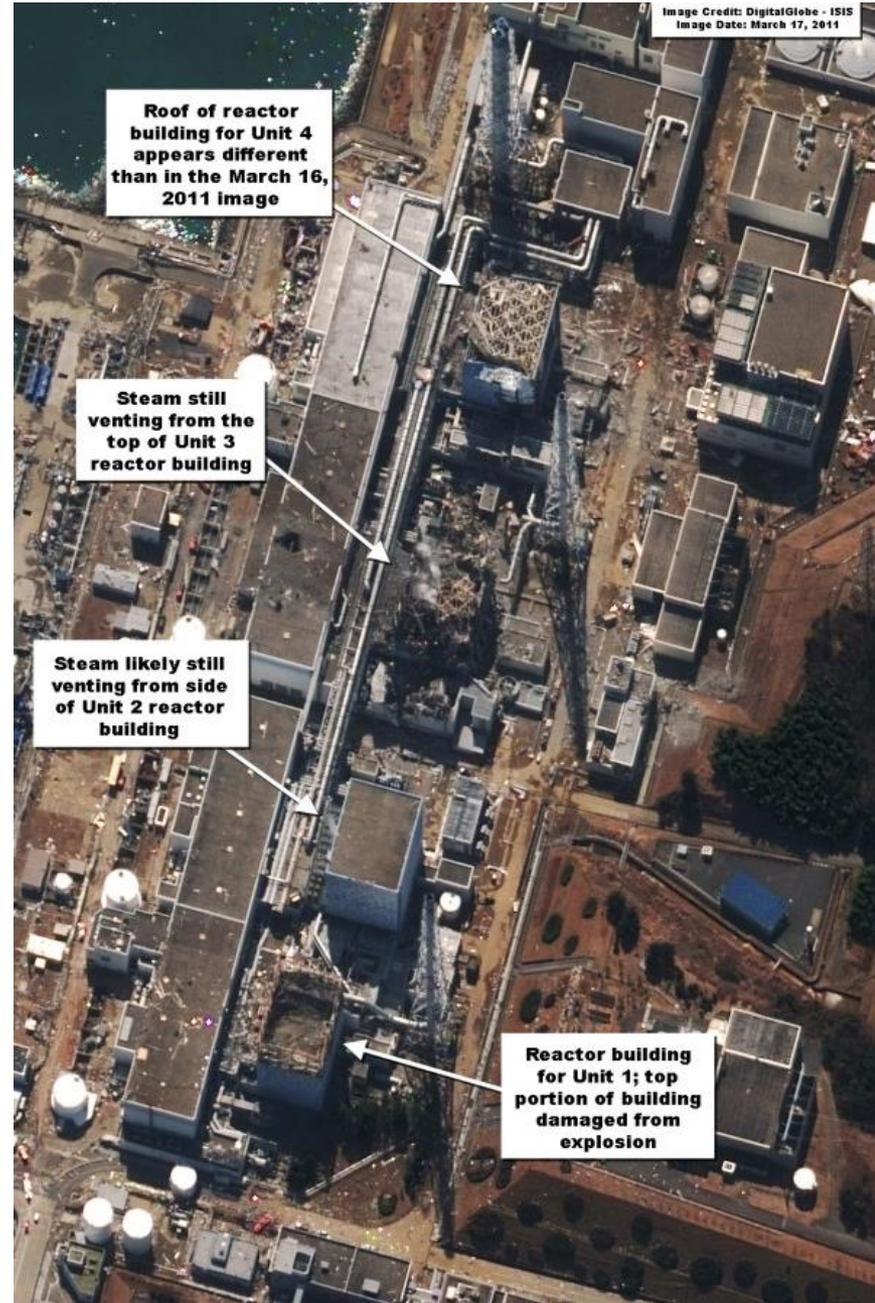
Il governo proclama lo stato d'emergenza nucleare e istituisce i centri d'emergenza locali; la prefettura di Fukushima ordina l'evacuazione della popolazione entro un raggio di 2 km dall'unità 1 della centrale, estesa poi in giornata a 3 km. Il giorno successivo il raggio della zona d'evacuazione fu portato a 10 km, e, dopo l'esplosione nell'edificio dell'unità 1, venne esteso a 20 km (170 mila persone).

Il 15 marzo, dopo l'esplosione nell'unità 2, venne richiesto agli abitanti nella zona fra 20 e 30 km di rimanere chiusi in casa (disposizione ritirata il 22 aprile), suggerendo l'evacuazione volontaria.

Sabato 12 marzo

- le batterie di emergenza si esauriscono
- il raffreddamento dei 3 reattori diminuisce e il materiale e vapore si surriscaldano; aumenta la pressione nel contenitore primario
- la parte superiore degli elementi di combustibile viene esposta con produzione di idrogeno
- si sfoga vapore (filtrato per bloccare la radioattività) dal reattore 1 per ridurre la pressione e raffreddare il nucleo
- esplosione di idrogeno nell'edificio del reattore 1 con distruzione della copertura della parte superiore che ospita la vasca per il combustibile esausto; 4 operai rimangono feriti
- arrivano da altre centrali batterie e generatori elettrici
- si pompa acqua di mare nel reattore 1
- distribuzione profilattica di iodio alla popolazione per contrastare l'assorbimento di iodio radioattivo

Primo obiettivo è di riprendere il controllo degli impianti, portare tutti i reattori a uno spegnimento freddo e liberare le zone allagate;
presto si rinuncia al salvataggio operativo dei reattori 1, 2 e 3 puntando a impedire la fusione dei noccioli e al mantenimento delle strutture di contenimento primario della radiazione;
sorgono problemi anche per le vasche di raffreddamento del combustibile esausto, in particolare per il reattore 4



Fukushima Daiichi Accident

Event sequence following earthquake (timing from it: 14:46, 11 March)

	Unit 1	Unit 2	Unit 3
Loss of AC power	+ 51 min	+ 54 min	+ 52 min
Loss of cooling	+ 1 hour	+ 70 hours	+ 36 hours
Water level down to top of fuel*	+ 3 hours	+ 74 hours	+ 42 hours
Core damage starts*	+ 4 hours	+ 77 hours	+ 44 hours
Reactor pressure vessel damage*	+11 hours	uncertain	uncertain
Fire pumps with fresh water	+ 15 hours		+ 43 hours
Hydrogen explosion (not confirmed for unit 2)	+ 25 hours service floor	+ 87 hours suppression chamber	+ 68 hours service floor
Fire pumps with seawater	+ 28 hours	+ 77 hours	+ 46 hours
Offsite electrical supply	+ 11-15 days		
Fresh water cooling	+ 14-15 days		

* according to 2012 MAAP (Modular Accident Analysis Program) analysis

Image Credit: DigitalGlobe
Image Annotation: ISIS
Image Date: March 14, 2011

Smoke or dust plume from the explosion

After the explosion at Unit 3, damage to the reactor building can be seen. Steam can be seen venting out of the reactor building

Steam venting out of the building

After the explosion at Unit 1, the top of the reactor building is damaged



Martedì 15 marzo

- **esplosione di idrogeno (generato nelle vasche del combustibile esausto) nell'edificio del reattore 4**
- **l'acqua della vasca per il combustibile esausto del reattore 4 inizia a bollire**
- **il livello dell'acqua nel reattore 5 scende a 2 m sopra il combustibile attivo**
- **i due generatori diesel d'emergenza del reattore 6 forniscono energia per i sistemi di raffreddamento dei reattori 5 e 6**
- **dosi di radioattività fino a 400 mSv/h misurate presso l'unità 3**
- **si inizia il raffreddamento delle vasche del combustibile esausto dei reattori 5 e 6**

Mercoledì 16 marzo

- nuovo incendio nella zona del combustibile esausto del reattore 4
- emissione di vapore dalla zona del combustibile esausto del reattore 3: probabilmente l'acqua di copertura sta bollendo
- controlli alle condizioni del combustibile esausto nelle 6 unità, i cui impianti di raffreddamento non sono operativi
- il personale non direttamente impegnato nelle operazioni di recupero viene allontanato

Giovedì 17 marzo

- elicotteri versano acqua nella vasca del combustibile esausto dei reattori 3 e 4, riempiendole
- iniziano i lavori per connettere le 6 unità alla rete esterna con nuove linee di alimentazione

Domenica 20 marzo

- i reattori 5 e 6 raggiungono la condizione di spegnimento "freddo"
- si inizia a versare acqua nella vasca del combustibile esausto del reattore 4



Unit 1 reactor building; top portion damaged from earlier explosion

Unit 3 reactor building; steam is no longer visible venting from the building

Unit 4 reactor building

Unit 2 reactor building; steam can still be seen venting through a hole from removed panel

**Image Credit: DigitalGlobe - ISIS
Image Date: March 18, 2011**

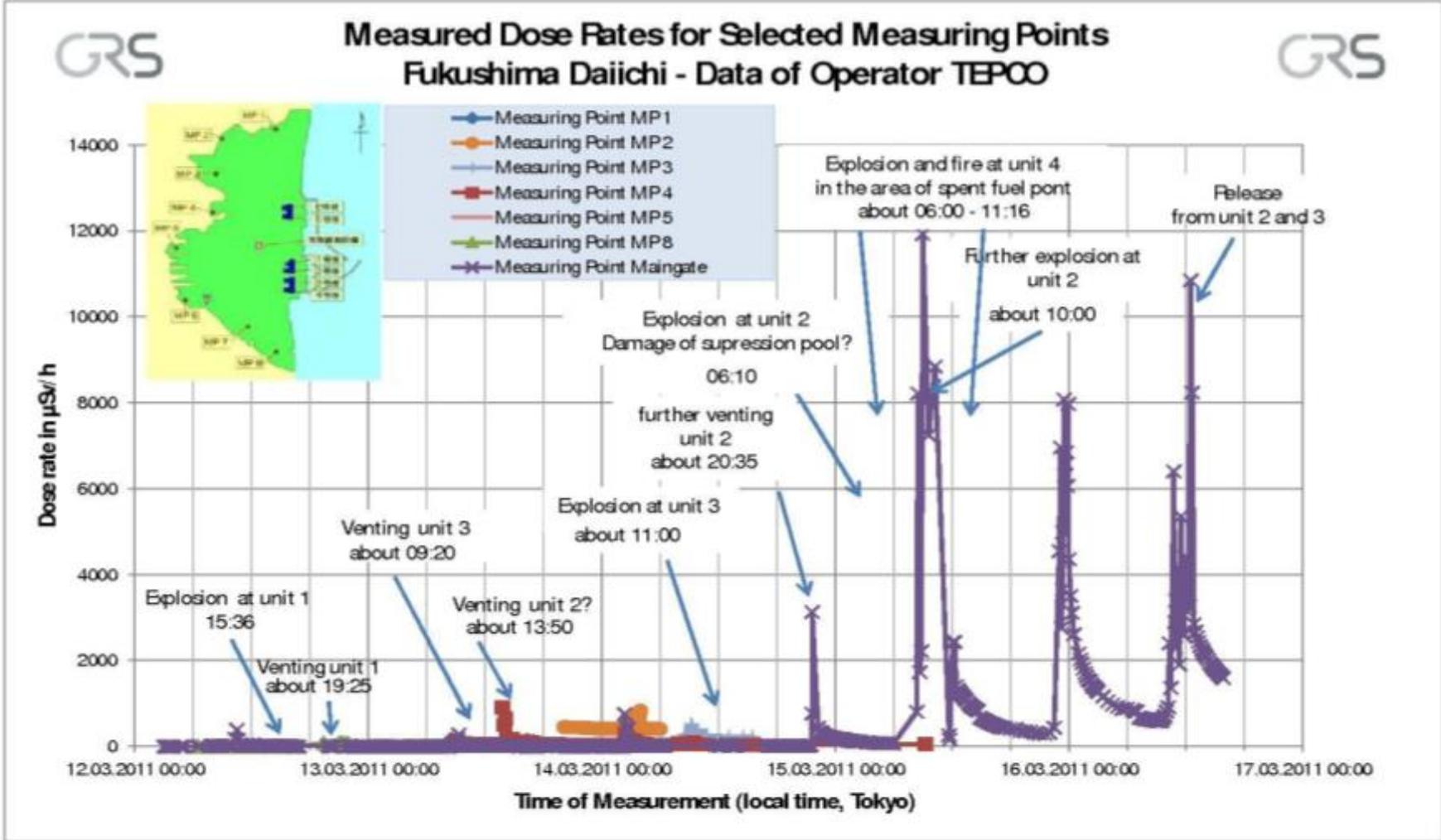
radiazione emessa a Fukushima

la radiazione emessa in iodio-131 e cesio-137 risulta circa lo 0,16% del totale presente nei reattori allo spegnimento (circa 81×10^{18} Bq di iodio-131); l'unità 1 ha emesso il doppio di iodio-131 rispetto all'unità 3 e l'unità 2 il decuplo dell'unità 1.

I livelli di radiazione nell'atmosfera presentano 3 picchi dal 12 marzo, con una notevole emissione il giorno 15,

- sono stabilizzati dal 16 marzo a livelli notevolmente superiori al normale, ma tali da permettere le operazioni del personale;
- da aprile le dosi sono andate diminuendo fino a scendere a metà luglio a circa 1,7 mSv/y ai bordi della centrale;
- l'emissione totale il 5 aprile era stimata in 154×10^{12} Bq/d, per scendere a 24×10^{12} Bq/d il 26 aprile e di un ulteriore fattore mille (a 4×10^9 Bq/d) a metà luglio

Radiation release chronology – Fukushima Dai-ichi

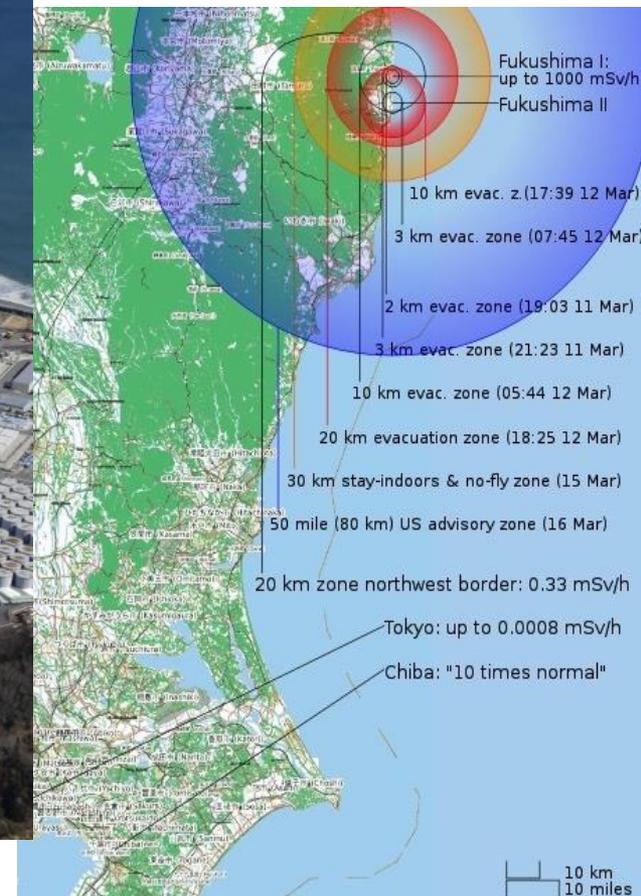


radiazione totale emessa (in Bq) dalla centrale di Fukushima e confronto con Chernobyl

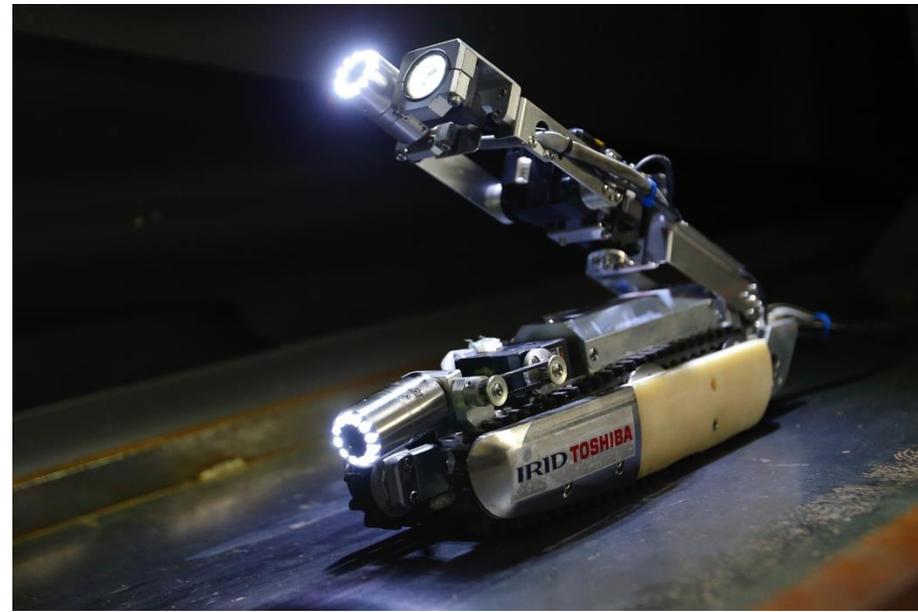
	Stima NISA (12 aprile)	Stima NSC (5 aprile)	Stima NISA (giugno)	A Chernobyl
Iodio-131	$1,3 \times 10^{17}$	$1,5 \times 10^{17}$	$1,6 \times 10^{17}$	$1,8 \times 10^{18}$
Cesio-137	$6,1 \times 10^{15}$	$1,2 \times 10^{16}$	$1,5 \times 10^{16}$	$8,5 \times 10^{16}$
Cesio Iodio eq	$2,4 \times 10^{17}$	$4,8 \times 10^{17}$	$6,1 \times 10^{17}$	$3,4 \times 10^{18}$
Totale Iodio eq	$3,7 \times 10^{17}$	$6,3 \times 10^{17}$	$7,7 \times 10^{17}$	$5,2 \times 10^{18}$

A large amount of contaminated water has accumulated on site and has been treated to remove all but traces of tritium, which limits the potential to release treated water to the sea.

Some radioactivity has been released to the sea, but this has mostly been low-level and it has not had any significant impact beyond the immediate plant structures. Concentrations outside these structures have been below regulatory levels since April 2011.



piano interventi a Fukushima



priorità

- rimozione delle sorgenti di contaminazione
- prevenzione della perdita di acqua contaminata
- isolamento della falda dalle sorgenti contaminanti

- reattori 5 e 6 disattivati nel 2014
- rimozione del combustibile trattato entro il 2024
- rimozione del combustibile dei reattori entro 25 anni
- demolizione reattori 1–4 nel giro di 30–40 anni

prime lezioni da Fukushima

- **il ricorso all'energia elettronucleare richiede livelli straordinari e profondi di conoscenze teoriche e pratiche, risorse, infrastrutture, ed esperienza di pianificazione e gestione**
- **queste capacità vanno rigorosamente accertate prima del lancio di nuovi programmi, con verifiche anche a livello internazionale**
- **gli impianti con reattori costruiti prima delle ultime norme di sicurezza vanno chiusi o dotati delle attuali strutture**
- **vanno riesaminati i rischi sismici delle varie zone, alla luce di recenti sismi con potenza superiore a quella storica nota, e di conseguenza la risposta degli impianti**
- **i piani energetici devono prevedere una varietà di sorgenti rispondenti a differenti fattori di rischio**
- **vanno previsti e provati piani per affrontare anche evenienze ambientali e logistiche di dimensioni inaspettate e creare una mentalità diffusa cosciente e profonda di sicurezza nei dirigenti, gli operatori, le autorità locali e la popolazione**

Il concetto di difesa in profondità sta imponendosi come strategia fondamentale e coinvolge tutte le fasi della produzione energetica, dalla scelta del sito e progettazione degli impianti, alla formazione del personale e alla operazione delle centrali.

Richiede la creazione di barriere fisiche successive che garantiscano il contenimento del materiale radioattivo in ogni condizione.

Impone la creazione di una forte cultura di sicurezza in tutti coloro che ad ogni titolo sono coinvolti nelle attività nucleari e un sistema efficace e continuo di verifiche.

Un incidente nucleare in un posto qualunque è un incidente ovunque.





pascolini@pd.infn.it
<http://perlascienza.eu>

X @apascolini