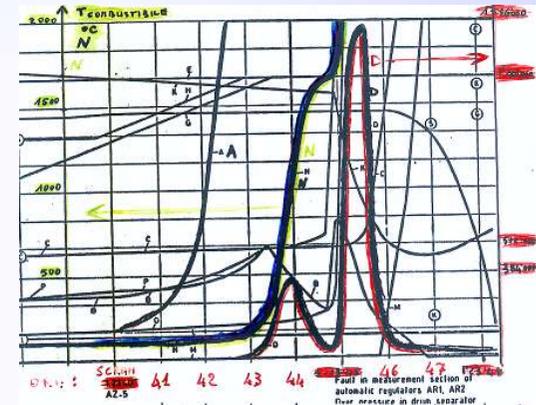


# Il disastro di Chernobyl

## cause e conseguenze



Saverio Altieri



DIPARTIMENTO DI FISICA UNIVERSITA' DI PAVIA  
INFN Sezione di Pavia

Saverio Altieri Seminari di fisica  
ambientale MiB 13-05-21

# **Chernobyl**

**26 aprile 1986**  
**ore 1:24 del mattino**

**Due esplosioni in rapida successione distruggono il nocciolo dell'unità 4 della centrale nucleare**

**La potenza delle esplosioni lancia 6 tonnellate di sostanze radioattive verso gli strati alti dell'atmosfera**

**I venti disperdono la radioattività su tutto l'Emisfero Nord dal Canada al Giappone**

**L'Europa viene investita in pieno  
Ucraina, Bielorussia e Federazione Russa sono le nazioni più colpite**

**Ancora oggi molti si chiedono**

**cosa ha provocato una simile catastrofe?**

**cosa hanno fatto gli operatori della centrale per provocare un tale disastro?**

**Da una parte tutto sembra complesso  
dall'altra è facile vedere in Chernobyl la materializzazione della paura del  
nucleare e giungere naturalmente alla più ovvia delle conclusioni**

**L'energia nucleare è pericolosa!!!**

**Ma questo già lo sapevamo!!!**

**Tutto era chiaro ancora prima che il disastro si verificasse**

**agli operatori forse NO  
ai progettisti del reattore sicuramente SI**

**gli operatori hanno causato l'incidente**

**i progettisti la catastrofe**

**Sarebbe stato sufficiente usare acqua pesante o anidride carbonica come refrigerante al posto dell'acqua leggera, e oggi non saremmo qui a parlare di Chernobyl**

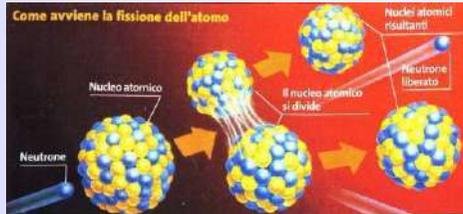
**Il disastro è connesso a tre ingredienti essenziali su cui si fonda la sicurezza di un reattore**

**IL COEFFICIENTE  
DI VUOTO  
della reattività**

**IL SISTEMA  
DELLE BARRE  
DI CONTROLLO**

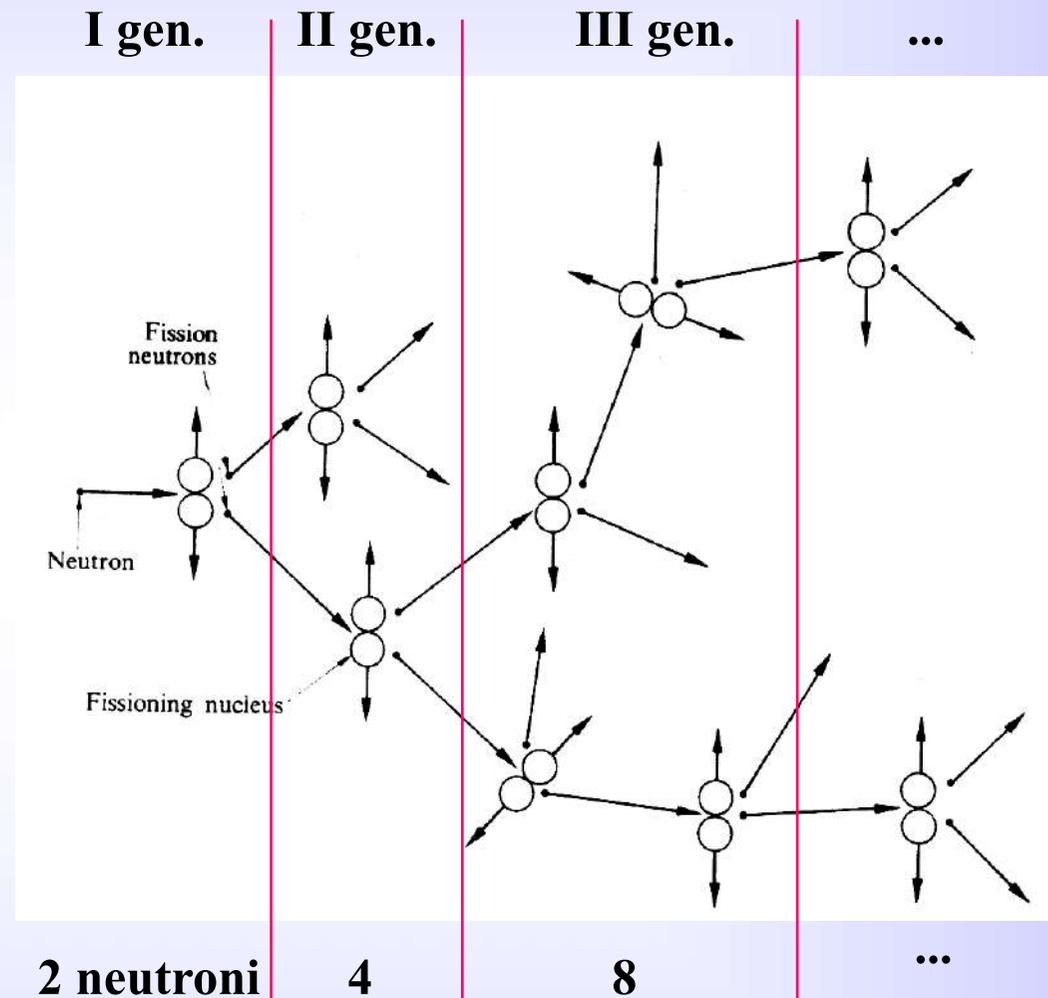
**IL SISTEMA DI  
CONTENIMENTO  
DEL REATTORE**

# LA REZIONE A CATENA



FATTORE DI MOLTIPLICAZIONE

$$K = \frac{n. \text{ in data gen.}}{n. \text{ in gen. prec.}}$$



# CRITICITA' E REATTIVITA'

Un reattore nucleare è un sistema in cui la reazione a catena avviene in maniera controllata

$K \begin{cases} < 1 \rightarrow \text{pop. decresc.} \rightarrow \text{r. sottocritico} \\ = 1 \rightarrow \text{pop. costante} \rightarrow \text{REATTORE CRITICO} \\ > 1 \rightarrow \text{pop. crescente} \rightarrow \text{r. sopracritico} \end{cases}$

$$\rho = \frac{K - 1}{K}$$

Il reattore può essere controllato inserendo o estraendo reattività positiva o negativa con le barre di controllo

# LA FUGA DALLE RISONANZE

$U$  arricchito  $^{235}\text{U}$  3-4 %  
 $^{238}\text{U}$  96-97 %

I neutroni nel rallentamento

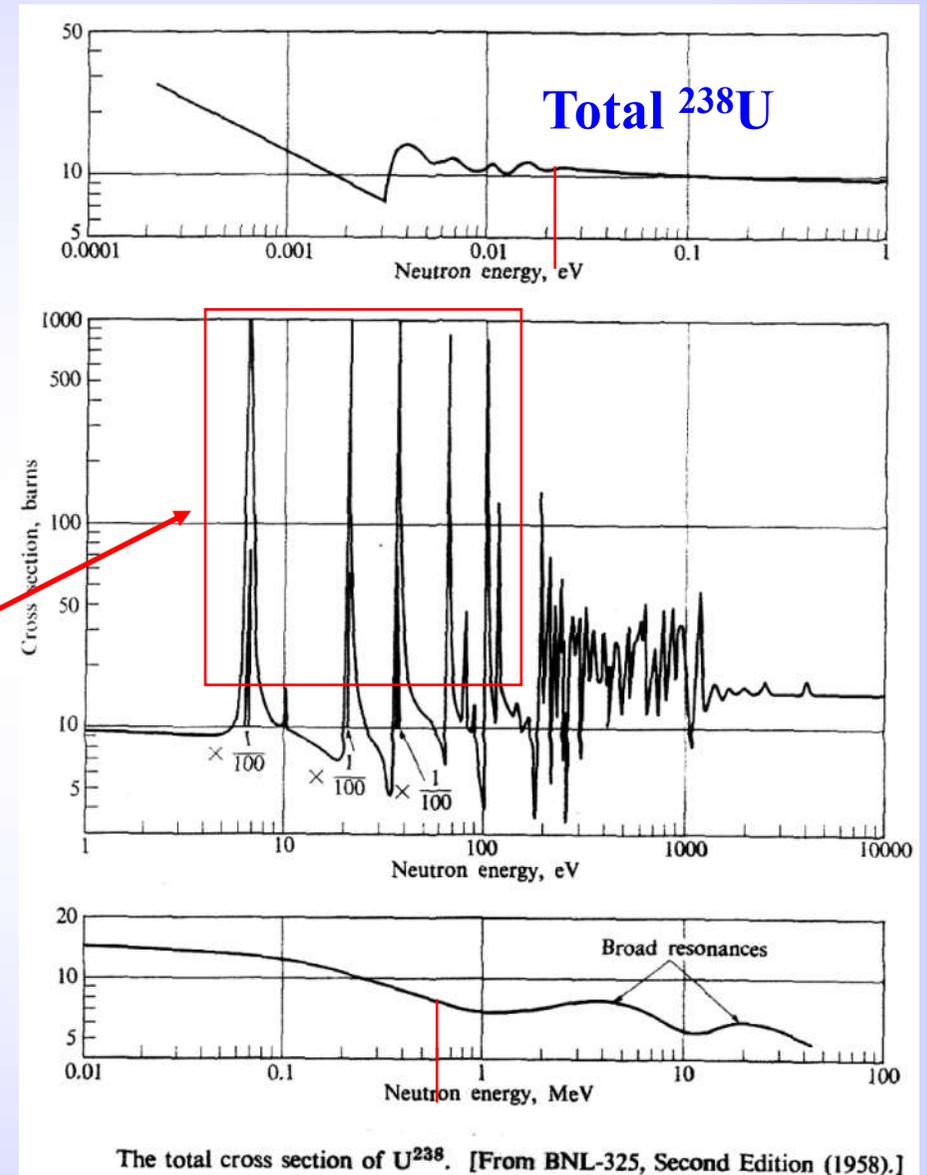
$$E_n = 0.7\text{MeV} \Rightarrow E_n = 0.025\text{eV}$$



Passano attraverso  
le risonanze

CATTURE PARASSITE

Produzione del plutonio



# L'AVVELENAMENTO

Prodotti di fissione con elevatissima probabilita' di cattura dei neutroni

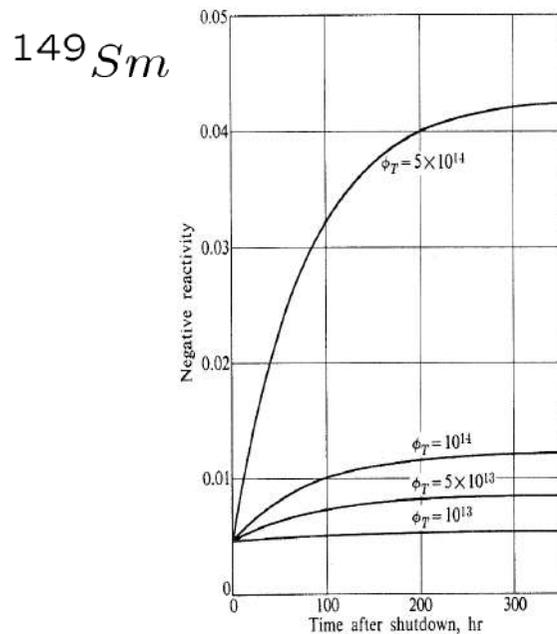
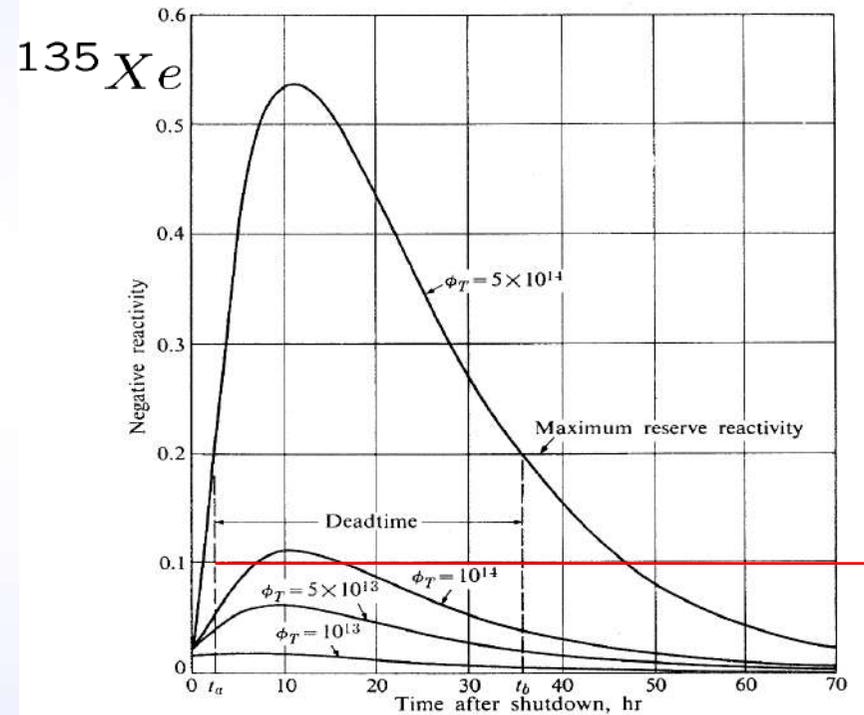


Fig. 13-5. Samarium-149 buildup after shutdown for various values of the operating flux.

$$\sigma = 4.08 \cdot 10^4 b$$



Xenon-135 buildup after shutdown for several values of the operating flux before shutdown.

$$\sigma = 2.7 \cdot 10^6 b$$

# COEFFICIENTI DI REATTIVITA'

Che tipo di reattivita' inserisce una variazione di temperatura?  
O una variazione di densita' del refrigerante o del moderatore?

$$\alpha_T = \frac{d\rho}{dT}$$

COEFFICIENTE  
DI TEMPERATURA

$$\rho = \frac{K-1}{K}$$

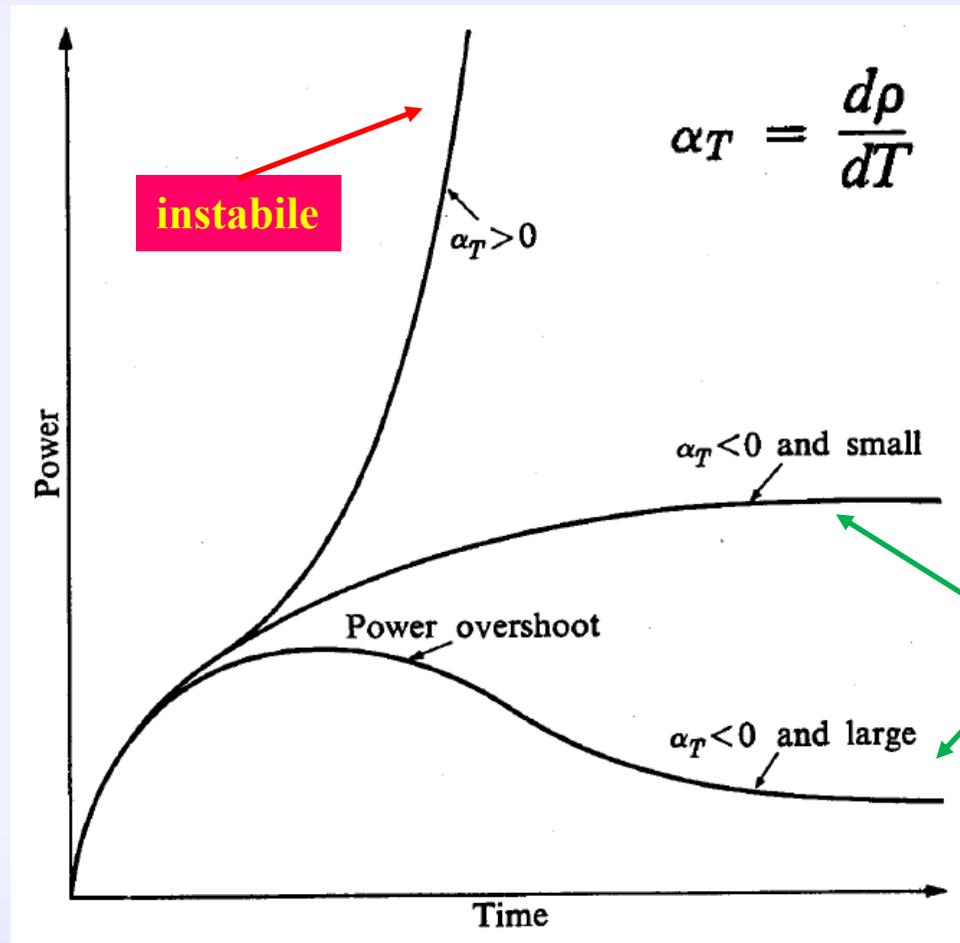
$$\alpha_V = \frac{d\rho}{dx}$$

COEFFICIENTE  
DI VUOTO

PER LA GESTIONE IN SICUREZZA DEL REATTORE QUESTI  
COEFFICIENTI DEVONO ESSERE NEGATIVI

# I MECCANISMI DI SICUREZZA INTRINSECA

## IL COEFFICIENTE DI TEMPERATURA

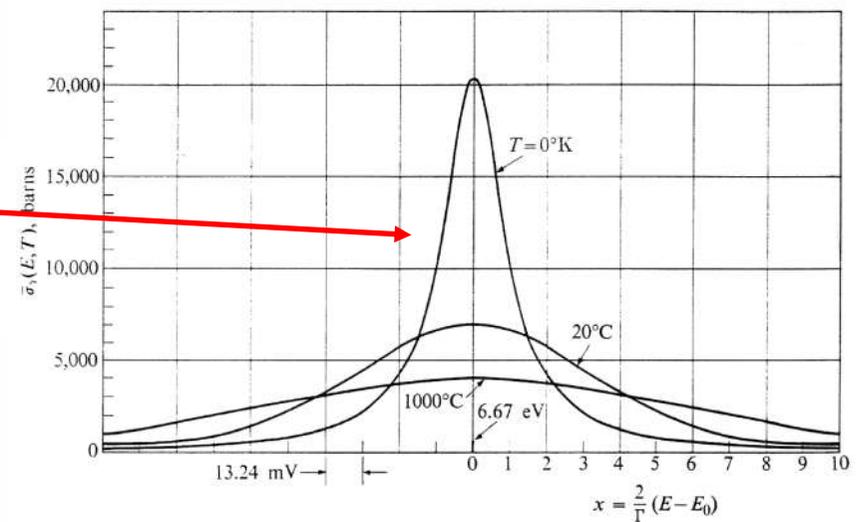
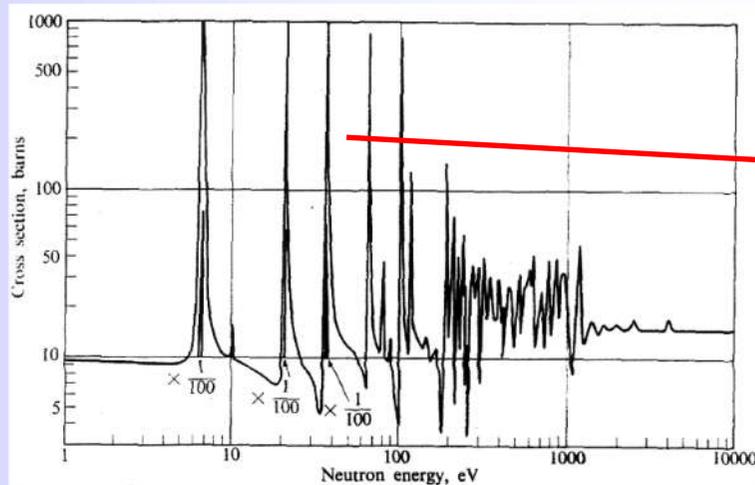


# I MECCANISMI DI SICUREZZA INTRINSECA

## IL COEFFICIENTE DI TEMPERATURA

$$\alpha_T = \frac{d\rho}{dT}$$

Le catture parassite in  $^{238}\text{U}$  aumentano con la temperatura e rendono il reattore più stabile



Doppler broadening of the capture cross section of  $\text{U}^{238}$  at the 6.67 eV resonance.

$$\Delta P > 0$$



$$\Delta T > 0$$



Più neutroni  
assorbiti in  $^{238}\text{U}$



Meno fissioni



Potenza in  
diminuzione

# I MECCANISMI DI SICUREZZA INTRINSECA

## IL COEFFICIENTE DI VUOTO

$$\alpha_v = \frac{d\rho}{dx}$$

Senza il rallentamento dei neutroni la reazione a catena si spegne

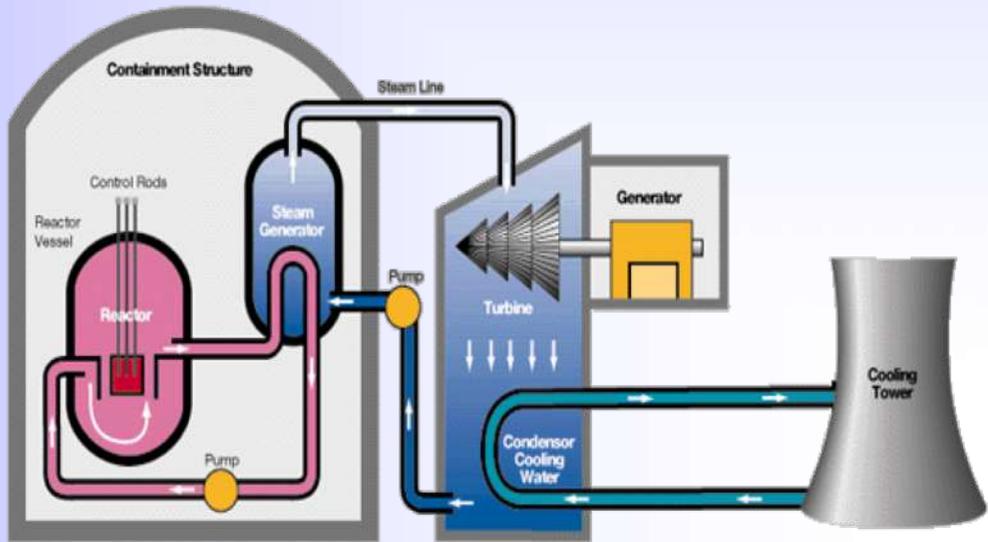


## COEFFICIENTE DI VUOTO NEGATIVO

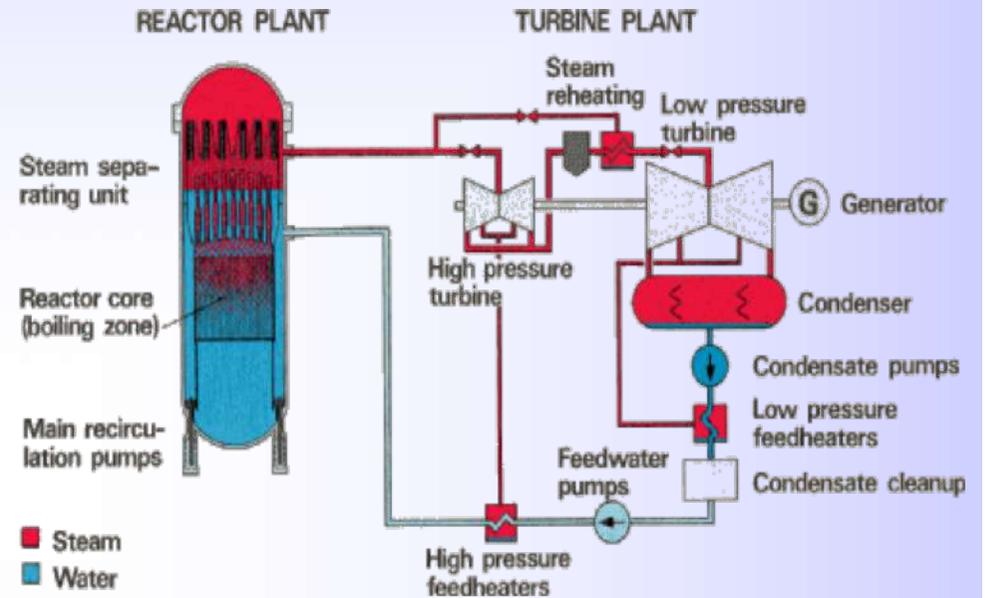


# REATTORI e Coefficienti di reattività

## PWR



## BWR



## PWR e BWR

## RBMK

COEFFICIENTE DI  
TEMPERATURA

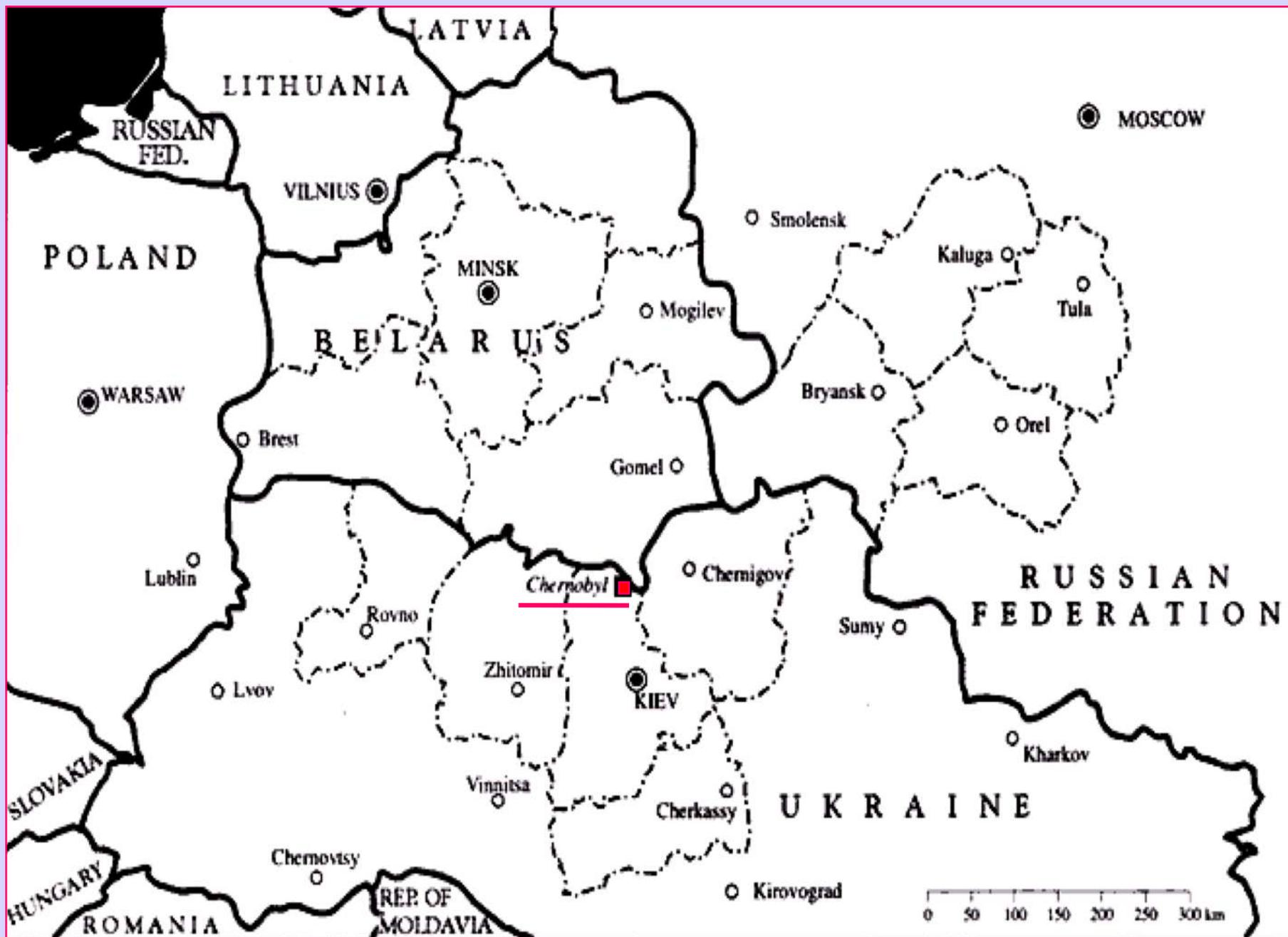
COEFFICIENTE  
DI VUOTO

NEGATIVO

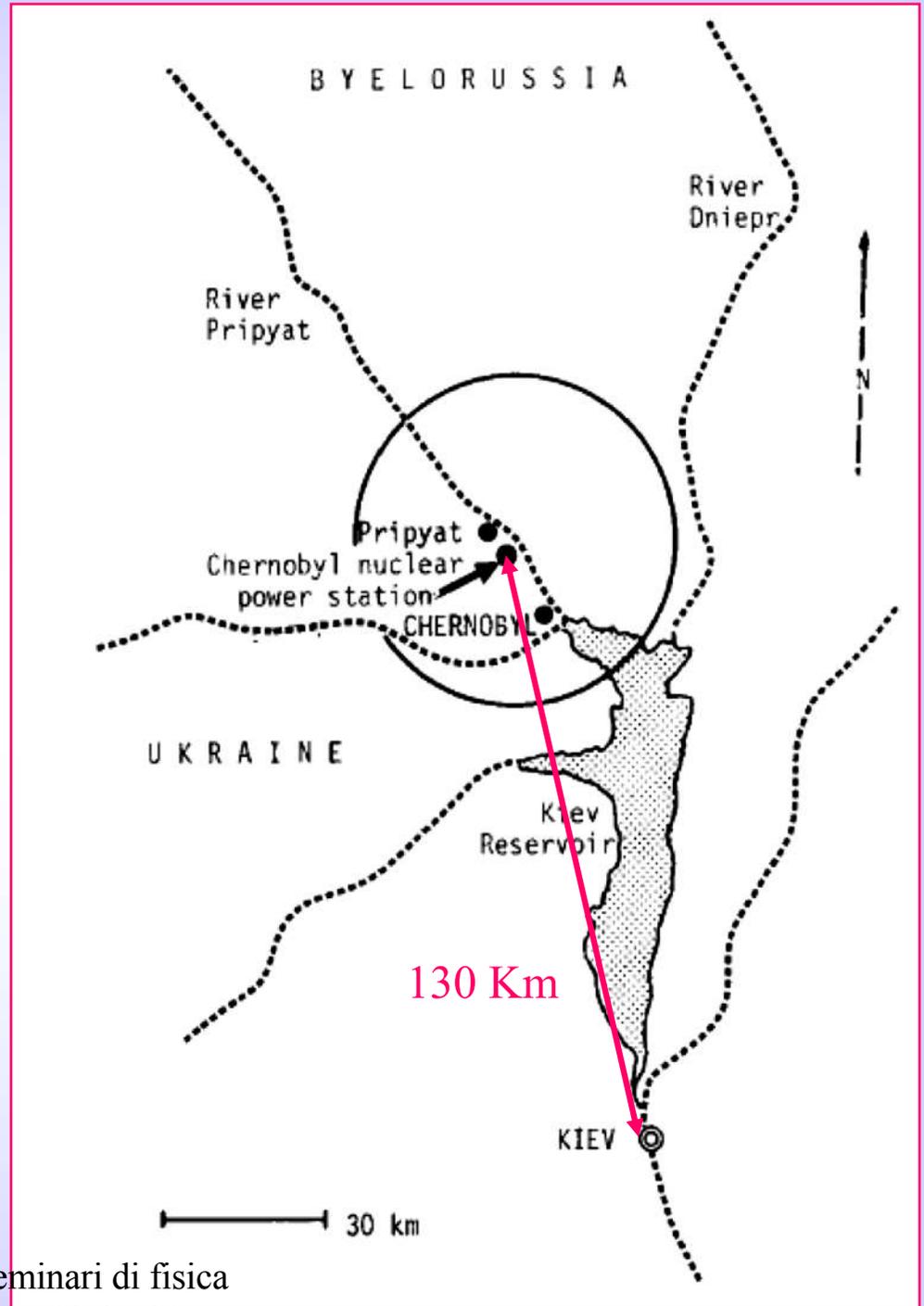
NEGATIVO

NEGATIVO

POSITIVO



Saverio Altieri Seminari di fisica  
ambientale MiB 13-05-21





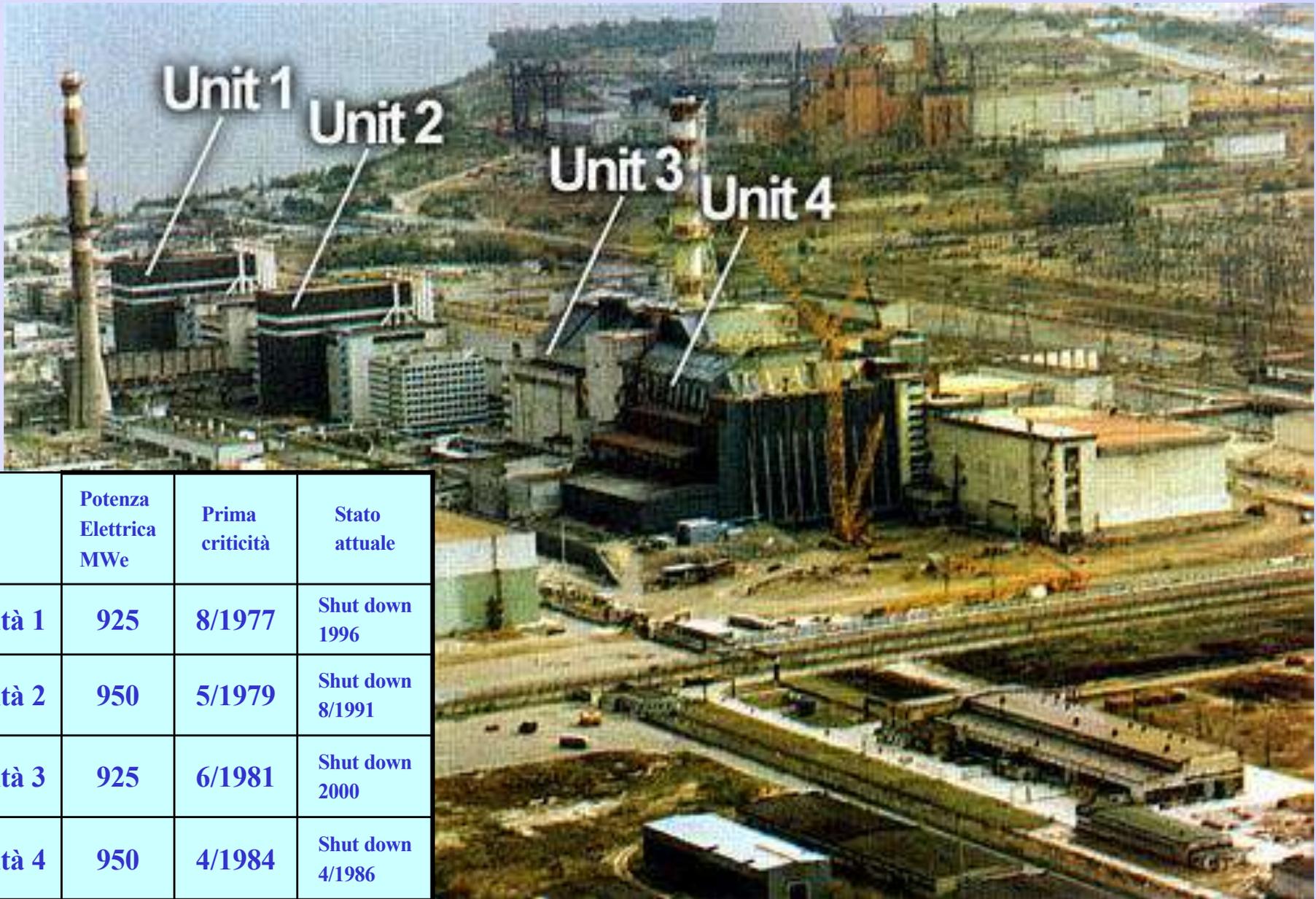
Saverio Altieri Seminari di fisica  
ambientale MiB 13-05-21



Saverio Altieri Seminari di fisica  
ambientale MiB 13-05-21



Saverio Altieri Seminari di fisica  
ambientale MiB 13-05-21



	Potenza Elettrica MWe	Prima criticità	Stato attuale
Unità 1	925	8/1977	Shut down 1996
Unità 2	950	5/1979	Shut down 8/1991
Unità 3	925	6/1981	Shut down 2000
Unità 4	950	4/1984	Shut down 4/1986

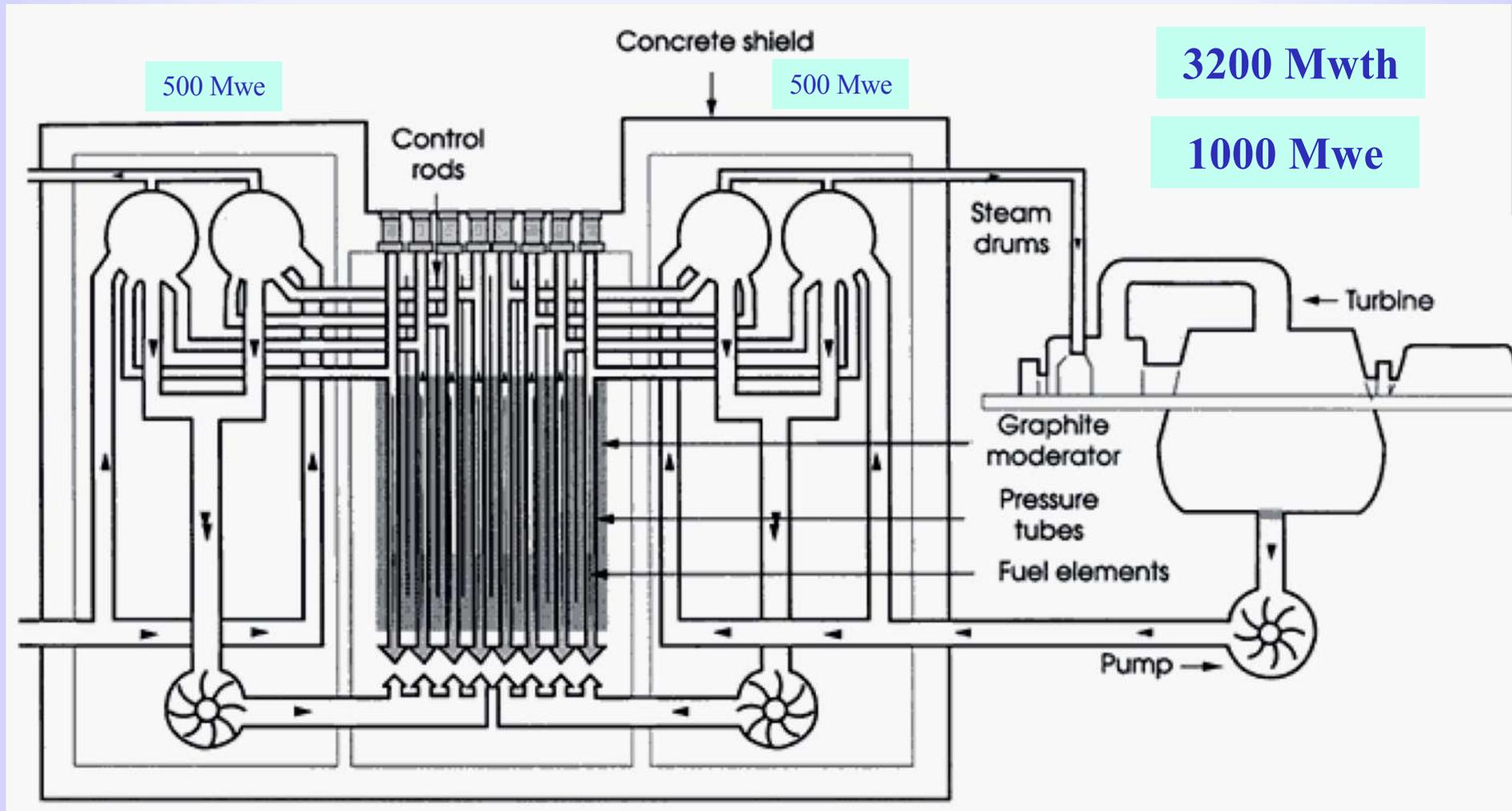
Altre 2 unità erano in costruzione 1.5 Km più a Sud

Saverio Altieri Seminari di fisica ambientale MiB 13-05-21

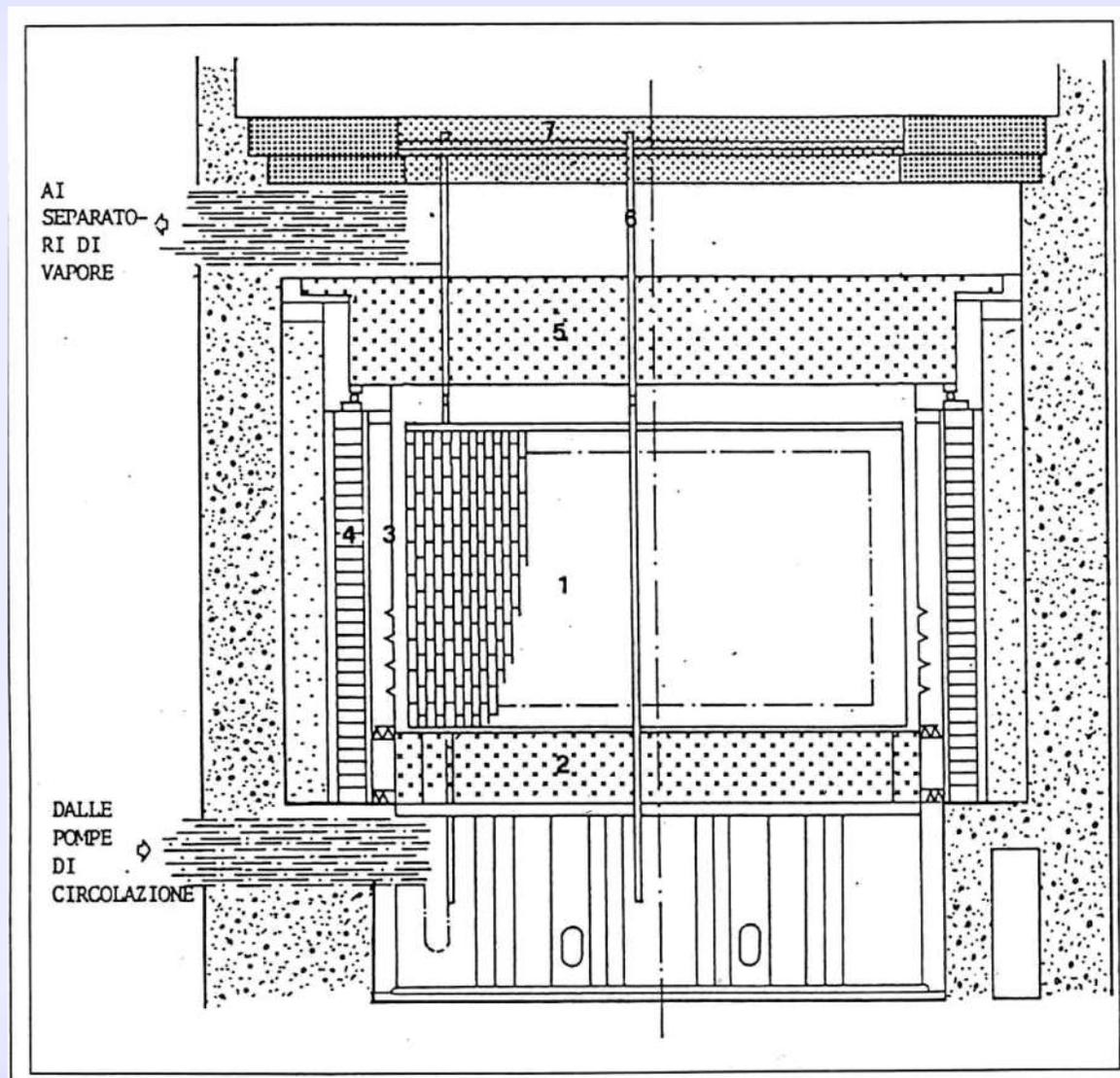
**Ignalina Kursk  
Leningrad Smolensk**

# RBMK Reactor Bolshoi Moschnosti Kanalnyi

Reattore ad acqua bollente in tubi a pressione



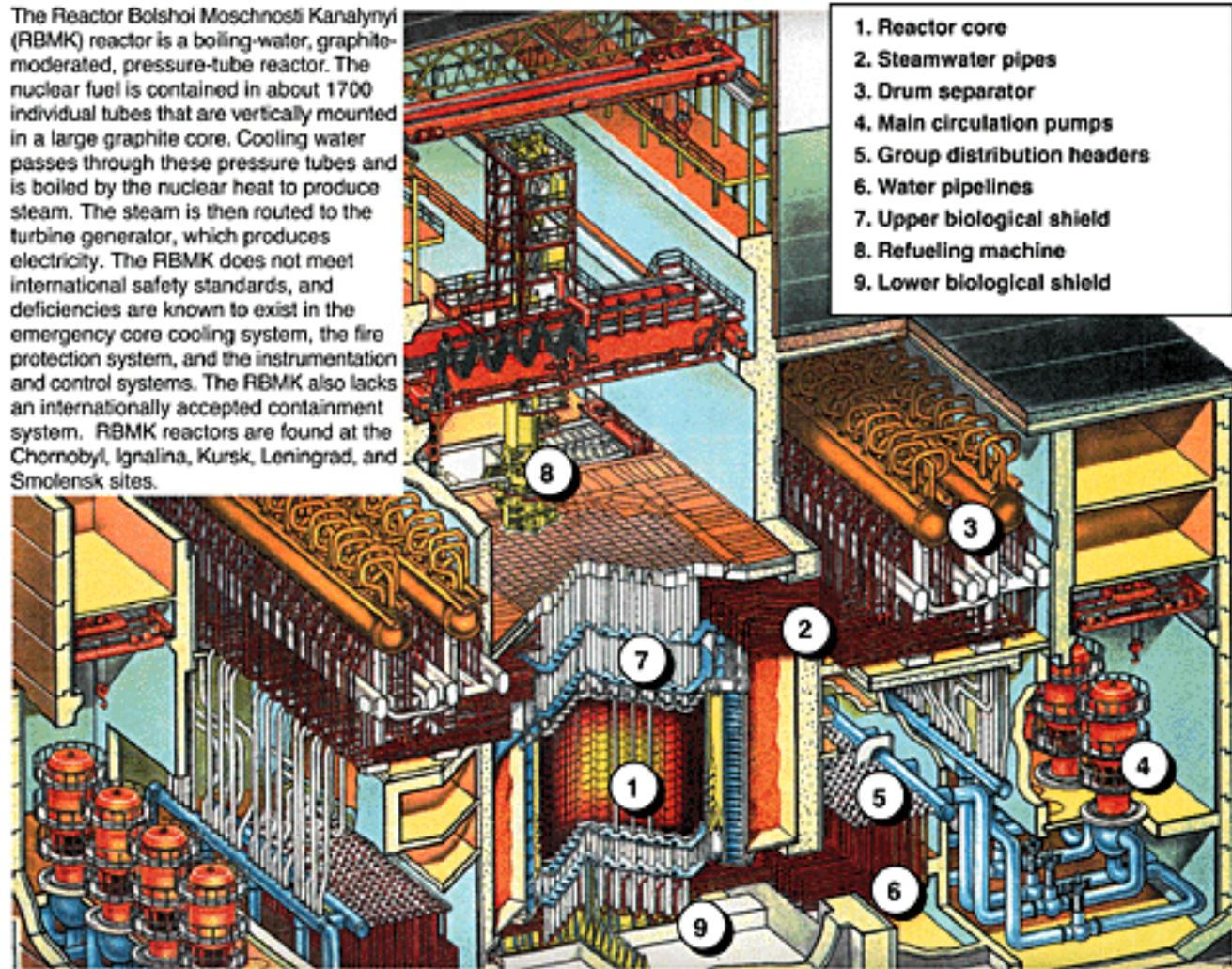
# RBMK Reactor Bolshoi Moschnosti Kanalnyy



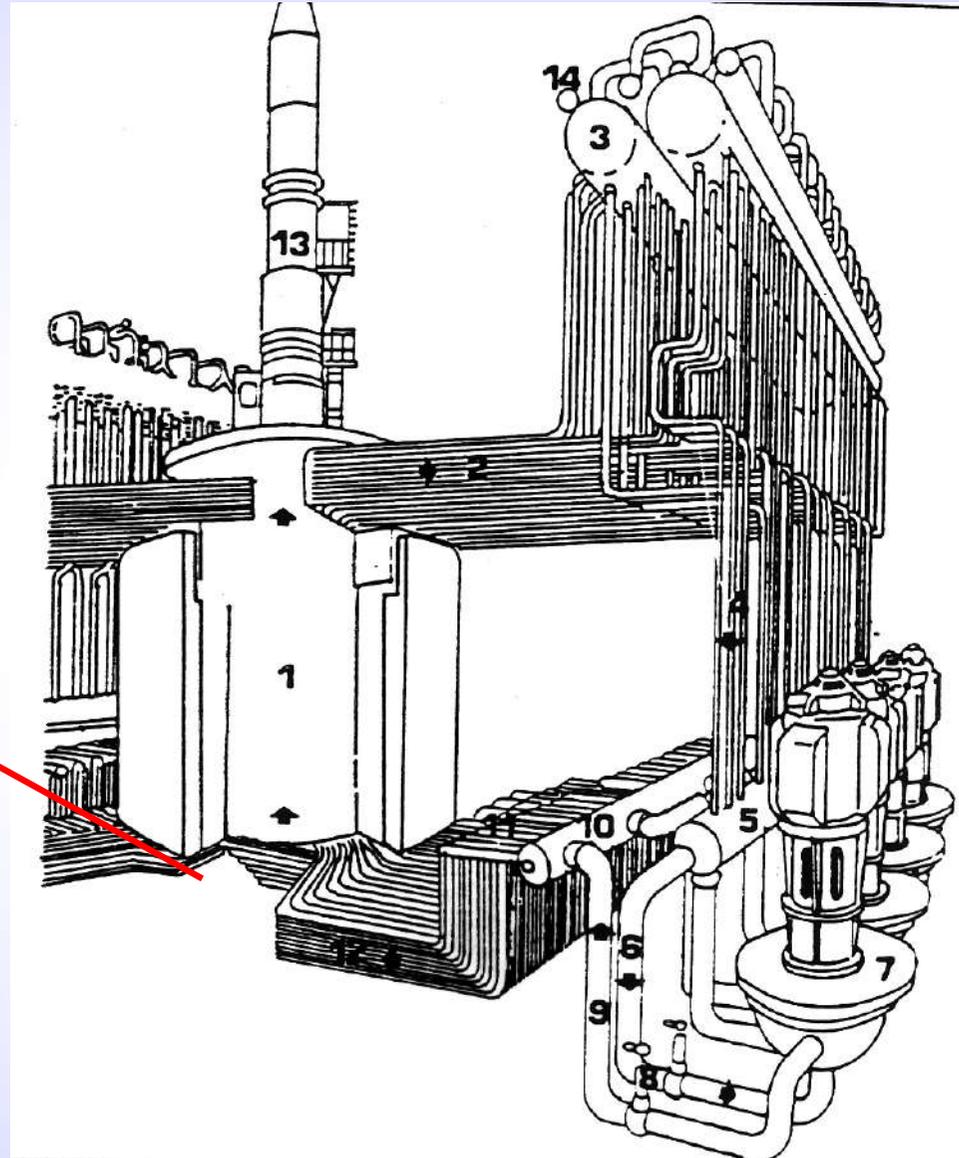
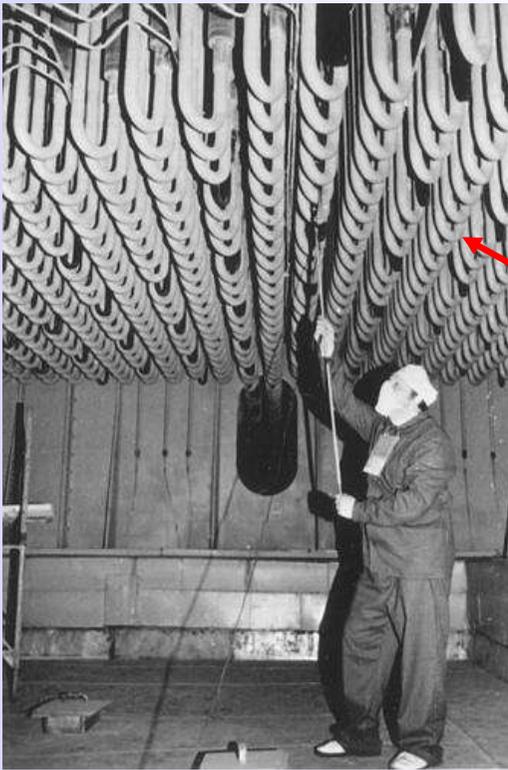
# RBMK Reactor Bolshoi Moschnosti Kanalnyyi

## RBMK Plant Layout

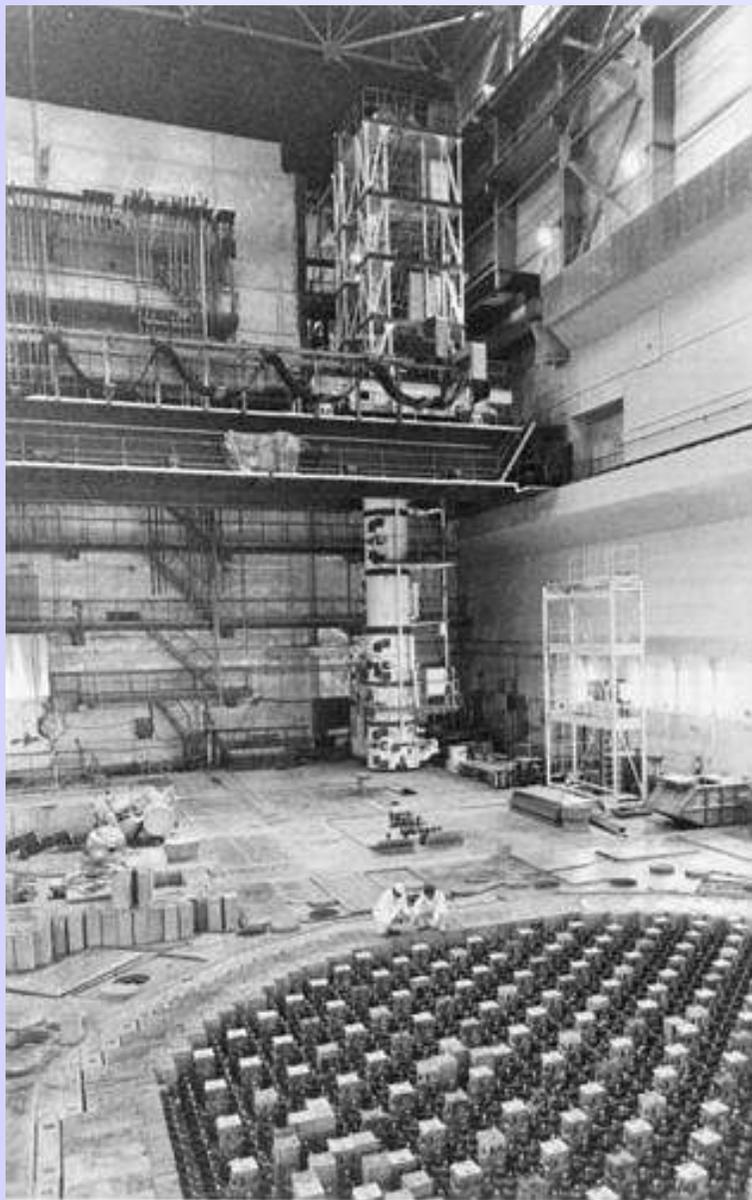
The Reactor Bolshoi Moschnosti Kanalnyyi (RBMK) reactor is a boiling-water, graphite-moderated, pressure-tube reactor. The nuclear fuel is contained in about 1700 individual tubes that are vertically mounted in a large graphite core. Cooling water passes through these pressure tubes and is boiled by the nuclear heat to produce steam. The steam is then routed to the turbine generator, which produces electricity. The RBMK does not meet international safety standards, and deficiencies are known to exist in the emergency core cooling system, the fire protection system, and the instrumentation and control systems. The RBMK also lacks an internationally accepted containment system. RBMK reactors are found at the Chernobyl, Ignalina, Kursk, Leningrad, and Smolensk sites.



# RBMK Reactor Bolshoi Moschnosti Kanalnyyi



# RBMK Reactor Bolshoi Moschnosti Kanalnyi



**Schermo biologico 700 t**



**Blocchi di piombo 1000 t**



**Macchina di carico e scarico combustibile 250 t**

Saverio Altieri Seminari di fisica  
ambientale MiB 13-05-21

# RBMK Reactor Bolshoi Moschnosti Kanalnyi

## la sala controllo



# Nocciolo RBMK

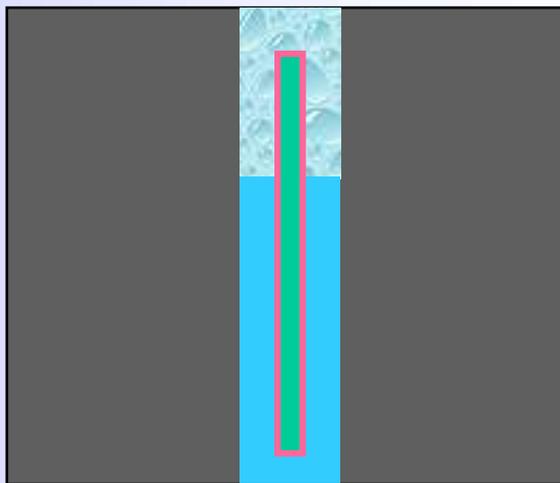
Reattore ad acqua bollente  
Moderatore: grafite  
Refrigerante: acqua leggera

**192 t di  $^{235}\text{U}$  2 %**

**1680 canali di combustibile**

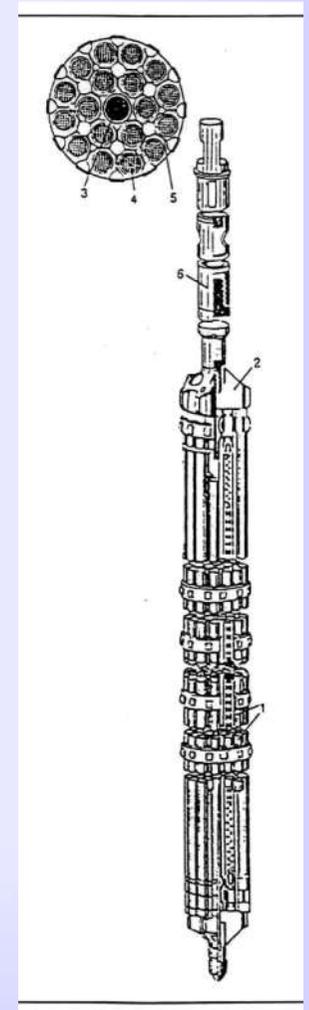
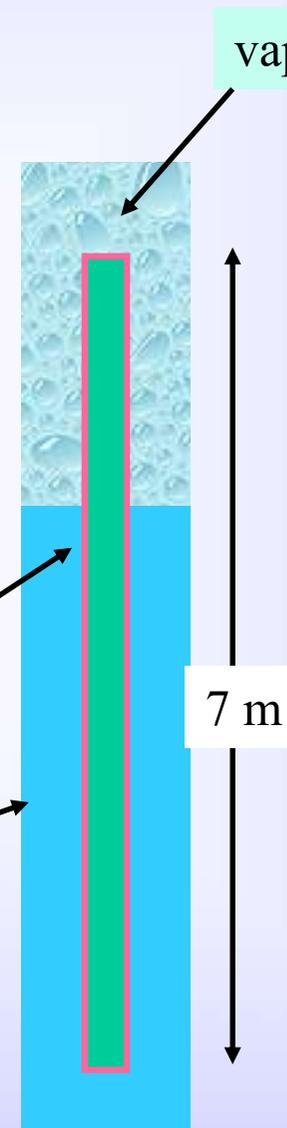
**211 barre di controllo  $\text{B}_4\text{C}$**

**2500 t di grafite**

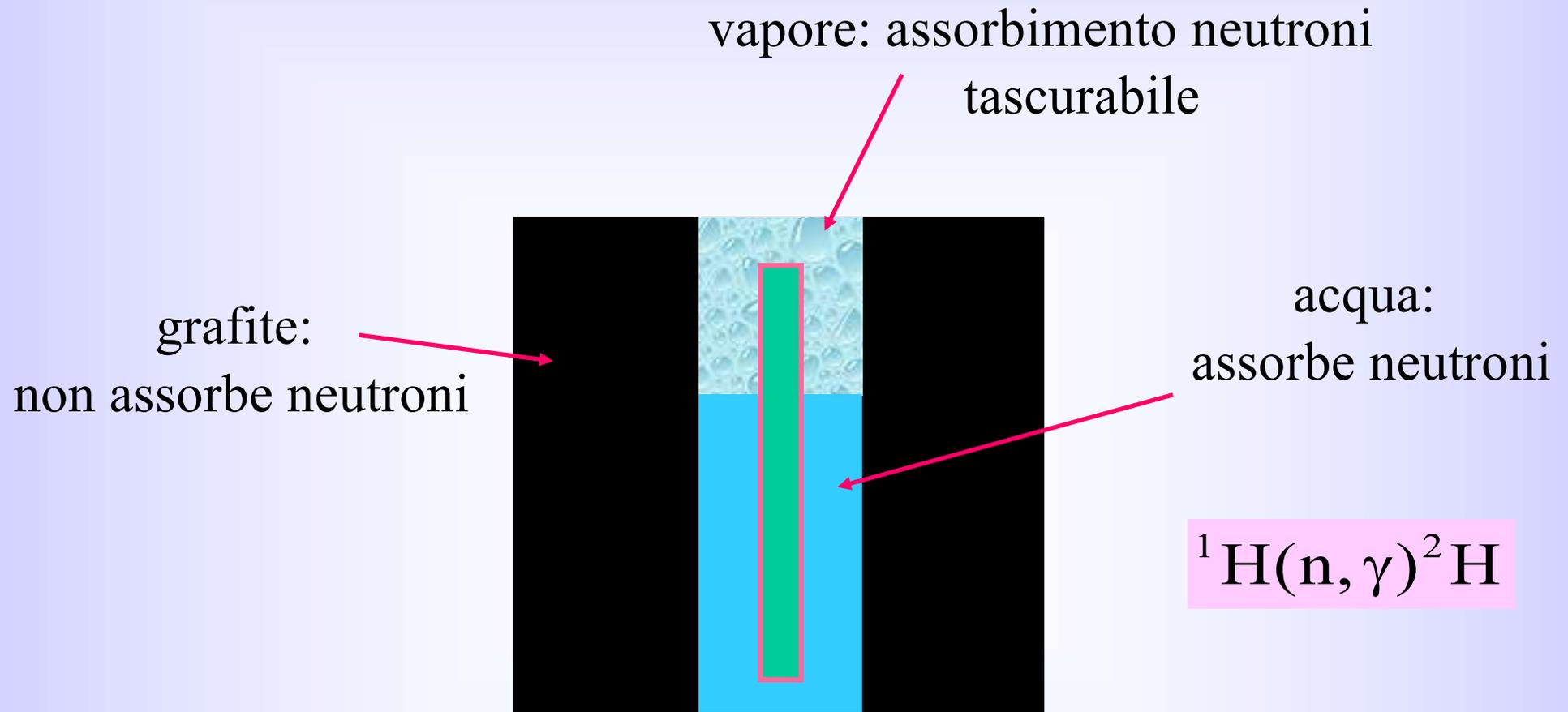


Rivestimento in  
lega di zirconio

acqua leggera



## RBMK e Coefficiente di vuoto **POSITIVO**



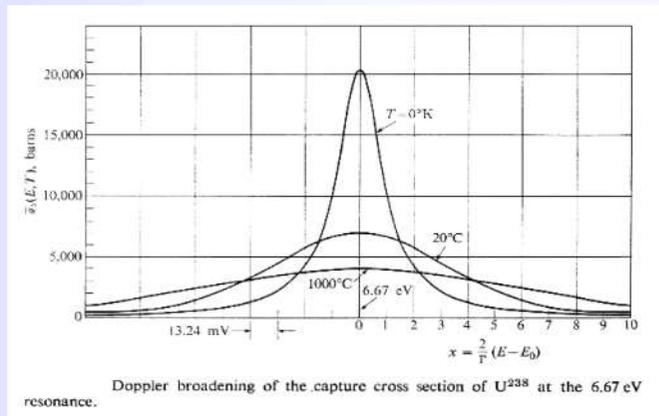
una diminuzione del livello di acqua  
produce un aumento di potenza

**COEFFICIENTE DI VUOTO  
POSITIVO**

# RBMK e Coefficienti di reattività

## COEFFICIENTI TEMPERATURA

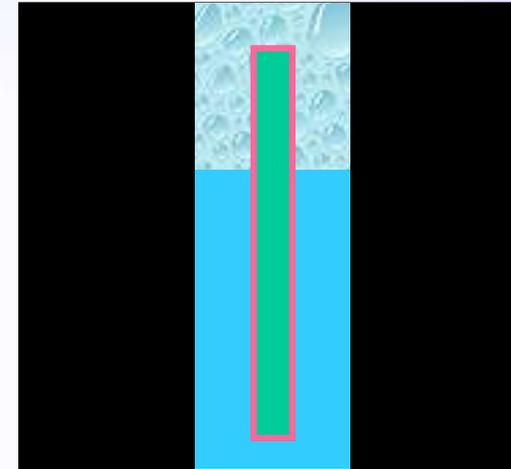
NEGATIVO



A piena potenza  
il coefficiente negativo di  
temperatura compensa  
quello positivo di vuoto

## COEFFICIENTI DI VUOTO

POSITIVO



a bassa potenza  
predomina  
il coefficiente positivo di vuoto

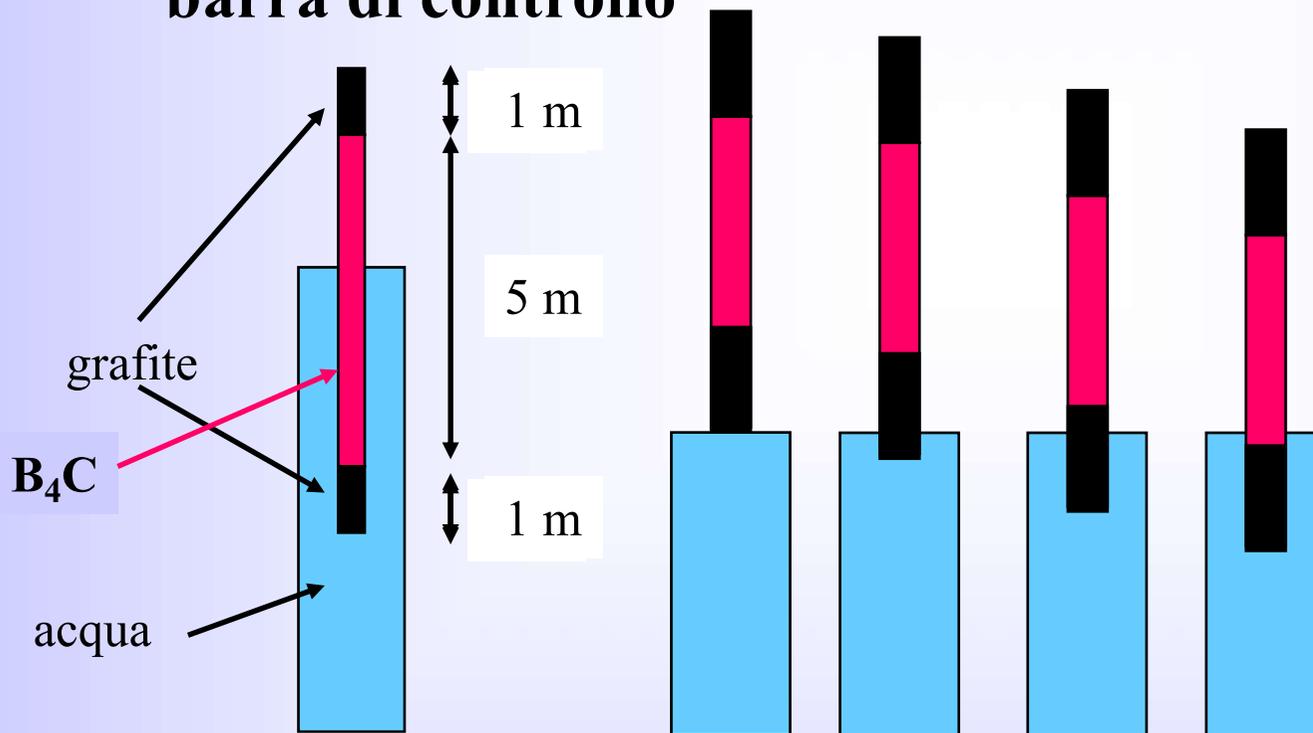
# RBMK e barre di controllo

sistema di controllo molto complesso

**211** barre al carburo di boro  $B_4C$

Tempo di inserimento rapido: 20 s

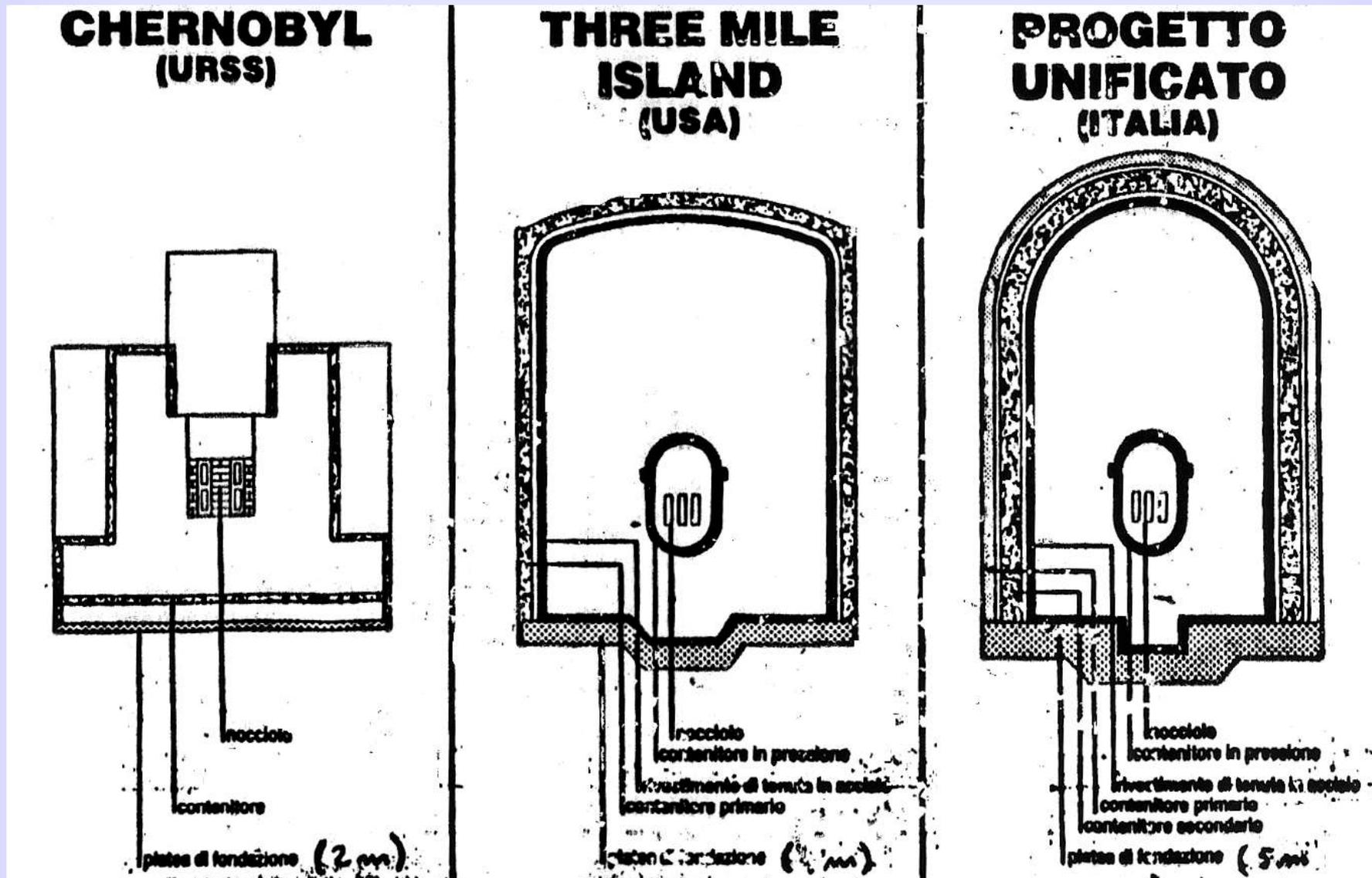
## barra di controllo



La grafite sposta l'acqua e inserisce una reattività positiva di  $+0.5\beta$

L'introduzione delle barre di controllo nel tratto iniziale inietta reattività positiva provoca un **aumento** di potenza

# RBMK e sistema di Contenimento



# CARATTERISTICHE CONTENITORE dell' EPR

- Doppio contenimento
- "Liner" interno in acciaio a tenuta (6 mm)
- Cilindro interno in calcestruzzo armato precompresso 1.3 m
- Cilindro esterno in calcestruzzo rinforzato 1.3 m
- Volte ellissoidali tra loro indipendenti
- Basamento in calcestruzzo 6m



# EVENTI CHE HANNO PORTATO ALL'INCIDENTE

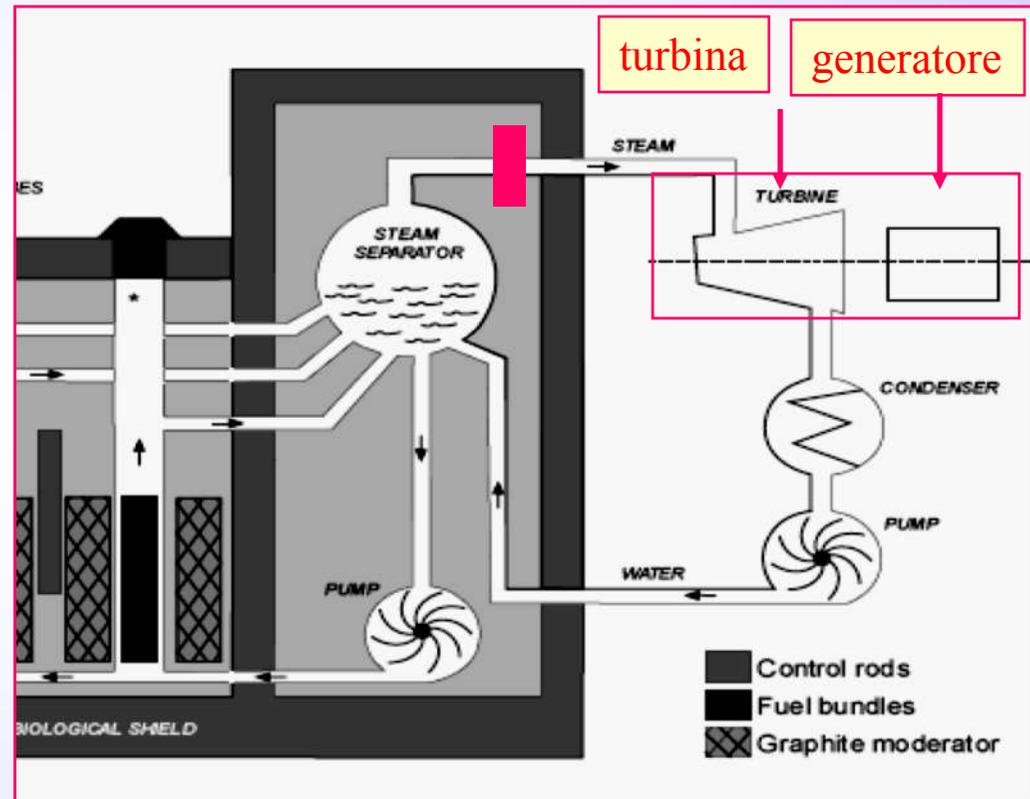
**25 aprile 1986**

**l'unità 4 della centrale doveva essere spenta per manutenzione ordinaria**

## L'ESPERIMENTO

**SFRUTTARE l'inerzia del rotore della turbina per alimentare le pompe dell'ECCS; già eseguito in passato ma con esito negativo**

**Gennaio 86  
V.P. Briukhanov (direttore della centrale) manda il programma della prova alle autorità per approvazione**



**Nessuna risposta**

**Si decide di effettuare ugualmente l'esperimento**

# L'ESPERIMENTO

## In sala controllo

**Akimov:** capo turno

**Toptunov:** ingegnere capo operazione reattore

**Diatlov:** aggiunto ingegnere capo (dirige l'esperimento)

**Stoliarcuk:** ingegnere principale conduzione reattore

**Kersenbaum:** ingegnere principale conduzione turbine

**Davletbaiev:** aggiunto capo turbina n. 4

**Palamarcuk:** responsabile laboratorio impresa esercizio centrale

**Tregub:** capo del turno precedente

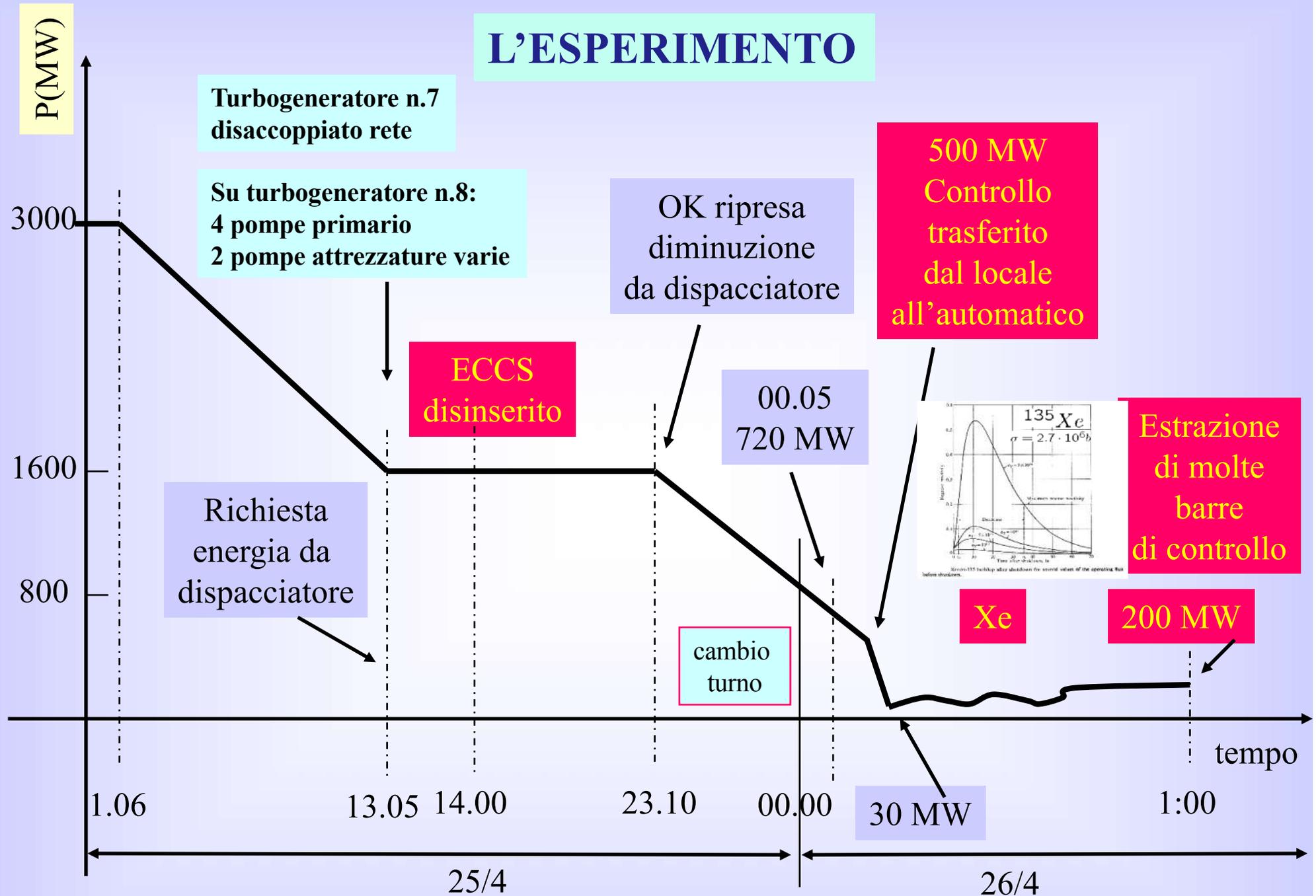
**Matlenko:** rilevatore elettrico al generatore per esperimento

**Proskurianov:** tirocinante

**Kudriastev:** tirocinante



# L'ESPERIMENTO



# L'ESPERIMENTO

- 1.03 + 1 pompa su TG n.8
- 1.07 + 1 pompa; totale 8 pompe su TG n.8  
**Troppo acqua nel nocciolo 58.000 m<sup>3</sup>/h proibito: rotture per vibrazioni**  
**Riduzione di vapore nel separatore di vapore**  
Questo avrebbe provocato scram automatico ma ...
- 1:15 L'operatore aveva disabilitato lo scram per poter effettuare la prova
- 1:19 Toptunov, Akimov, Stoliarcuk tentano di ristabilire a mano i parametri giusti nel reattore; estraggono altre barre di controllo per aumentare la potenza del reattore e ristabilire pressione e temperatura nel separatore di vapore  
**Il numero minimo di barre di controllo nel nocciolo non deve essere inferiore a 30; ora erano di meno: forse 8. Bisogna spegnere: invece si continua**
- 1:21:40 Viene ridotto il flusso d'acqua nel nocciolo; dal nocciolo ora viene rimosso meno calore e perciò la temperatura aumenta
- 1:22:10 Comincia a prodursi vapore nel nocciolo
- 1:22:45 L'operatore crede di aver stabilizzato la situazione

**Si decide di proseguire con l'esecuzione del test**

# L'ESPERIMENTO

1:23:04 Metlenko dalla sala reattore comunica: Oscilloscopio in funzione  
Chiusa valvola del vapore al TG n. 8

1:23:10 Estrazione automatica di alcune barre di controllo

Ora entrambe le turbine sono disconnesse (previsto scram)  
Questo scram era stato escluso per poter effettuare la prova

Diminuisce portata d'acqua nel nocciolo (le 4 pompe del primario erano collegate su TG n.8)

1:23:21 Aumenta vapore

E la potenza comincia a salire per coefficiente di vuoto positivo

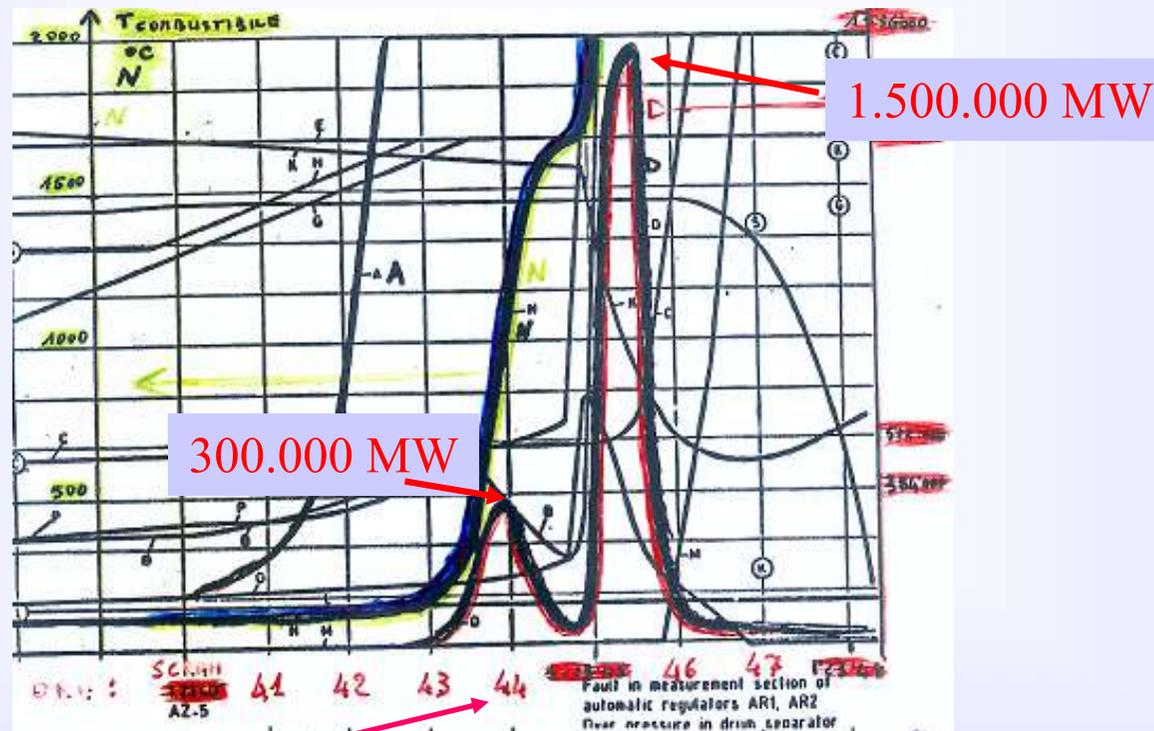
Akimov: bisogna spegnere

# L'INCIDENTE

1:23:40 SCRAM con pulsante AZ5

Coefficiente di vuoto  
+  
Barre di controllo

Aumenta la potenza



1.23:44 La potenza del reattore raggiunge 100 volte il valore di progetto

# L'INCIDENTE

1:23:45 Il combustibile comincia a frammentarsi, reagisce con l'acqua di raffreddamento e produce un impulso di alta pressione

1:23:49 I canali del combustibile si rompono

## **1:24 Si verificano due esplosioni**

Nella sala centrale: piastra	1000 t
gru	50 t
macchina carico e scarico	250 t

Pavimento crollato

Tetto sfondato

**Pezzi di grafite e combustibile incandescenti provocano incendi:**

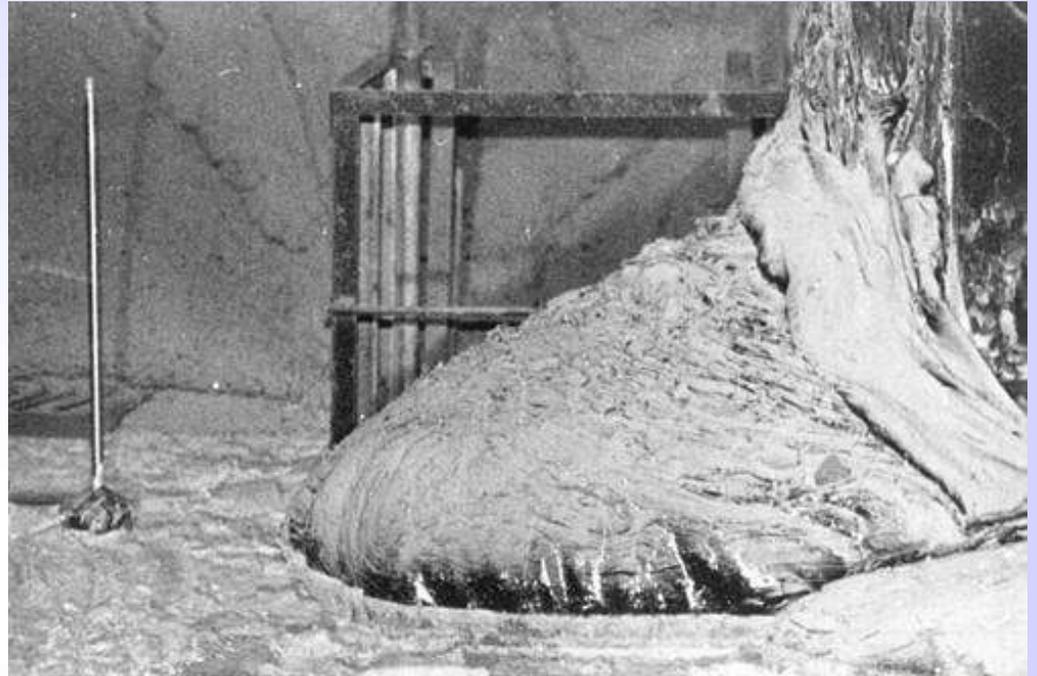
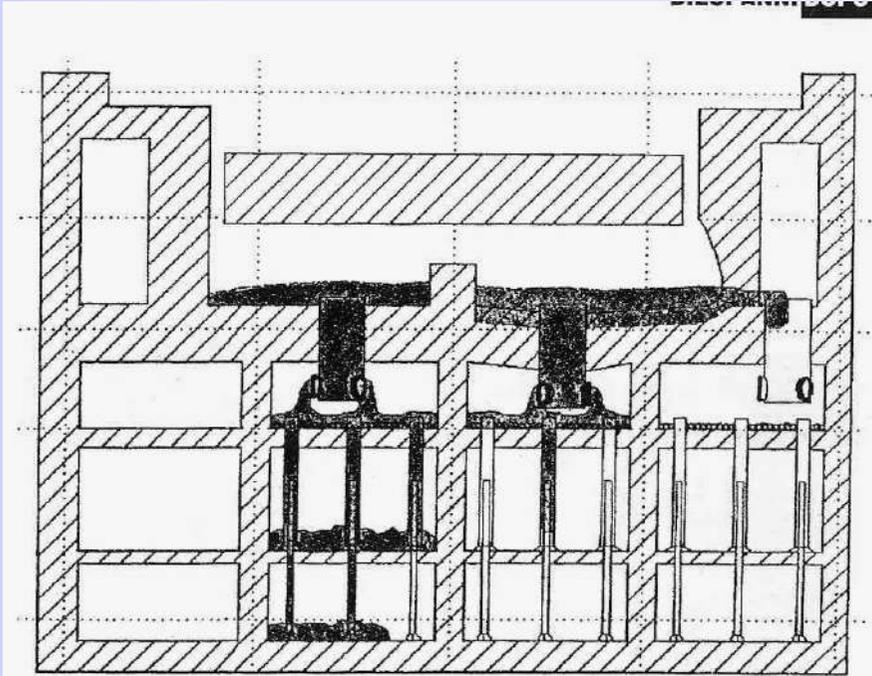
- in sala macchine (olio)
- nei depositi di gasolio

# I RESTI DEL REATTORE



Saverio Altieri Seminari di fisica  
ambientale MiB 13-05-21

# IL COMBUSTIBILE FUSO



# I SOCCORSI

- 1.28 I primi ad arrivare sono i pompieri: a un primo gruppo di 14 si aggiungono rinforzi che continuano ad arrivare; alle 4 del mattino sono 250; 69 di essi partecipano alle operazioni di spegnimento
- 2.10 I pompieri domano incendio sul tetto della sala macchine ed entrano in sala macchine
- 2.30 Viene domato incendio sul tetto della sala reattore
- 5.00 17 pompieri vengono ricoverati; alla fine 31 di loro moriranno



Saverio Altieri Seminari di fisica  
ambientale MiB 13-05-21

# L'INCENDIO DELLA GRAFITE

**2500 t di grafite**

La rottura del nocciolo porta aria in contatto con la grafite che si incendia

Non ci sono esperti per affrontare questo tipo di incendio

Con elicotteri vengono lanciati sul nocciolo **5 000 t** di materiale vario

**40 t** di carburo di boro per assorbire neutroni

**600 t** di dolomite per produrre CO<sub>2</sub> per spegnere incendio

**2 400 t** di piombo per assorbire radiazioni

**1 800 t** di sabbia e argilla per ridurre il rilascio di particolato

150 t di materiale era stato lanciato il 27 Aprile

300 t il 28

750 t il 29

1 500 t. il 30

1 900 t il 1 Maggio

400 t il 2 Maggio.

**1800 voli di elicottero per lanciare il materiale**

9 maggio Viene spento l'incendio della grafite

# RILASCIO, DISPERSIONE, DEPOSIZIONE DEI RADIONUCLIDI

Il materiale radioattivo rilasciato in atmosfera è costituito da gas, aerosols e combustibile finemente frammentato

E' stato stima che sia stato rilasciato

il 100% dell'inventario dei gas nobili (xenon e krypton),

tra il 10 e il 20% degli elementi più volatili: iodio, tellurio e cesio.

il 3.5 % del combustibile ( 6 tonnellate di cobustibile)



# RILASCIO

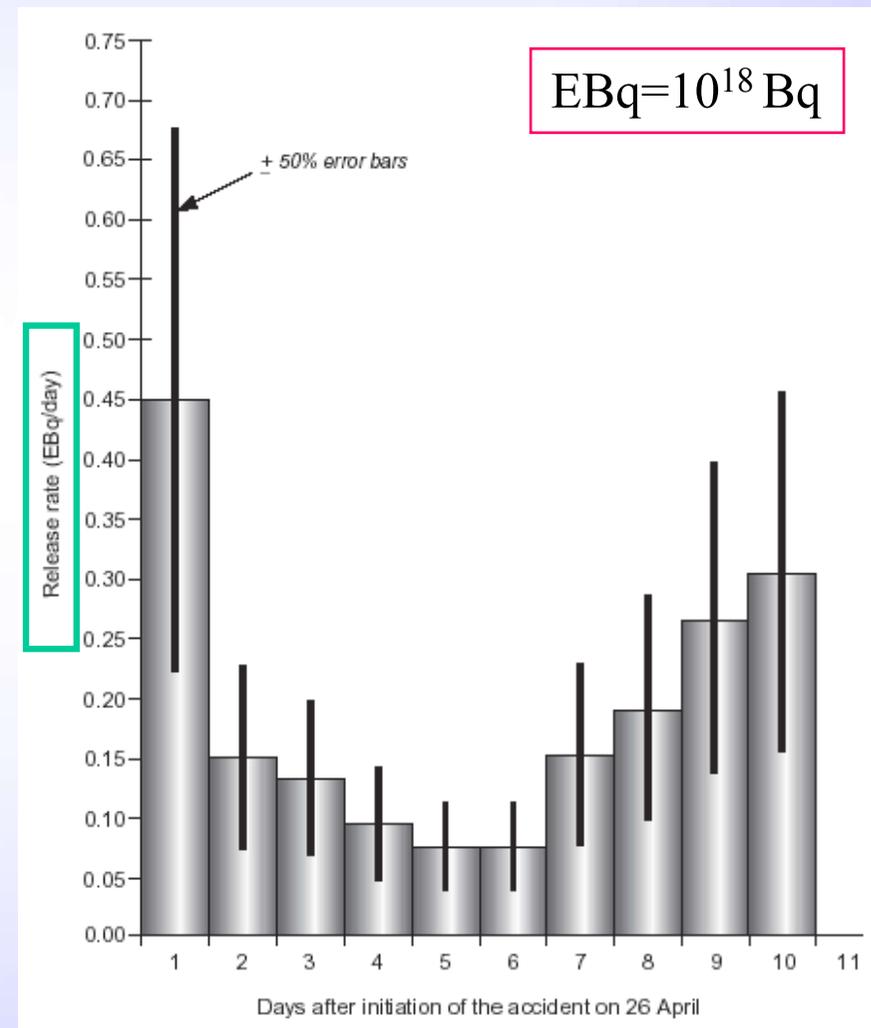
Andamento giornaliero dei rilasci nei primi giorni; la ripresa dopo il minimo è dovuta all'aumento di temperatura provocato dal materiale di copertura lanciato con gli elicotteri

**$^{131}\text{I}$**

$\text{PBq}=10^{15} \text{ Bq}$

Day of release	Daily releases (PBq)
26 April	704
27 April	204
28 April	150
29 April	102
30 April	69
1 May	62
2 May	102
3 May	107
4 May	130
5 May	130
<b>Total</b>	<b>1760</b>

## Il rilascio giornaliero totale



# DISPERSIONE

Al momento dell'incidente il vento soffiava verso la Scandinavia. I primi a rivelare radioattività nell'aria fuori dalla ex URSS furono i tecnici di una centrale svedese. Dopo aver capito che il rilascio non era legato alla loro centrale diedero l'allarme

Durante i primi 10 giorni, quando i rilasci radioattivi furono più intensi, le condizioni meteorologiche e la direzione del vento cambiarono in continuazione, interessando via via vari settori

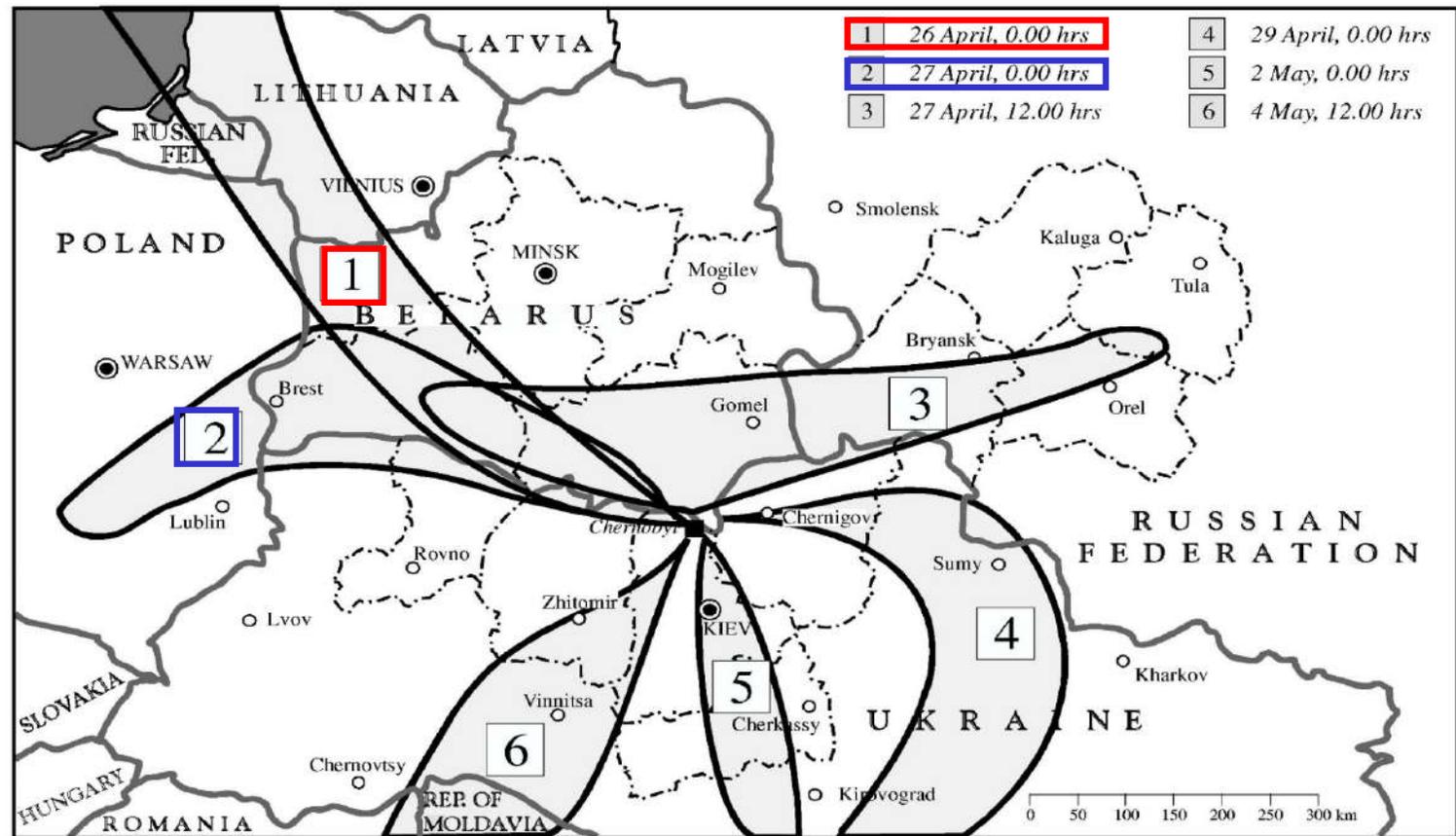
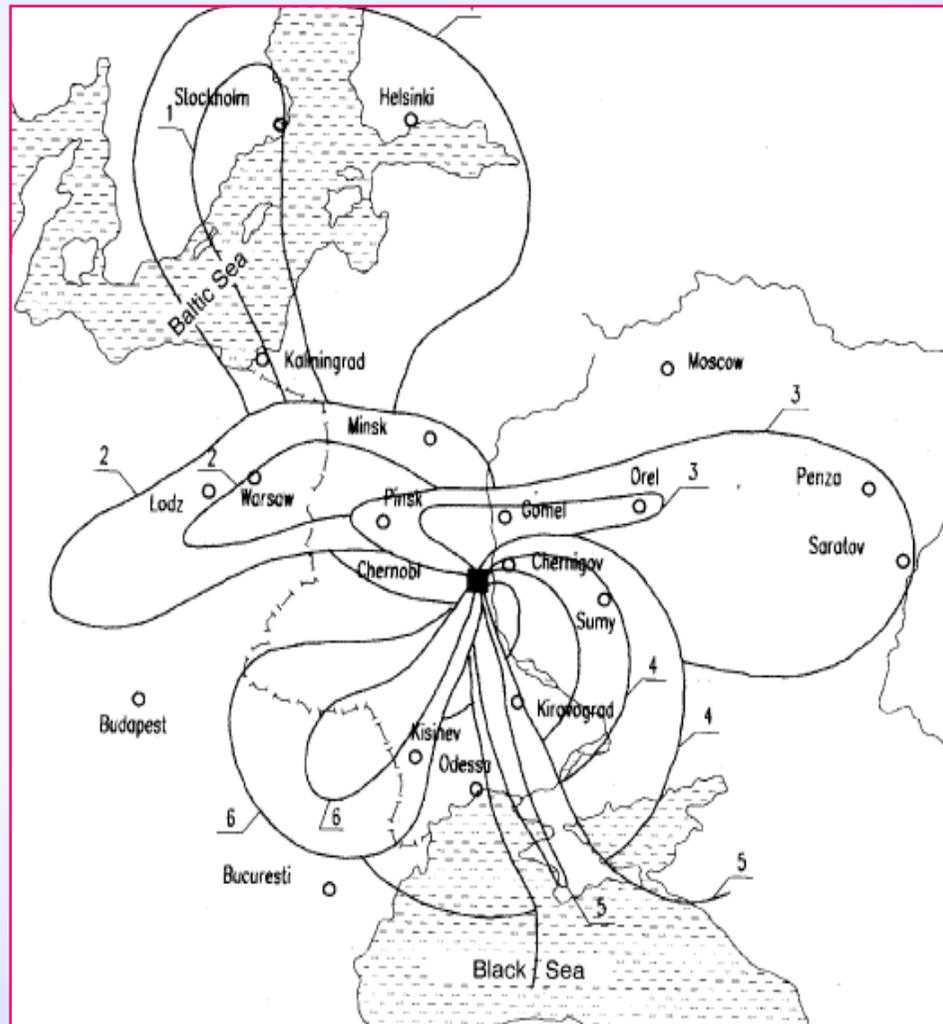


Figure V. Plume formation by meteorological conditions for instantaneous releases on dates and times (GMT) indicated [B7].

## DISPERSIONE

Al momento dell'incidente il vento soffiava verso la Scandinavia. I primi a rivelare radioattività nell'aria fuori dalla ex URSS furono i tecnici di una centrale svedese. Dopo aver capito che il rilascio non era legato alla loro centrale diedero l'allarme

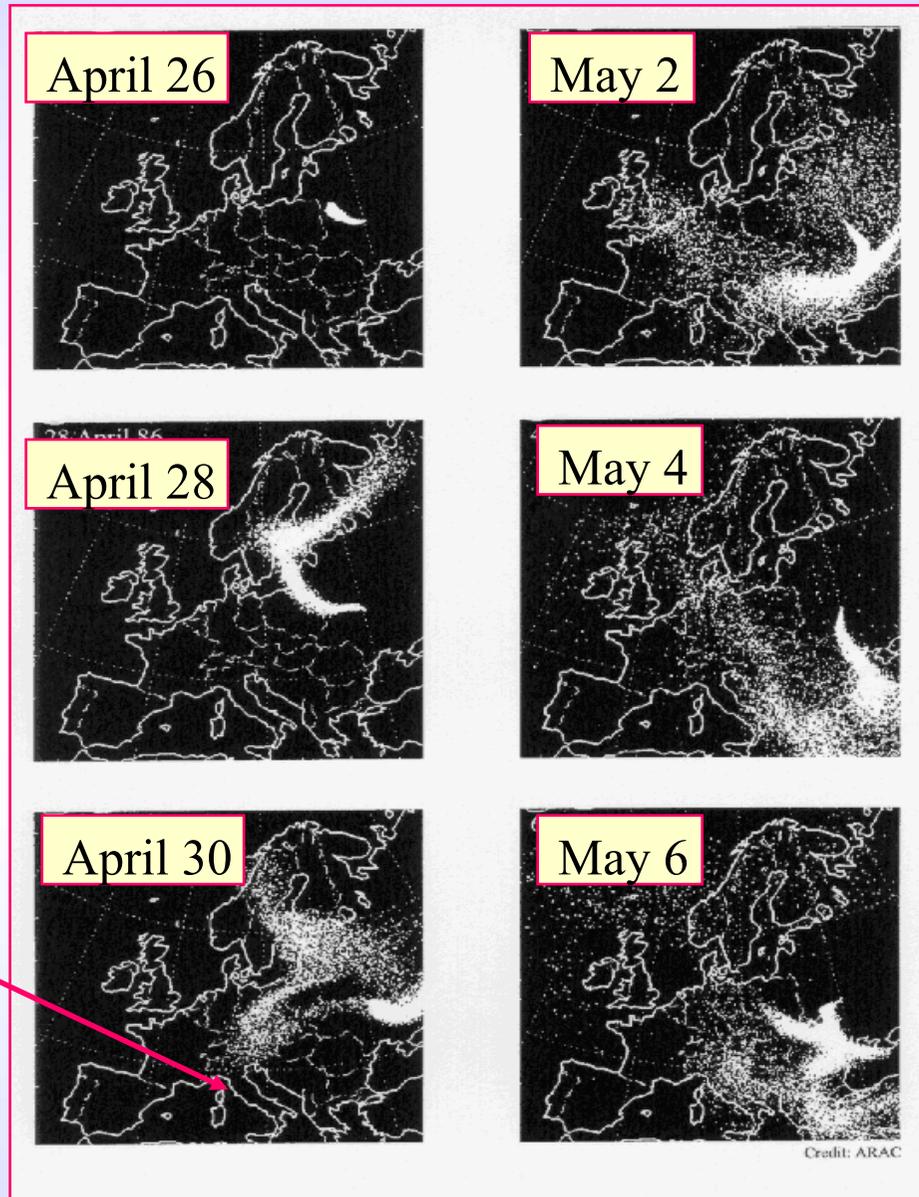
Durante i primi 10 giorni, quando i rilasci radioattivi furono più intensi, le condizioni meteorologiche e la direzione del vento cambiarono in continuazione, interessando via via vari settori



# DISPERSIONE

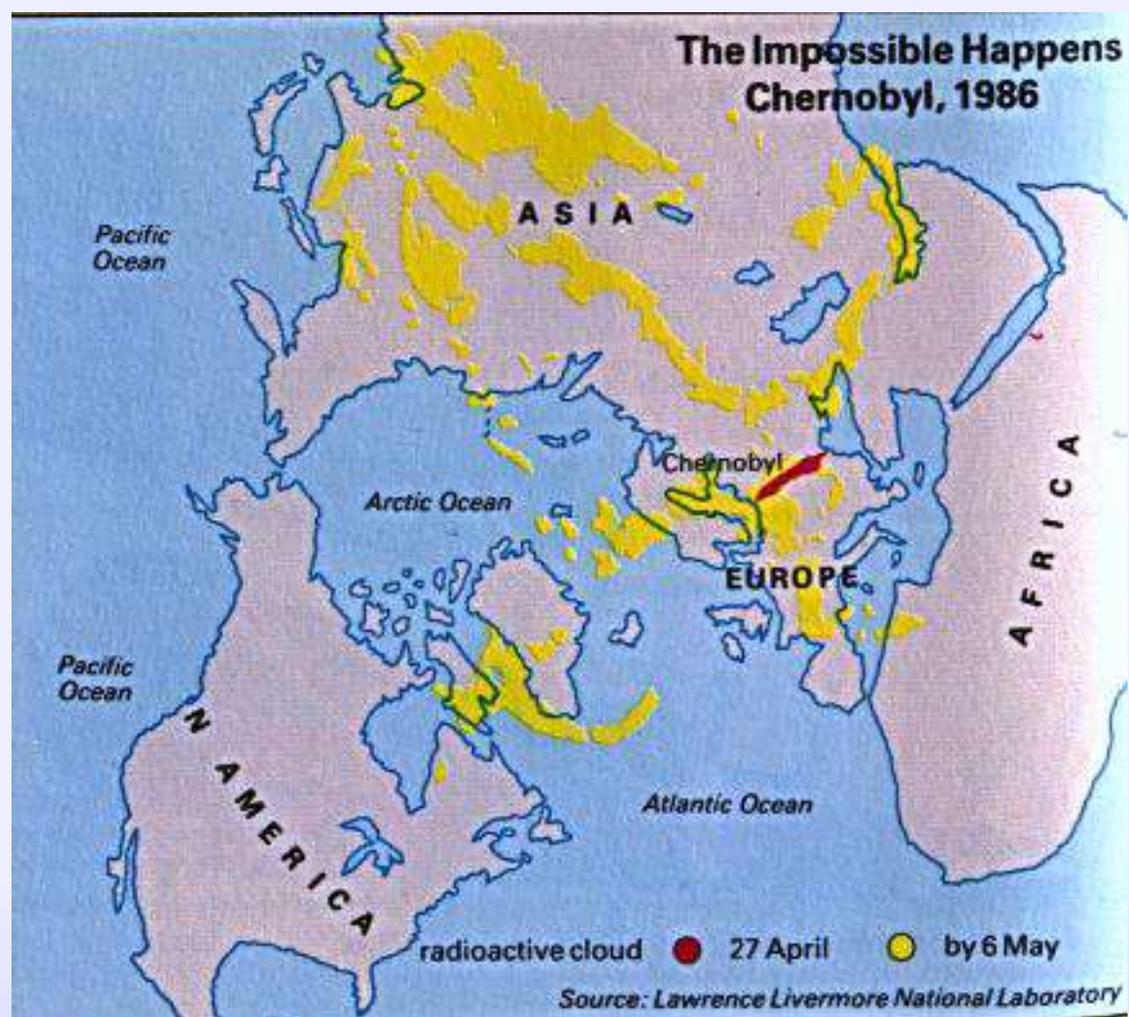
**LA DISPERSIONE  
Nel resto dell'Europa**

**L'arrivo in Italia il 30 aprile**



## DISPERSIONE su scala planetaria

L'Emisfero Sud rimane indenne dalla contaminazione

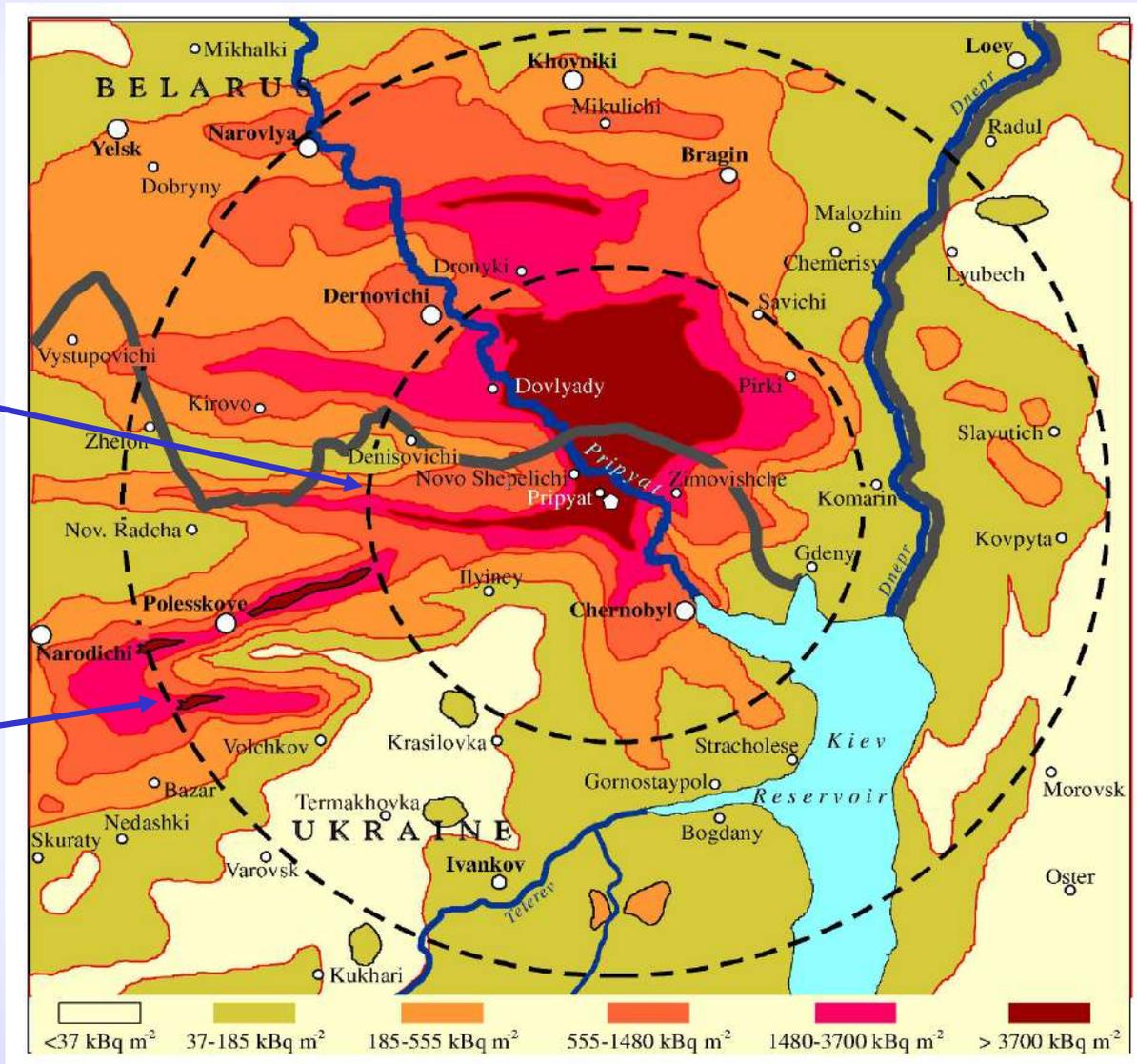


# DEPOSIZIONE DEI RADIONUCLIDI

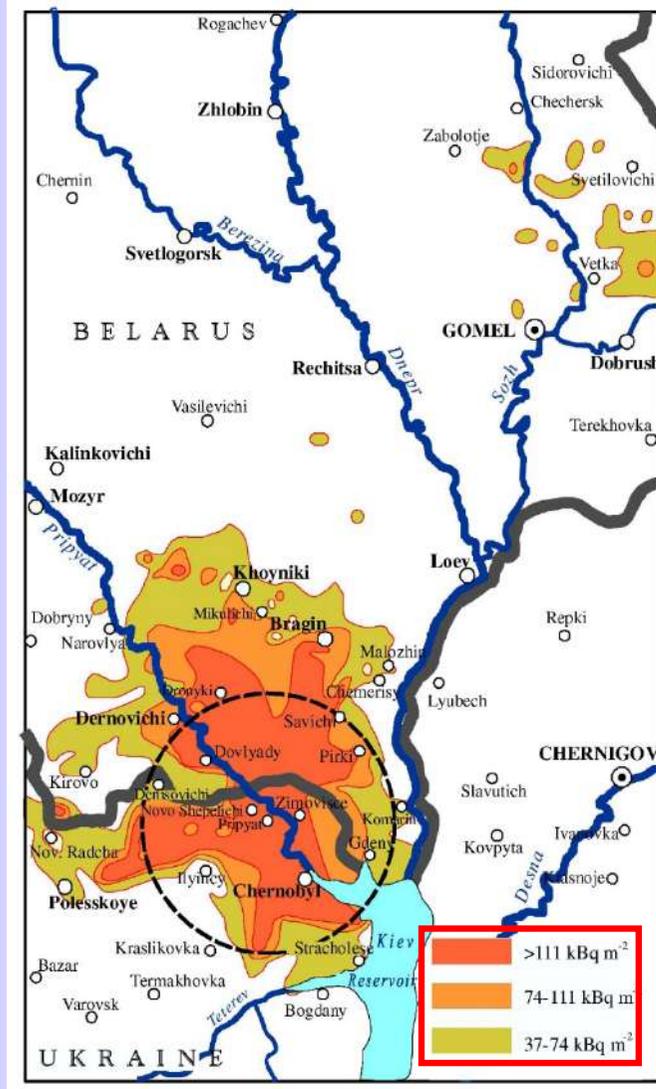
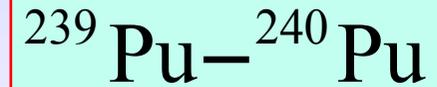


La zona di esclusione di 30 Km

60 Km



# DEPOSIZIONE DEI RADIONUCLIDI



La deposizione di  $^{90}\text{Sr}$  e  $^{239}\text{Pu}$  ha interessato soprattutto le zone vicine alla centrale; le zone con contaminazione da plutonio superiore a  $4 \text{ kBq m}^{-2}$  si trovano entro i **30-km nelle aree di Gomel, Mogilev e Briansk**

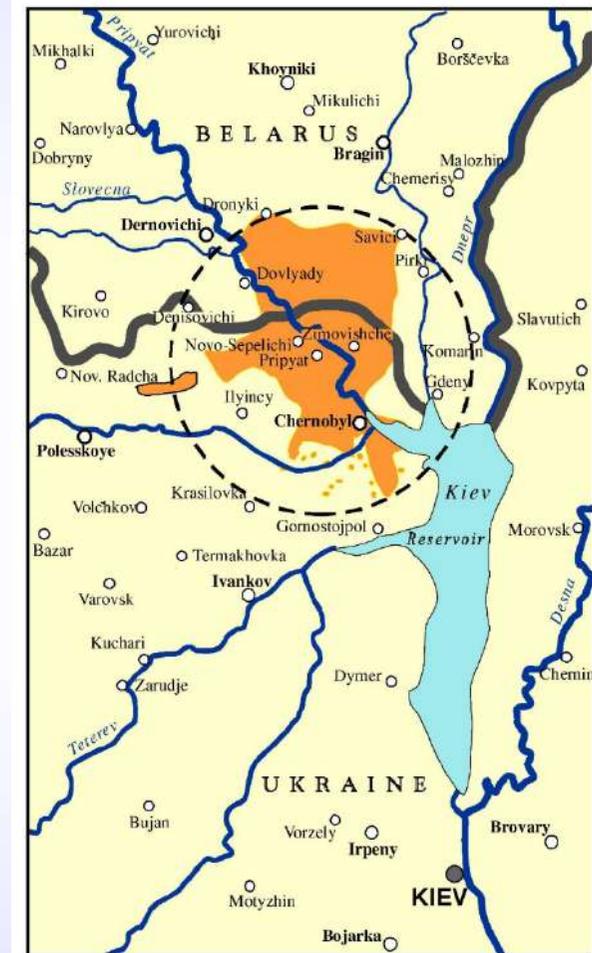
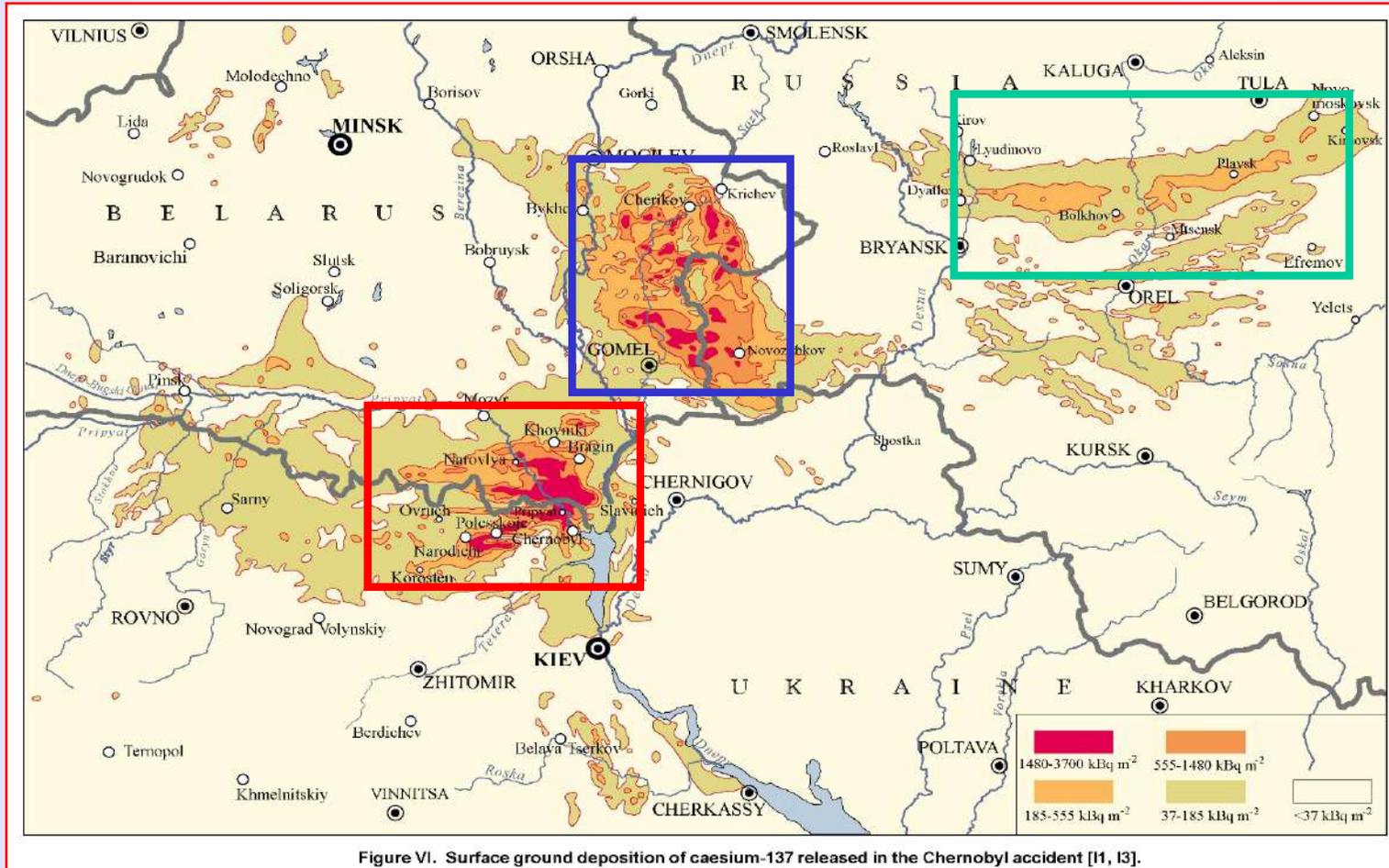


Figure IX. Surface ground deposition of plutonium-239 and plutonium-240 released in the Chernobyl accident at levels exceeding  $3.7 \text{ kBq m}^{-2}$  [11].

# DEPOSIZIONE DEI RADIONUCLIDI

**I tre spots principali di contaminazione sopra i 40 kBq/m<sup>2</sup>  
Centrale, di Bryansk e di Kaluga-Tula-Orel**

<sup>137</sup>  
<sub>55</sub> Cs



# DEPOSIZIONE DEI RADIONUCLIDI

**I tre spots** principali di contaminazione sopra i 40 kBq/m<sup>2</sup>  
**Centrale**, di **Bryansk** e di **Kaluga-Tula-Orel**

131 I

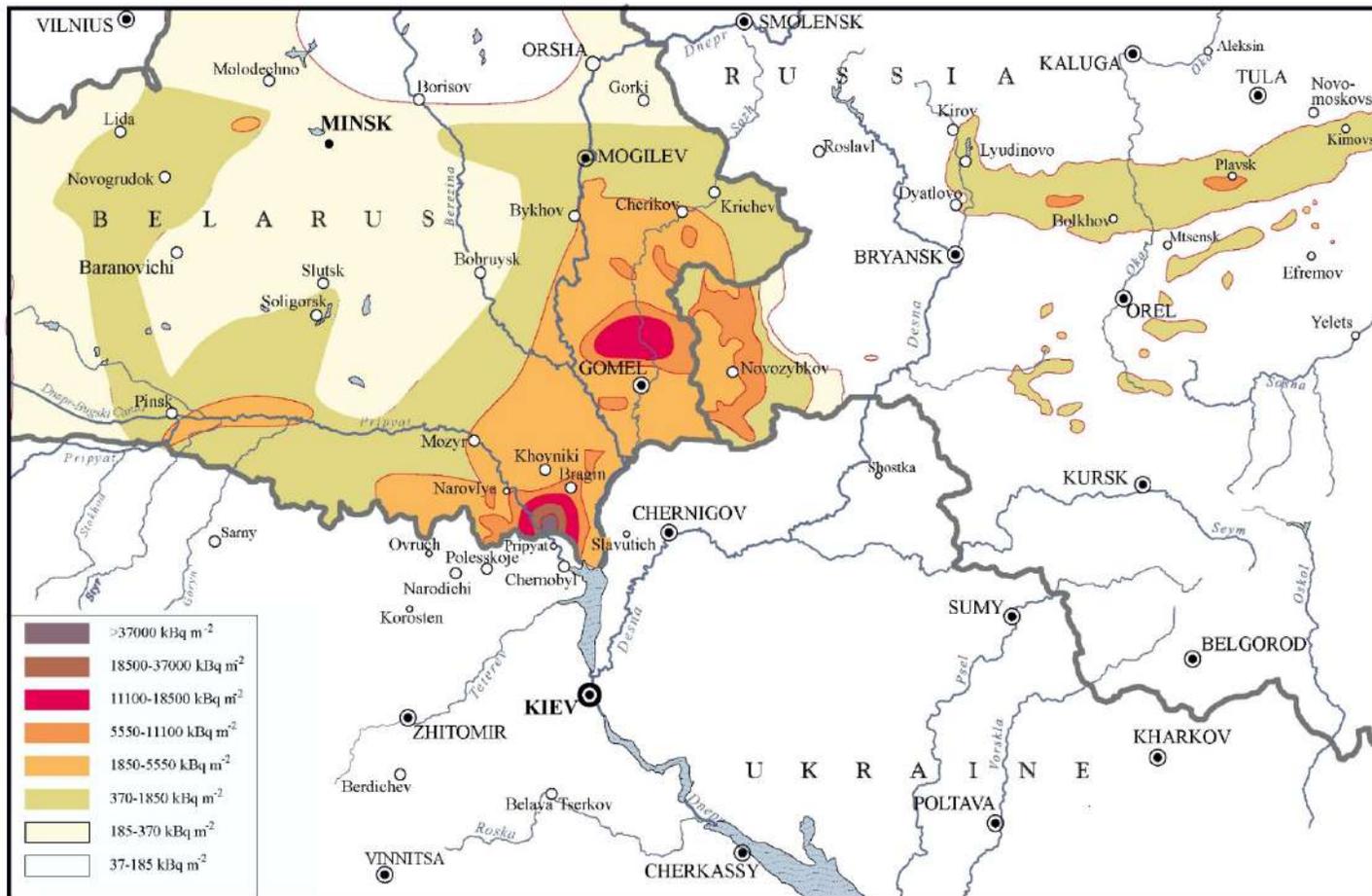
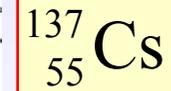
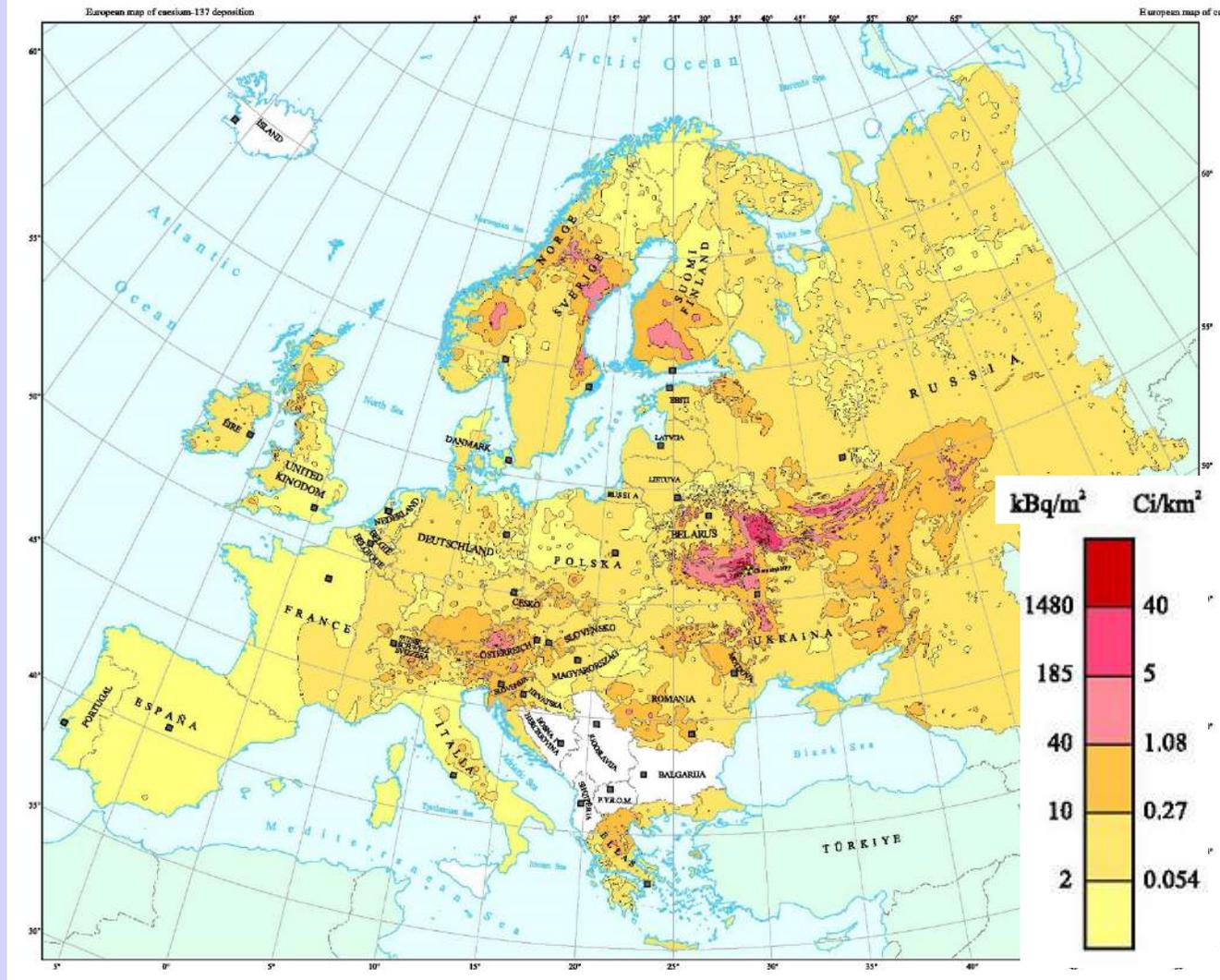


Figure X. Estimated surface ground deposition in Belarus and western Russia of iodine-131 released in the Chernobyl accident [B25, P19].

# DEPOSIZIONE DEI RADIONUCLIDI

## Nel resto dell'Europa

Figure XI. Surface ground deposition of caesium-137 released in Europe after the Chernobyl accident [D13].



Dove il passaggio della nube radioattiva è stato accompagnato da pioggia come in alcune zone dell'Austria, della Svizzera, del Sud della Germania e della Scandinavia si sono avute deposizioni fino a circa  $60 \text{ kBq m}^{-2}$ . In un'area della Svezia di  $2-4 \text{ km}^2$  sono stati superati i  $185 \text{ kBq m}^{-2}$ .

Per il resto si tratta di valori fra  $2$  e  $10$  o anche sotto i  $2 \text{ kBq m}^{-2}$  come in Spagna e Portogallo e buona parte dell'Italia.

## DEPOSIZIONE DEI RADIONUCLIDI

Dal punto di vista della contaminazione al suolo da  $^{137}\text{Cs}$  sono state individuate le seguenti aree:

- Aree evacuate: contaminazione  $> 1500 \text{ kBq/m}^2$
- Aree soggette a controllo:  $> 555 \text{ kBq/m}^2$  circa 270.000 abitanti;
- Aree contaminate:  $> 37 \text{ kBq m}^{-2}$  circa 5 milioni di abitanti;

La contaminazione di  $^{137}\text{Cs}$  presente prima dell'incidente dovuta alle esplosioni nell'atmosfera dei test bellici degli anni 50-60: circa  $2\text{-}4 \text{ kBq/m}^2$ .

Come limite inferiore per una zona contaminate è stato usato il valore di  $37 \text{ kBq m}^{-2}$  che è pari a circa 10 volte il valore preesistente all'incidente di Chernobyl.

Grossolanamente, vivere senza contromisure, in una zona con tale contaminazione del Cs-137 comporta, nel primo anno, l'assorbimento di una dose di circa  $1 \text{ mSv}$  (ossia la metà del fondo naturale medio).

## LE DOSI ASSORBITE: i 4 gruppi

La popolazione esposta è stata suddivisa in quattro categorie

- (1) Lo staff della centrale nucleare e i lavoratori che hanno partecipato alle operazioni di decontaminazione (i cosiddetti “liquidatori”);
- (2) i residenti nelle vicinanze che furono evacuati dalla zona dei 30-km durante le prime settimane dall’incidente;
- (3) la popolazione dell’ex-Unione Sovietica, inclusi i residenti delle aree contaminate: circa 5 milioni;
- (4) la popolazione nei Paesi fuori dall’ex - Unione Sovietica

## LE DOSI ASSORBITE: lo staff della centrale

491

presenti sul posto

566

alle 8 del mattino

**Table 10**

**Staff on site and emergency workers in initial hours of the accident**

[K23]

<i>Professional group</i>	<b>Explosion at 1.24 hr</b> <i>Accident witnesses</i>	<i>Emergency workers</i> <i>(at 8 a.m. on 26 April 1986)</i>
Staff of the power plant (Units 1, 2, 3 and 4)	176	374 <sup>c</sup>
Construction workers at Units 5 and 6	268	-
Firemen	14 <sup>a</sup> , 10 <sup>b</sup>	69
Guards	23	113
Staff of the local medical facility	-	10

*a* Arrived on the site of the accident at 1.27 a.m.

*b* Arrived on the site of the accident at 1.35 a.m.

*c* Excluding the accident victims, the numbers of whom are given in Table 11.

## LE DOSI ASSORBITE: lo staff della centrale

134 ARS

**Table 11**  
**Emergency workers with acute radiation sickness following the accident**  
 [15]

<i>Degree of acute radiation sickness</i>	<i>Range of dose (Gy)</i>	<i>Number of patients treated <sup>a</sup></i>		<i>Number of deaths <sup>b</sup></i>	<i>Number of survivors</i>
		<i>Moscow</i>	<i>Kiev</i>		
Mild (I)	0.8–2.1	23	18	0 (0%)	41
Moderate (II)	2.2–4.1	44	6	1 (2%)	49
Severe (III)	4.2–6.4	21	1	7 (32%)	15
Very severe (IV)	6.5–16	20	1	20 (95%)	1
Total	0.8–16	108	26	28	106

*a* Acute radiation sickness was not confirmed in a further 103 treated workers.

*b* Percentage of treated patients in parentheses.

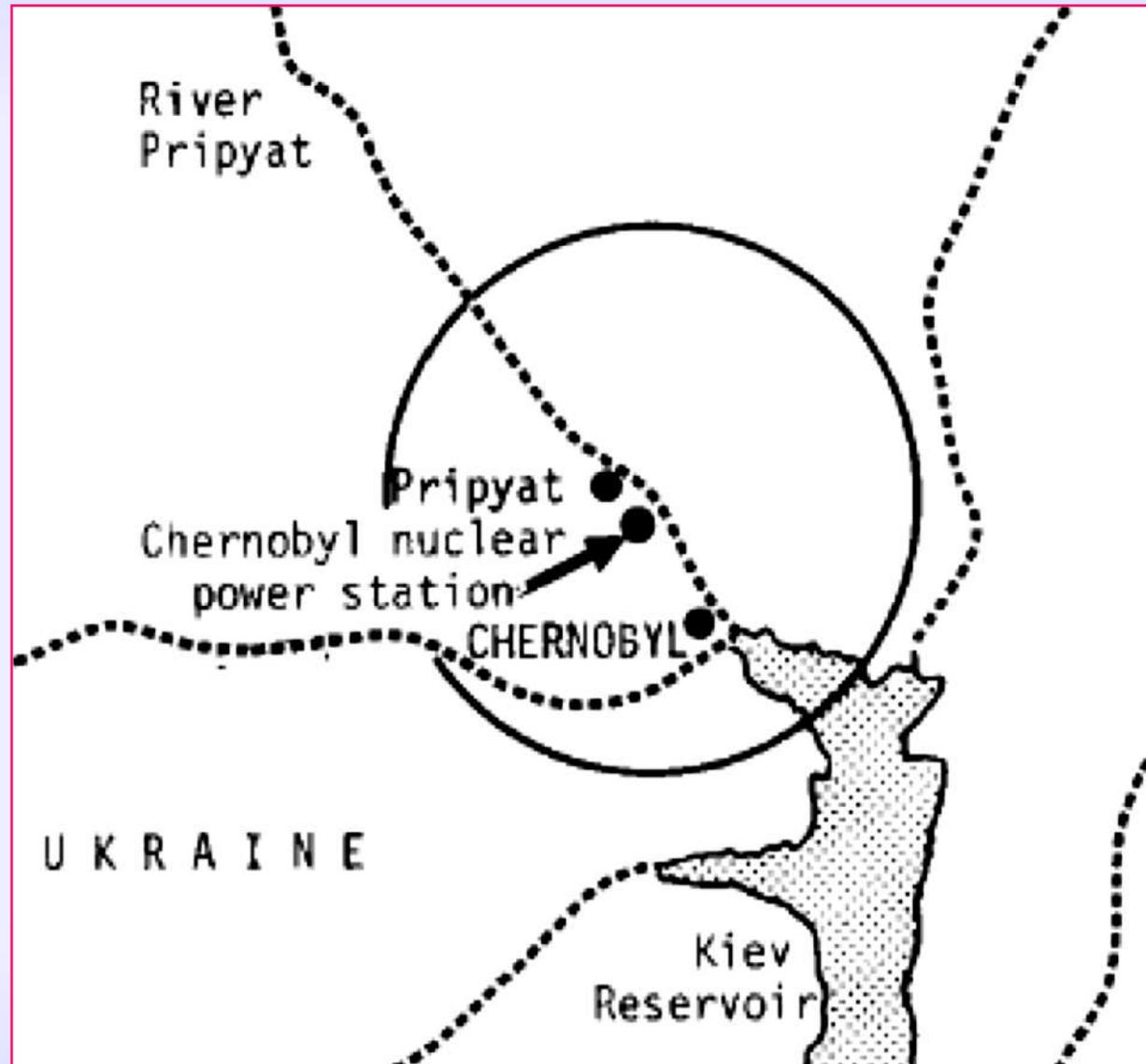
## LE DOSI ASSORBITE: i liquidatori

Centinaia di migliaia di lavoratori, stimati in circa **600.000**, furono coinvolti nelle operazioni di decontaminazione



I più esposti, **con dosi di alcuni Gy**, furono i lavoratori coinvolti all'inizio e gli scienziati che intervennero con compiti speciali. Le dosi medie dei liquidatori furono di circa **170 mSv nel 1986 e di 15 mSv nel 1989**.

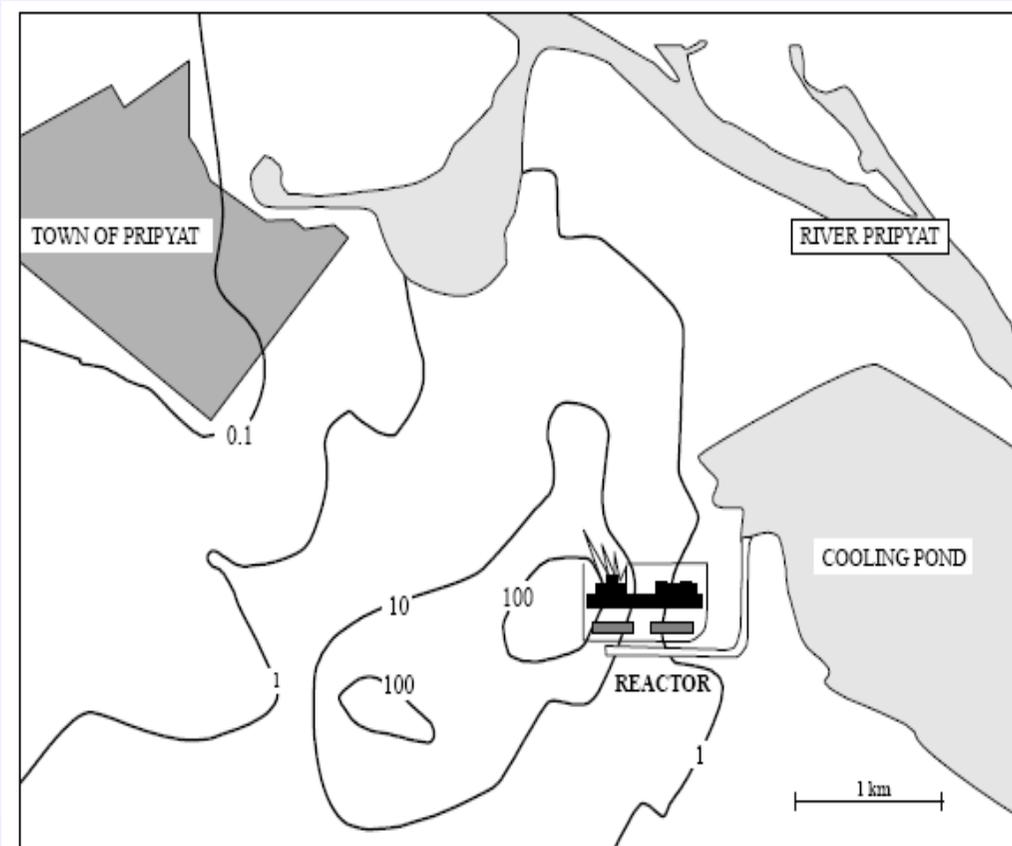
## LE DOSI ASSORBITE: gli evacuati dalla zona dei 30-km



## LE DOSI ASSORBITE: gli evacuati dalla zona dei 30-km

Dopo circa 20 ore dall'incidente il vento cominciò a soffiare verso Pripyat. L'intensità di dose aumentò significativamente nella città. Fu deciso di evacuare la città.

0.1 R/h ~ 20 mSv/giorno  
1 R/h ~ 200 mSv/giorno  
10 R/h ~ 2 Sv/giorno  
100 R/h ~ 20 Sv/giorno



$DL_{50/60} = 4-6 \text{ Sv}$

Dose media  
da fondo natural:  
2.5 mSv / anno

Intensità di esposizione in R/h registrate il 26 Aprile in vari punti intorno alla centrale e nella città di Pripyat

## LE DOSI ASSORBITE: gli evacuati dalla zona dei 30-km

49.000 abitanti di Pripjat lasciarono la città su 1200 autobus



Altre 67.000 persone furono evacuate nei giorni e nelle settimane seguenti per un totale di 116.000, principalmente da una zona di 30 Km intorno al reattore

## LE DOSI ASSORBITE: gli evacuati dalla zona dei 30-km

La dose efficace fu mediamente di circa 17 mSv, con valori individuali variabili fra 0.1 e 380 mSv

La dose collettiva è stata stimata in circa 1300 Sv-uomo

### *Dose alla tiroide*

Table 6. Average doses to the thyroid gland and collective thyroid doses to the evacuees from Pripjat (Go95a)

Year of birth	Number of people	Average individual dose (Gy)	Collective dose (person-Gy)
1983-1986	2 400	1.4	3 300
1971-1982	8 100	0.3	2 400
≤1970	38 900	0.07	2 600

## LE DOSI ASSORBITE

Abitanti in zone contaminate soggette a controllo  $> 555 \text{ kBq/m}^2$

**Circa 270.000**

Table 11. Distribution of external and total whole-body doses during 1986-89, to inhabitants of contaminated areas ( $^{137}\text{Cs}$  activity per unit area  $>555 \text{ kBq/m}^2$ ) (Ba94)

Whole-body dose (mSv)	External exposure		Total exposure	
	No. of persons	Collective dose (man.Sv)	No. of persons	Collective dose (man.Sv)
5-20	132 000	1 700	88 000	1 200
20-50	111 000	3 500	132 000	4 200
50-100	24 000	1 600	44 000	3 000
100-150	2 800	330	6 900	820
150-200	530	88	1 500	250
>200	120	26	670	160
<b>Total</b>	<b>270 000</b>	<b>7 300</b>	<b>273 000</b>	<b>9 700</b>

## LE DOSI ASSORBITE

Abitanti in zone contaminate  $> 37 \text{ kBq/m}^2$

**Circa 5 milioni abitanti**

**compresi quelli delle zone a più alta contaminazione**

**1986-1995 dose efficace**

Table 10. Distribution of estimated total effective doses received by the populations of contaminated areas (1986-1995) excluding thyroid dose

Dose interval (mGy)	Number of persons		
	Belarus	Russian Federation	Ukraine
<1	133 053	155 301	–
1-5	1163 490	1 253 130	330 900
5-20	439 620	474 176	807 900
20-50	113 789	82 876	148 700
50-100	25 065	14 580	7 700
100-200	5 105	2 979	400
>200	790	333	–

**Nel periodo**

**1986-1989 la dose stimata è nel range fra 5 e 250 mSv**

**con una media di 40 mSv**

## LE DOSI ASSORBITE

### Popolazione fuori dall'ex-Unione Sovietica

Le dosi ricevute da queste popolazioni sono state relativamente basse e hanno valori molto diversi da un Paese all'altro a seconda della direzione dei venti e della presenza o meno di pioggia durante il passaggio della nube

Durante le prime settimane dopo l'incidente lo  $^{131}\text{I}$  è stato il principale contributore alla dose attraverso l'ingestione del latte. La dose alla tiroide nei bambini è stata fra 1 e 20 mGy in Europa, fra 0.1 e 5 mGy in Asia e circa 0.1 mGy nel Nord America. La dose alla tiroide per gli adulti è risultata circa 5 volte più bassa.

Più tardi, decaduto lo iodio, il  $^{134}\text{Cs}$  e  $^{137}\text{Cs}$  sono stati i principali responsabili della dose attraverso l'irraggiamento esterno e la contaminazione interna. La dose al corpo intero ricevuta nel primo anno dopo l'incidente varia fra 0.05 e 0.5 mGy in Europa, fra 0.005 to 0.1 mGy in Asia, e dell'ordine di 0.001 mGy in Nord America.

La dose totale al corpo intero attesa per tutta la durata della vita di un individuo è stata stimata pari a circa un fattore 3 di quella ricevuta nel primo anno dall'incidente.

# Effetti sanitari delle radiazioni

Gli effetti deterministici più gravi si manifestarono fra gli operatori della centrale, i vigili del fuoco e i primi soccorritori

**2 morti immediati:** una persona uccisa dall'esplosione e un'altra da una trombosi

**1 terza persona morì** durante la mattinata a causa di ustioni termiche.

499 furono posti in osservazione e a 237 di questi fu diagnosticata una sindrome acuta da radiation.

Oltre 200 pazienti furono ricoverati negli ospedali vicini e nei centri specializzati entro 24

**28 altre persone morirono nei giorni successivi** nei centri di trattamento, portando ad un **totale di 31 morti nelle prime settimane.**

**Al 2005 erano saliti a 50.**

## Tumori alla tiroide nei bambini

Table 13. Number of cases of thyroid cancers in children under 15 years old at diagnosis and cancer incidence rates number of cases per 100 000 children

	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98
Belarus	3 0.2	4 0.3	6 0.4	5 0.3	31 1.9	62 3.9	62 3.9	87 5.5	77 5.1	82 5.6	67 4.8	73 5.6	48 3.9
Russian Federation	–	1 0.3	–	–	1 0.3	1 0.3	3 0.9	1 0.3	6 2.8	7 2.5	2 0.6	5 2.2	–
Ukraine	8 0.2	7 0.1	8 0.1	11 0.1	26 0.2	22 0.2	49 0.5	44 0.4	44 0.4	47 0.5	56 0.6	36 0.4	44 0.5
<b>Total</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>14</b>	<b>16</b>	<b>58</b>	<b>85</b>	<b>114</b>	<b>132</b>	<b>127</b>	<b>136</b>	<b>125</b>	<b>114</b>	<b>92</b>

# Tumori alla tiroide nei bambini

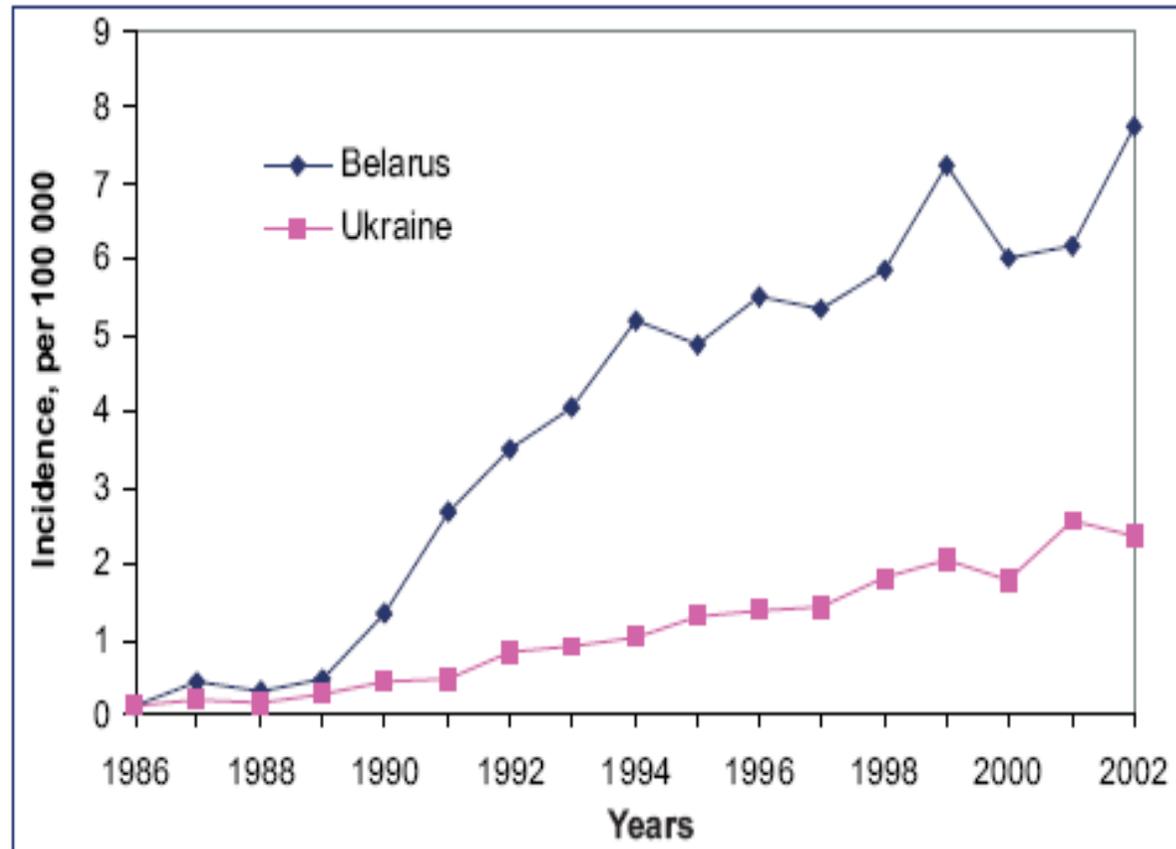


FIG. 3. Incidence rate of thyroid cancer in children and adolescents exposed to  $^{131}\text{I}$  as a result of the Chernobyl accident (after Jacob et al., 2005).

# Chernobyl: The True Scale of the Accident

## 20 Years Later a UN Report Provides Definitive Answers and Ways to Repair Lives



### The Chernobyl accident UNSCEAR's assessments of the radiation effects

<http://www.unscear.org/unscear/it/chernobyl.html>

Last updated: Monday, 16 July 2012

### Lo staff della centrale

Fino alla metà del 2005 circa 50 persone sono morte per cause attribuibili direttamente alle radiazioni assorbite in seguito al disastro; nella maggioranza dei casi si tratta di lavoratori intervenuti nelle prime ore dopo il disastro e deceduti entro pochi mesi;

<https://www.unscear.org/unscear/it/chernobyl.html>

Among Russian recovery operation workers with higher doses **there is emerging evidence of some increase in the incidence of leukaemia**. However, based on other studies, the annual incidence of radiation-induced leukaemia would be expected to fall within a few decades after exposure.

In addition, recent studies of the recovery operation workers indicate that opacities of the eye lens might be caused by relatively low radiation doses.

Apart from **the dramatic increase in thyroid cancer** incidence among those exposed at a young age, and some indication of **an increased leukaemia** and cataract incidence among the workers, **there is no clearly demonstrated increase in the incidence of solid cancers or leukaemia due to radiation in the exposed populations**. Neither is there any proof of other non-malignant disorders that are related to ionizing radiation. However, there were widespread psychological reactions to the accident, which were due to fear of the radiation, not to the actual radiation doses.

There is a tendency to attribute increases in the rates of all cancers over time to the Chernobyl accident, but it should be noted that increases were also observed before the accident in the affected areas. Moreover, a general increase in mortality has been reported in recent decades in most areas of the former Soviet Union, and this must be taken into account when interpreting the results of the accident-related studies.

### **Conclusions**

The accident at the Chernobyl nuclear power plant in 1986 was a tragic event for its victims, and those most affected suffered major hardship. Some of the people who dealt with the emergency lost their lives. Although those exposed as children and the emergency and recovery workers are at increased risk of radiation-induced effects, the vast majority of the population need not live in fear of serious health consequences due to the radiation from the Chernobyl accident. For the most part, they were exposed to radiation levels comparable to or a few times higher than annual levels of natural background, and future exposures continue to slowly diminish as the radionuclides decay. Lives have been seriously disrupted by the Chernobyl accident, but from the radiological point of view, generally positive prospects for the future health of most individuals should prevail.

Last updated: Tuesday, 6 April 2021

## IL SARCOFAGO

In 7 mesi (Maggio - Novembre 1986) fu costruita una struttura che racchiude il reattore danneggiato, detto Sarcfago. Le condizioni di lavoro erano proibitive



Saverio Altieri Seminari di fisica  
ambientale MiB 13-05-21

## IL SARCOFAGO

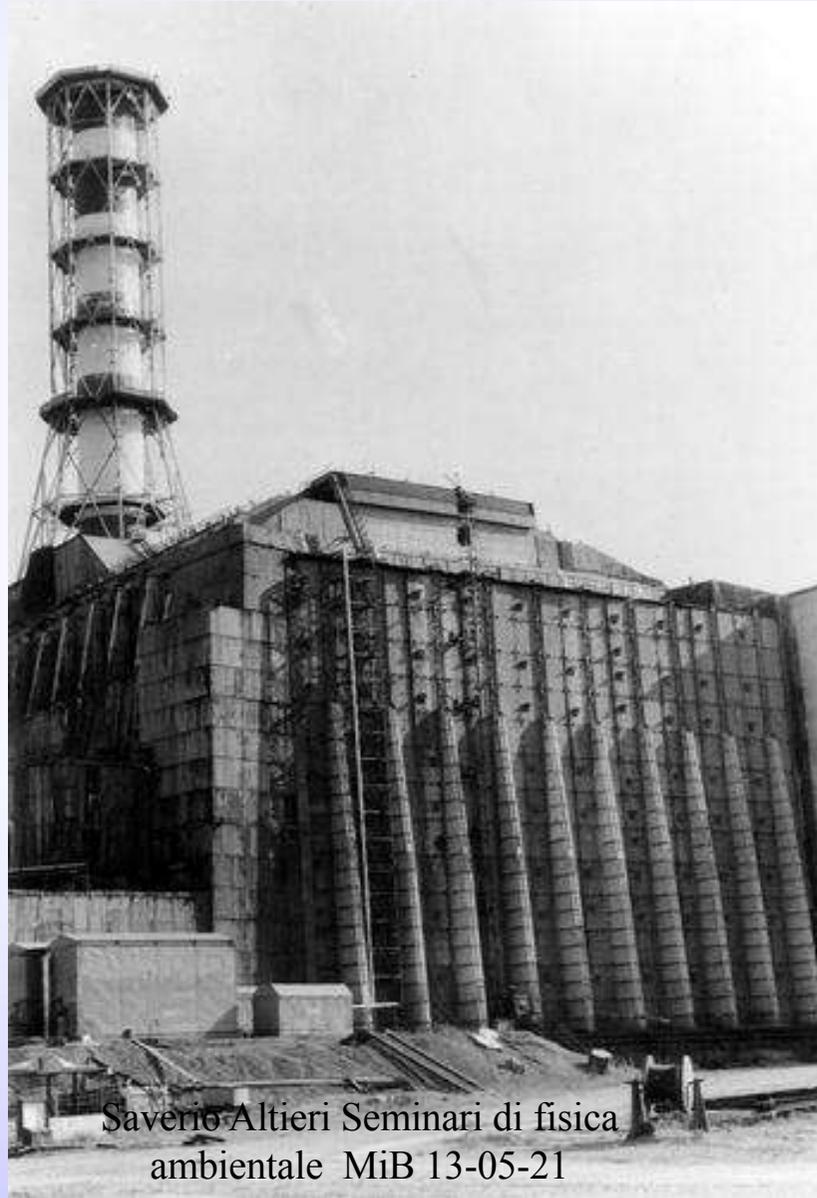
In 7 mesi (Maggio - Novembre 1986) fu costruita una struttura che racchiude il reattore danneggiato, detto Sarcfago. Le condizioni di lavoro erano proibitive



Saverio Altieri Seminari di fisica  
ambientale MiB 13-05-21

## IL SARCOFAGO

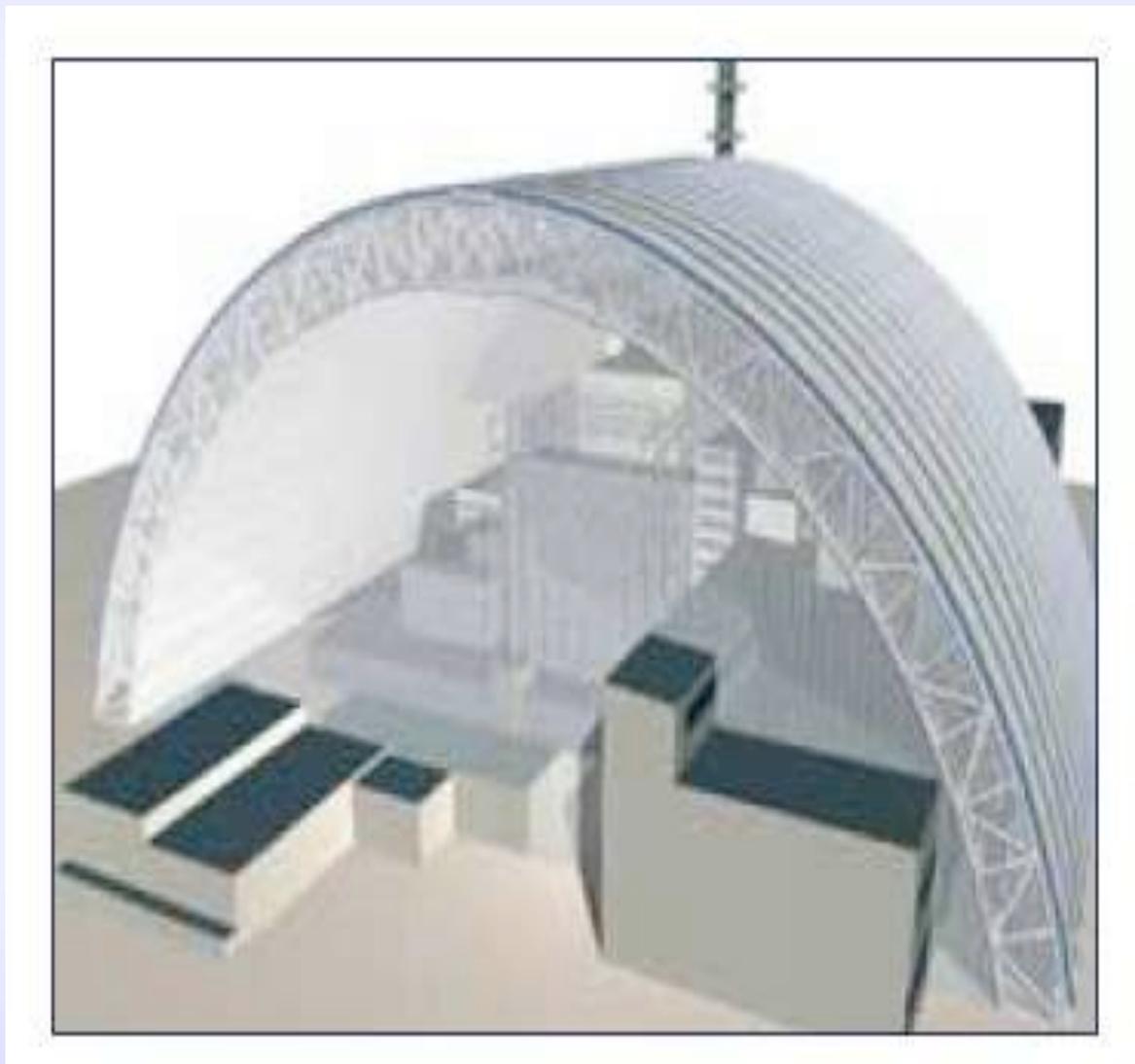
In 7 mesi (Maggio - Novembre 1986) fu costruita una struttura che racchiude il reattore danneggiato, detto Sarcfago. Le condizioni di lavoro erano proibitive



Saverio Altieri Seminari di fisica  
ambientale MiB 13-05-21

## UNA NUOVA STRUTTURA DI CONTENIMENTO

Si teme che il Sarcofago costruito per racchiudere il reattore distrutto possa collassare rilasciando nuovo materiale radioattivo, anche se potrebbero essere interessate solo le zone circostanti;



Saverio Altieri Seminari di fisica  
ambientale MiB 13-05-21

## UNA NUOVA STRUTTURA DI CONTENIMENTO

Si teme che il Sarcofago costruito per racchiudere il reattore distrutto possa collassare rilasciando nuovo materiale radioattivo, anche se potrebbero essere interessate solo le zone circostanti;



Saverio Altieri Seminari di fisica  
ambientale MiB 13-05-21

## La vita continua anche nella “zona proibita”

Trent'anni dopo la peggiore catastrofe nucleare della storia, la zona altamente contaminata intorno alla centrale di Černobyl, abbandonata dagli abitanti, si è trasformata in una riserva unica dove prosperano gli animali selvatici. ... “Quando la gente è partita, la natura è tornata”, spiega Denis Vishnevskij, ingegnere capo della “zona di esclusione”

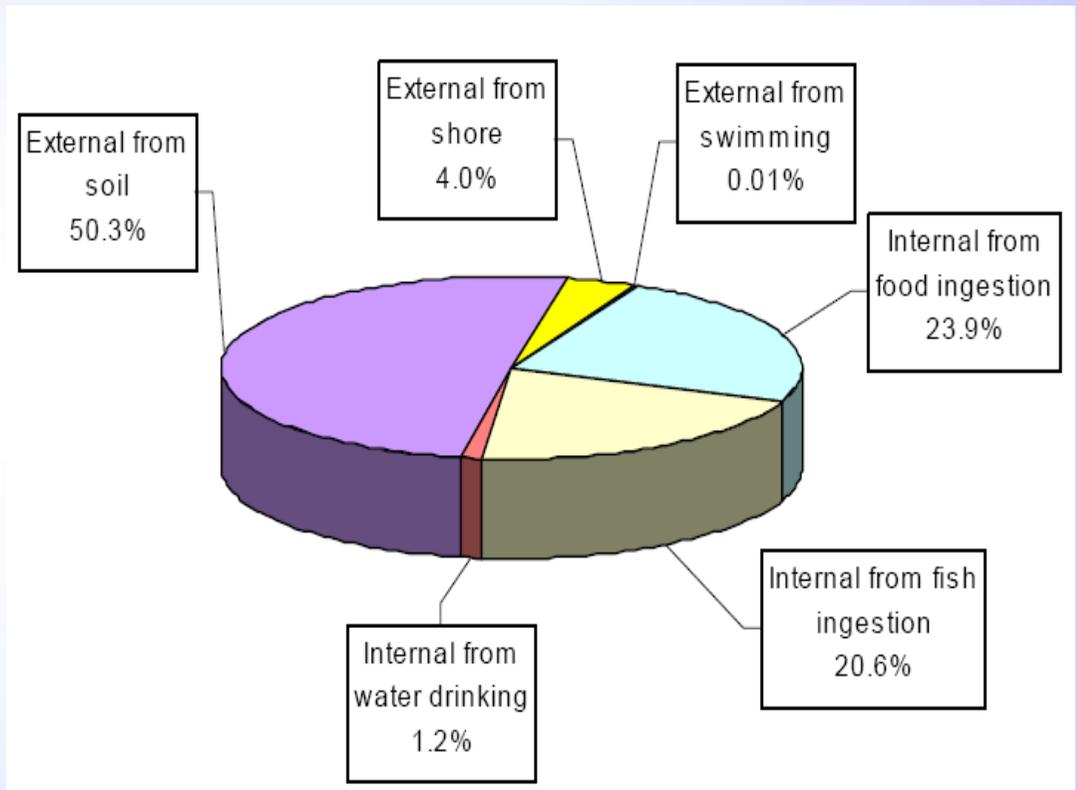
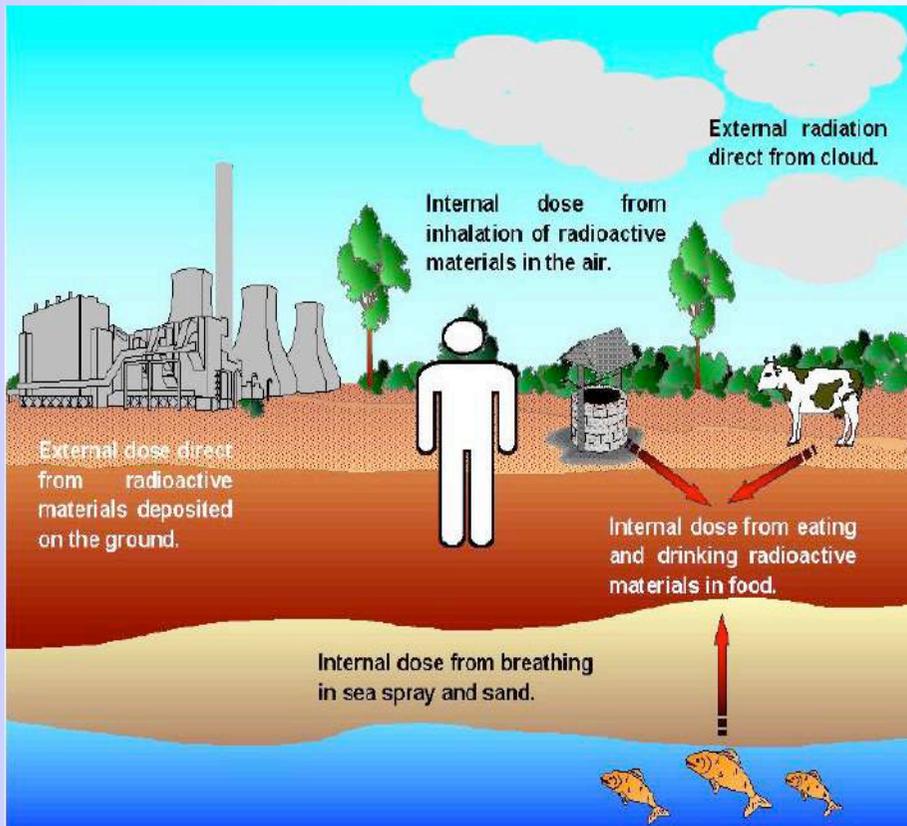


Saluti dalla “zona proibita”

Saverio Altieri Seminari di fisica  
ambientale MiB 13-05-21

# LE DOSI ASSORBITE

## le vie di esposizione



*FIG. 4.14. Contributions of different pathways to effective dose to the critical group of the population for the settlement Svetilovichi, Gomel Oblast, Belarus. (Drozdovich et al. 2002; IAEA 2005).*

# LE DOSI ASSORBITE

## il contributo relativo dei nuclidi

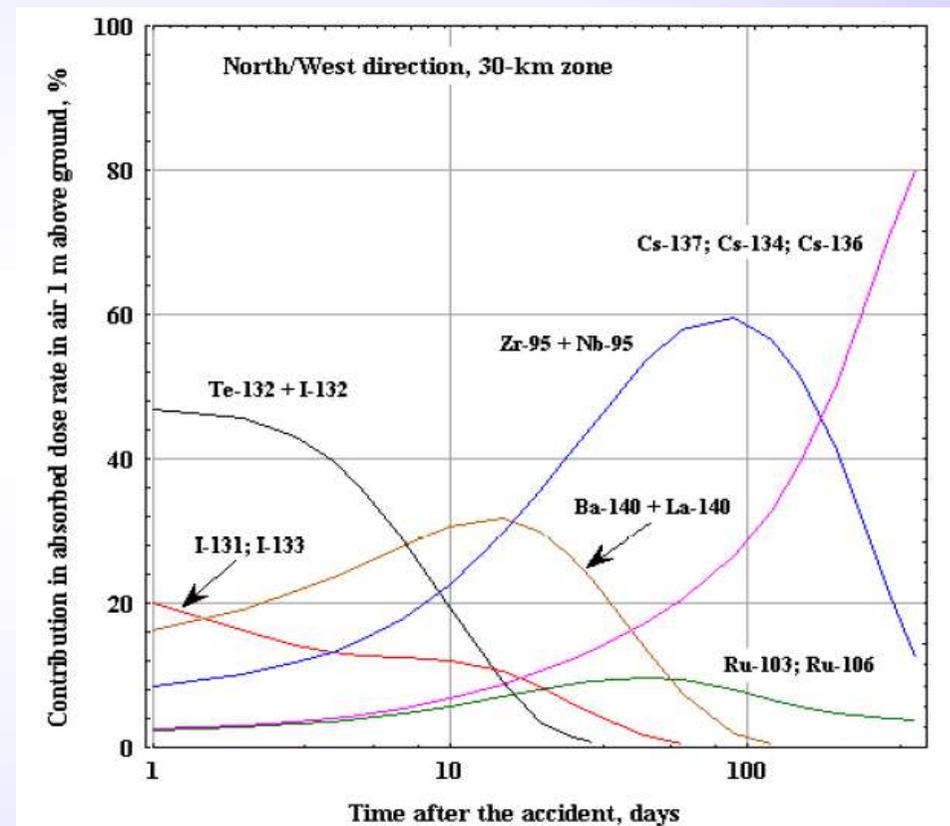
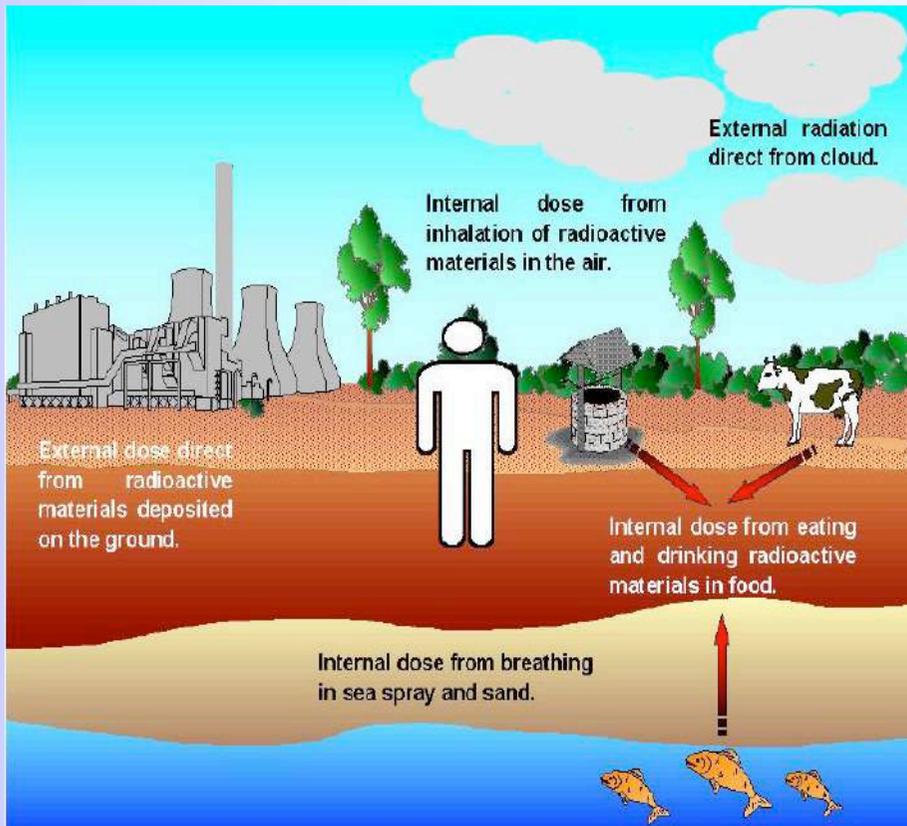


FIG. 4.4. Relative contribution of gamma radiation from individual radionuclides to the external gamma-dose rate in air during the first year after the Chernobyl accident (north/west direction, 30-km zone) (Golikov *et al.*, 2004)

# La vita continua anche nella “zona proibita”

Saverio Altieri Seminari di fisica  
ambientale MIB 13-05-21

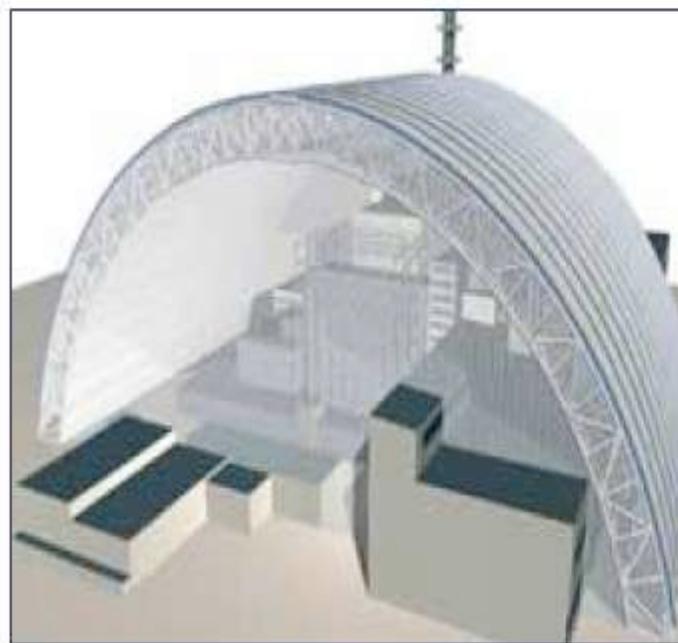
**Saluti dalla “zona proibita”**

## Chernobyl: The True Scale of the Accident

20 Years Later a UN Report Provides Definitive Answers and Ways to Repair Lives

si teme che il Sarcofago costruito per racchiudere il reattore distrutto possa collassare rilasciando nuovo materiale radioattivo, anche se potrebbero essere interessate solo le zone circostanti;

c'è in progetto la costruzione di un nuovo impianto che possa ricoprire completamente il sarcofago attuale e che possa resistere almeno per i successivi 100 anni. Terminata la costruzione del nuovo sistema di contenimento si potrebbe procedere alla rimozione dell'attuale sarcofago, del materiale a bassa attività e, forse, anche allo smantellamento del reattore danneggiato.



the  
le better  
...  
FIG. 9. Planned New Safe  
Confinement over the destroyed  
Chernobyl reactor.

La nuova struttura di protezione è alta 105 metri, lunga 150, con una campata di 257, pesante 29 mila tonnellate e secondo i progettisti resisterà per almeno 100 anni. Una volta ultimata, secondo le ultime notizie dello Shelter Fund della Bers nel 2017 avanzato, sarà letteralmente trasportata sopra la vecchia centrale smantellata.

L'inizio dei lavori per la costruzione del sarcofago, che dovevano cominciare nel 2006, è stato posticipato più volte a causa del reperimento dei fondi e solo dopo la conferenza dei donatori che si è tenuta nell'aprile del 2011 a Kiev per celebrare il 25esimo anniversario, la comunità internazionale e le autorità ucraine sotto Victor Yanukovich sono riuscite a dare l'accelerazione decisiva.

Il progetto avrebbe dovuto concludersi entro il 2015. Dopo la rivoluzione del 2014 e il cambio di regime a Kiev però sono sopraggiunte nuove difficoltà e il calendario è stato posticipato. Sino al dicembre del 2015 il Chernobyl Shelter Fund ha collezionato effettivamente 1,3 miliardi di dollari, ne manca più di uno all'appello per coprire tutti i costi saliti negli anni a 2,4 miliardi di dollari.

## ITALIA

stato necessario calcolare i valori medi delle dosi assorbite relativamente alle tre aree Nord, Centro e Sud". Ed ecco infine i risultati delle dosi individuali assorbite nell' arco di una vita (70 anni). Sono espressi in milliSievert e sono distinti per le tre fasce geografiche e le tre categorie di eta' prima precisate. **Nord: 1.8, 1.4 e 1.6. Centro: 0.9, 0.7 e 0.8. Sud: 0.6, 0.5 e 0.6.** "Per avere un' idea dell' entita' di queste dosi bisogna precisare che, nella media, ogni italiano assorbe ogni anno dal fondo naturale di radiazioni una dose di 2 circa milliSievert . spiega Tabet .. Potrebbe sembrare, quindi, che l' aggiunta dovuta alla contaminazione di Chernobyl sia trascurabile. Ma oggi esistono indicazioni che ogni incremento della dose, per quanto piccolo, provoca un aumento dei tumori. E infatti una frazione di questi tumori spontanei e' dovuta alle piccole dosi del fondo naturale di radiazioni. Se poi si considera che la piccola dose viene distribuita agli individui di una numerosa popolazione, ecco che il numero dei cancro letali attesi puo' diventare significativo". Va ricordato che queste stime sono affette da qualche incertezza". Tradotta in dose collettiva assorbita dall' intera popolazione italiana l' eredita' di Chernobyl vale circa 60.000 Sievert persona. Applicando a questa cifra la formula per l' incremento di rischio, di recente concordata dalla comunita' scientifica internazionale (pubblicazione Icrp, International commission on radiation protection n. 60 del 1990), si ricavano circa **3.000 casi di tumori letali.** "Si puo' obiettare che, rispetto ai milioni di tumori di altra natura attesi nello stesso periodo, questa cifra sia modesta, ma dubito che sia moralmente corretto trascurarla", fa notare il ricercatore dell'

Indeed the additional radiation doses are much smaller than the differences in the natural background doses between some parts of Europe, e.g. between the U.K. and Finland, and even the northern part of Italy compared with the

# Popolazione che vive nelle zone contaminate in provincial di PAVIA

## Popolazione che vive nelle zone contaminate dell'ex-Unione Sovietica

Le aree con contaminazione da  $^{137}\text{Cs}$  superiore a  $555 \text{ kBq/m}^2$  sono soggette a controllo

For people living in these areas for shorter but extended periods of time, the doses and risks would be correspondingly less. And for people living in the zones of higher contamination the doses and risks are correspondingly higher (e.g. for someone spending their entire life in an area with  $15 \text{ Ci/km}^2$  ( $555 \text{ kBq/m}^2$ ) of contamination would correspond to a statistical increase in the risk of death from cancer of less than  $0.1\% \times 15 = 1.5\%$  over the norm. This estimate does not include doses that anyone living in these areas received in previous years but are solely to estimate risks of living in these areas now and in the future.

Le aree con contaminazione superiore a  $1500 \text{ kBq/m}^2$  sono state evacuate

There were **eleven deaths between 1987 and 1998** among confirmed acute radiation sickness survivors who received **doses of 1.3-5.2 Gy**. There were three cases of coronary heart disease, two cases of myelodysplastic syndrome, two cases of liver cirrhosis, and one death each of lung gangrene, lung tuberculosis and fat embolism. One patient, classified with Grade II, died in 1988 from acute myeloid leukaemia.

**Radiation skin burns were observed in 56 patients.**

**Cataracts scarring and ulceration** are the most important causes of **persistent disability** in acute radiation sickness survivors.

Sexual function and fertility was investigated until 1996 in acute radiation sickness survivors. Functional sexual disturbances predominated, **while fourteen normal children were born to acute radiation sickness survivor families, within the first five years.**

Table 12. Outcome of radiation exposure among persons hospitalised for acute radiation syndrome

Number of patients	Estimated dose (Gy)	Deaths
21	6-16	20
21	4-6	7
55	2-4	1
140	less than 2	0
<b>Total</b> 237		<b>28</b>

In the highest exposure group of those who were acutely exposed (6-16 Gy), the first reaction was usually vomiting, occurring within 15-30 minutes of exposure. These patients were desperately ill; fever and intoxication as well as diarrhoea and vomiting, were prominent features. Mucous membranes were severely affected, becoming swollen, dry and ulcerated, making breathing and swallowing extremely painful and difficult. Extensive burns both thermal and due to beta radiation often complicated the illness. Within the first two weeks white blood cells and platelets fell dramatically, indicating a very high dose which had compromised the production of blood cells in the bone marrow, making it virtually impossible for the patients to fight infection or to retain the natural clotting activity of the blood. Almost all the patients with such high doses died (20 of 21), in spite of the intensive specialised medical treatment provided.

At lower exposures, the symptoms, signs and laboratory findings improved. Vomiting began later, platelet and white cell counts did not drop so precipitously and the fever and toxæmia were less pronounced.

Beta radiation burns to the skin were a major complicating factor and mucous membrane damage was difficult to treat, but survival improved markedly at lower doses, so that no early deaths were noted in the less than 1-2 Gy exposure group.

# Tumori della tiroide

Table 7. **Distribution of estimated individual doses in the thyroid of 0-7 years old children in Gomel and Mogilev contaminated districts**

	<b>Gomel</b>	<b>Mogilev</b>	<b>Total</b>
<0.05	784	256	1040
0.05-0.1	527	339	866
0.1-0.3	1762	586	2348
0.3-1	3573	476	4049
1-2	1983	119	2102
>2	5727	44	5771

**La dose alla tiroide** dovuta soprattutto al consumo di latte fresco nelle prime settimane

**Bambini della regione di Gomel in Bielorussia ricevettero le dosi più alte variabili fra da quasi zero fino a 40 Gy e una media di circa 1 Gy per bambini fra 0 e 7 anni.**

# Tumori della tiroide

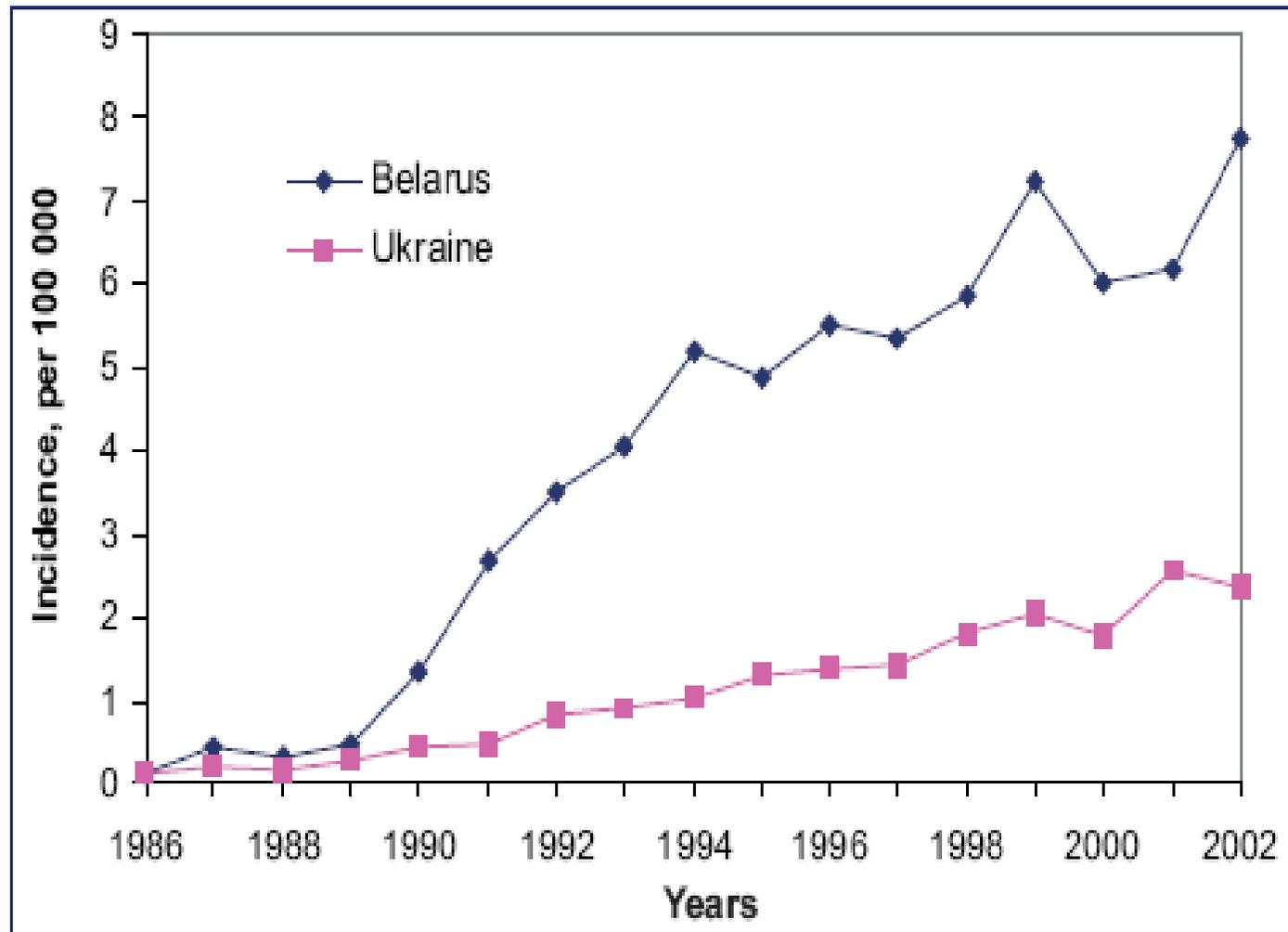


FIG. 3. Incidence rate of thyroid cancer in children and adolescents exposed to  $^{131}\text{I}$  as a result of the Chernobyl accident (after Jacob et al., 2005).

# **The Chernobyl Forum**

Nel 2003,  
su iniziativa della **IAEA** (International Atomic Energy Agency), venne  
costituito il **Chernobyl Forum** che vede coinvolte varie organizzazioni  
internazionali come  
**l'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO),**  
**l'UNSCEAR** (Commissione Scientifica delle Nazioni Unite sugli Effetti  
delle Radiazioni Atomiche),  
**la FAO,**  
**la Banca Mondiale e i**  
**Governi della Bielorussia, dell'Ucraina e della Federazione Russa.**

Scopo del Forum è quello di aiutare i Paesi colpiti a comprendere la  
portata dell'incidente e di suggerire le azioni da intraprendere per  
risolvere i vari problemi economici e sociali derivati dall'incidente. Le  
conclusioni più recenti del Forum sono riportate nel rapporto  
**“Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic  
Impacts”** (600 pagine in 3 volumi) che ha visto impegnati centinaia di  
scienziati, economisti e medici.

# The Chernobyl Forum



IAEA



WHO



UN  
DP



FAO



UNEP



UN-OCHA



UNSCEAR



WORLD BANK GROUP



Belarus



Ukraine



the Russian Federation

***Chernobyl's Legacy:  
Health, Environmental  
and Socio-Economic Impacts***  
and  
***Recommendations to the  
Governments of Belarus,  
the Russian Federation and Ukraine***



***The Chernobyl Forum: 2003-2005***

*Second revised version*

*Environmental Consequences  
of the Chernobyl Accident  
and Their Remediation:  
Twenty Years of Experience*

*Report of the UN Chernobyl Forum  
Expert Group "Environment" (EGE)*

*Health Effects  
of the Chernobyl Accident and  
Special Health Care Programmes*

*Report of the UN Chernobyl Forum  
Expert Group "Health" (EGH)*

# CHERNOBYL

## Assessment of Radiological and Health Impacts

2002 Update of  
*Chernobyl: Ten Years On*

## **Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-economic Impacts**

and

## **Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine**

# Chernobyl: The True Scale of the Accident

## 20 Years Later a UN Report Provides Definitive Answers and Ways to Repair Lives



### • PRESS RELEASE •

International Atomic Energy Agency  
World Health Organization  
United Nations Development Programme

Fino alla metà del 2005 **circa 50 persone sono morte per cause attribuibili direttamente alle radiazioni assorbite in seguito al disastro;** nella maggioranza dei casi si tratta di lavoratori intervenuti nelle prime ore dopo il disastro e deceduti entro pochi mesi;

Saverio Altieri Seminari di fisica  
ambientale MiB 13-05-21

## Chernobyl: The True Scale of the Accident

20 Years Later a UN Report Provides Definitive Answers and Ways to Repair Lives

Circa 2200 morti a causa delle radiazioni potrebbero verificarsi fra i 200.000 lavoratori intervenuti nel 1986-87 in cui sono compresi i circa 1000 lavoratori intervenuti nei primi giorni dopo l'incidente e che sono stati esposti ad elevate dosi di radiazioni; poiché circa il 25% della popolazione muore per tumori indotti da altre cause, sarà probabilmente difficile mettere in evidenza l'eventuale incremento di circa l' 1% stimato per le radiazioni;

1800 morti possono essere attesi fra le 350.000 persone delle popolazioni più esposte ed evacuate dalle zone più contaminate; anche in questo caso valgono le considerazioni del punto precedente;

4000 casi di tumore alla tiroide si sono verificati nella popolazione fra quelli che erano bambini o adolescenti nel 1986; il rate di sopravvivenza di questi casi è risultata pari a circa il 99%.