

L'Energia Nucleare a 20 anni d' Chernobyl



Prof. Sandro Paci
Università di Pisa
sandro.paci@ing.unipi.it

**NEW NUCLEAR
INDUSTRY TALK
CORPORATE**

wnn
world nuclear news
www.world-nuclear-news.org

Settembre 2007

Più di 20 nuovi progetti

Nuove esplorazioni minerarie



Richieste di licenze

Fusioni e acquisizioni

Completamento e riavviamento di reattori

Estensione delle licenze

Aumento della potenza

Costruzione di nuovi reattori

Avviamento test pre produzione



NUCLEAR POWER CORPORATION
(A Government of India Enterprise)

sommario

- **Gli inizi** (*dalla fine XIX secolo alla fine II Guerra Mondiale*)
 - La scoperta della radioattività
 - La fissione nucleare e la “pila atomica” (prima reazione a catena controllata)
 - L’impiego militare dell’energia nucleare
- **L’energia nucleare a scopi civili** (*dalla II Guerra Mondiale al crollo del muro passando dalla guerra fredda*)
 - Le centrali nucleari: come funzionano?
 - Occidente vs. ex-URSS
 - TMI-2 (USA) (1979)
- **L’incidente di Chernobyl (1986)**
 - Cosa è accaduto prima e dopo il disastro?
 - Perché non potrebbe succedere in una centrale “occidentale”
- **Il futuro non è lontano: Generations III, III+ e IV**
 - La fusione?

3

possibili sviluppi della discussione...

- l’energia nucleare a scopo bellico
- gli effetti biologici di Chernobyl: numero di vittime, impatto ambientale
- la fusione nucleare: fra speranze e utopie
- l’energia nucleare in Italia
- nuove e vecchie applicazioni dell’energia nucleare
- il nucleare e la medicina

4



i fondamentali...

5

• Once 18th century chemists had elucidated chemical elements' rules

- 1803 Atomic Model¹ - Dalton *According to common speech, there are colours, sweets, bitters; in reality however only atoms and emptiness*
- 1811 Molecular Theory - Avogadro
- 1895 Discovery of X rays - Roentgen
- 1896 Discovery of radioactivity - Becquerel
- 1905 Equivalence between mass & energy - Einstein
- 1911 Atomic Model with nucleus + stable electron orbits - Ruthenford
- 1926 Quantistic Mechanics - Schrodenger, Born, Heisenberg
- 1932 Nucleus formed by protons and neutrons - Heisenberg
- 1936 Atomic Model with nucleus + electron orbits - Böhr
- 1939 Discovery of nuclear fission

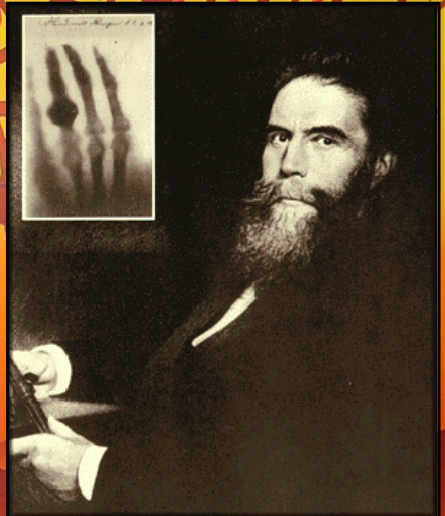
la scoperta della radioattività (1)

- 1896 - **Wilhelm Röntgen** scopre strani nuovi raggi prodotti quando una lamina di metallo è colpita da elettroni - poiché erano raggi di natura sconosciuta, vengono chiamati **raggi X**
- Nello stesso anno **Antoine-Henri Becquerel** osserva che l'uranio emette delle radiazioni capaci di impressionare una lastra fotografica protetta da uno schermo opaco ai raggi luminosi
- 1898 - **Marie e Pierre Curie** scoprono che la proprietà di emettere radiazioni penetranti è comune all'uranio e a molti dei suoi composti e danno al fenomeno il nome di **radioattività**
- Si comprende subito che la radioattività è la sorgente di energia più concentrata fino ad allora conosciuta

7

Wilhelm Roentgen

- Discovered X-Rays in 1895
- First Nobel Prize in Physics in 1901
- The unit "roentgen" was named after him



8

Antoine Henri Becquerel



- Exposed Film
- Radioactivity in 1896
- Nobel Prize in 1903

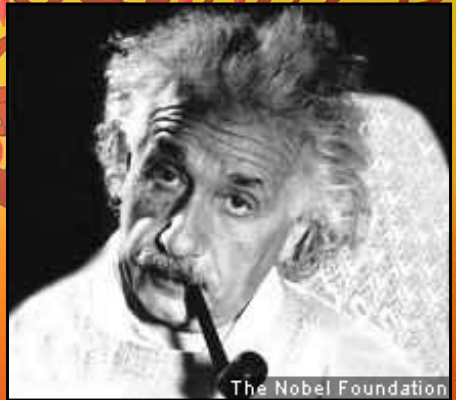
Marie Curie

- discovered the first radioactive elements: radium and polonium
- Also had a unit of radiation measurement named after her
- 2 Nobel Prizes, 1903 & 1911



Albert Einstein

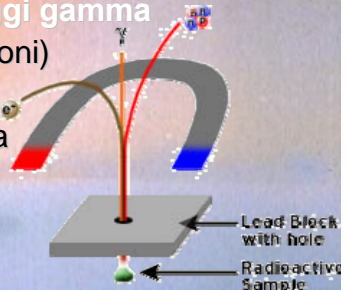
- Developed the Theory of Relativity
- In 1905 $E=mc^2$
- Nobel Prize 1921



11

la scoperta della radioattività (2)

- **Ernest Rutherford** scopre che vi sono almeno 2 componenti nelle emissioni radioattive: le **particelle alfa**, che penetrano solo per alcuni millesimi di cm nell'alluminio, e le **particelle beta**, con potere penetrante 100 volte maggiore
- Esperimenti successivi, in cui la radiazione venne sottoposta a campi elettrici e magnetici, rivelano la presenza di una terza componente ad alta energia, i **raggi gamma**
 - **alfa**: nuclei di elio (2 protoni, 2 neutroni)
 - **beta**: elettroni o positroni
 - **gamma**: radiazione elettromagnetica
- Le 3 forme hanno comportamenti diversi in un campi elettromagnetici e interagiscono diversamente con la materia: in ordine dalla meno alla più penetrante: alfa, beta, gamma



12

Ernest Rutherford

- Discovered the atomic nucleus in 1911
- Proved that atoms are mostly empty space
- Distinguished the difference between alpha and beta particles
- Nobel Prize in chemistry 1908



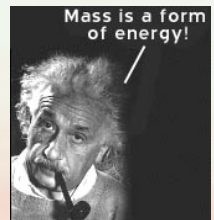
13

cosa è realmente la radioattività?

- La scoperta dei Curie che il radio decade producendo radon fu la prova che il decadimento radioattivo è accompagnato da una trasformazione chimica dell'elemento instabile
- Il decadimento radioattivo è il processo naturale responsabile per la diminuzione dell'energia del nucleo: se il nucleo di un elemento presenta un contenuto energetico che lo rende instabile, avviene il decadimento radioattivo spontaneo con rilascio di energia ottenuta dalla variazione di massa

$$E = mc^2$$

- Conseguenze sugli elementi:
 - Decadimento **alfa**: diminuzione di 2 p ($Z-2$) e 2 n ($N-2$)
Complessivamente il numero atomico $A=Z+N$ diminuisce di 4 unità
L'elemento cambia la sua natura chimica
 - Decadimento **beta**: $N-1$ e $Z+1$ o viceversa, con A invariato
L'elemento cambia la sua natura chimica
 - Decadimento **gamma**: nessun cambiamento nei numeri atomici
Di solito simultaneo all'emissione di radiazione alfa e beta



14

tempo di decadimento

- Il decadimento di alcune sostanze, come ^{238}U e ^{232}Th , sembra continuare indefinitamente senza una sensibile diminuzione del numero di disintegrazioni al secondo (grandezza caratteristica detta anche **attività**)
- Altre sostanze radioattive mostrano invece una decisa riduzione dell'attività nel tempo; p.e., per il ^{234}Th la velocità di disintegrazione si dimezza in 25 giorni
- Questo intervallo di tempo, caratteristico di ogni specie radioattiva, viene detto **periodo di dimezzamento** ed esprime il periodo necessario perché una determinata quantità di un elemento instabile si riduca alla metà del valore originario; p.e.:
 - ^{232}Th circa 14 miliardi di anni
 - ^{14}C è circa 5750 anni (datazione dei reperti biologici)

15

radioattività artificiale

- La radioattività è un processo naturale che avviene spontaneamente in alcuni elementi
- 1919 - **Rutherford** scopre che alcuni isotopi naturali stabili possono essere trasformati in isotopi instabili per mezzo di reazioni nucleari provocate
- 1934 - viene dimostrato che alcune reazioni nucleari possono condurre alla formazione di nuovi elementi radioattivi: **Irène e Frédéric Joliot-Curie** prepararono la prima sostanza radioattiva artificiale bombardando l'alluminio con α (*ma non si accorgono dell'emissione di n*)
- Si scopre la radioattività nucleare artificiale (indotta, non spontanea)

16

unità di misura

- **Curie (Ci)**: pari a $3,7 \cdot 10^{10}$ dis/s (1 g ^{226}Ra) indica l'attività di un campione: 1 μCi (mezzo chilo di insalata vietata in Italia ai tempi di Chernobyl) non crea problemi, 1 mCi va trattato con rispetto mentre una sorgente di 1 Ci può essere letale
Sostituito dal **Becquerel (Bq)** nel sistema SI (1 Bq = 1 dis/s)
- **Gray (Gy)**: dose (energia/kg) assorbita nel tempo; il danno però dipende dalle capacità di rigenerazione dell'organismo
- **Sievert (Sv)**: misura la **dose equivalente assorbita**, cioè gli effetti biologici tenendo conto del danno più o meno grande, a parità di energia, causato dai diversi tipi di radiazioni:
 - 1 mSv in tempi brevi (da evitare) non crea minimamente problemi
 - 6 mSv all'anno massimo ammesso per un lavoratore professionalmente esposto: assolutamente non misurabile l'impatto sull'organismo (rischio di tumore pari a quello di un avvocato e meno di un muratore)
 - 250 mSv/hr possono causare lieve alterazione temporanea dell'emoglobina mentre 4 Sv sono fatali in alcune settimane
 - In passato si utilizzava il **rem** (1 Sv = 100 rem)

17

effetti della radiazione

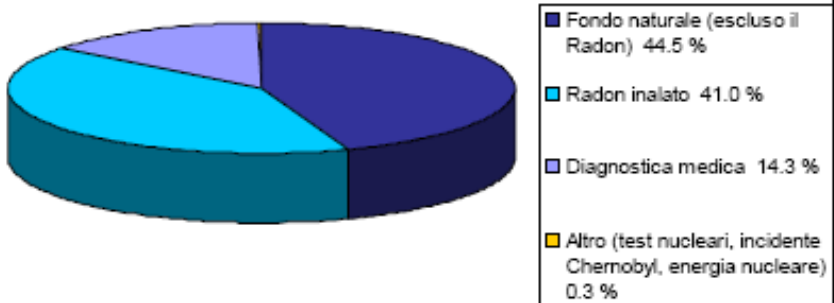
- Gli effetti delle radiazioni sull'uomo possono distinguersi in:
 - **effetti immediati** (deterministici) - sono quelli che, al di sopra di un certo valore di dose, si manifestano indistintamente a tutti coloro che sono stati irradiati, entro un tempo di solito di qualche settimana, e per cui la gravità dei danni aumenta con l'aumentare della dose: dermatiti, sterilità maschile e femminile (temporanea e permanente), danni al cristallino, problemi all'emoglobina, morte
 - **effetti a lungo termine** (stocastici): l'esposizione può avere effetti a lungo termine che possono provocare cancro o leucemia. Tali effetti si manifestano in modo aleatorio (non si possono predire in modo certo per ciascuna persona sottoposta alle radiazioni). Il limite massimo di dose stabilito dalla legge italiana per la popolazione è **1 mSv/anno al di sopra della dose naturale**. Secondo gli studi sugli effetti a lungo termine, questa dose corrisponde ad una probabilità di sviluppo di un cancro o leucemia mortale pari a 1/100.000
- Una volta conosciute le conseguenze dannose che l'esposizione alle radiazioni può provocare, è stato necessario predisporre adeguate misure di protezione: nasce la **radioprotezione**, ossia un insieme di misure destinate a garantire la protezione dalle radiazioni dei lavoratori, della popolazione e dell'ambiente

18

il fondo naturale

- Esiste un fondo di radiazione naturale che rappresenta un "bagno di radioattività" al quale gli organismi viventi si sono da tempo adattati

DOSE MEDIA ANNUA MONDIALE DA SORGENTI NATURALI E ARTIFICIALI (ANNO 2000)



la scoperta di Fermi (1)

- Dopo la scoperta dei Joliot-Curie, **Fermi** e il suo gruppo di Roma inizia una serie di ricerche bombardando molti elementi con n (scoperti nel 1932 da **J. Chadwick**) invece che α . L'idea era che il n , essendo neutro, doveva interagire più facilmente con i nuclei rispetto alle α
- estate 1934 - vengono bombardati Th e U: dai risultati si pensa erroneamente di aver scoperto due nuovi elementi "artificiali", battezzati esperio e ausonio
- La "falsa scoperta" fa il giro del mondo e viene confermata dai più importanti fisici nucleari dell'epoca

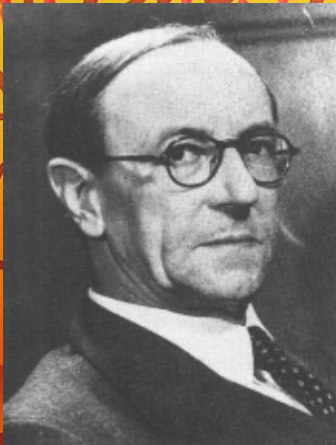
la scoperta di Fermi (2)



- In realtà il gruppo romano aveva scoperto la “**fissione nucleare**”, cioè i nuclei di Th e U bombardati con n si spezzano in nuclei di elementi leggeri, altamente radioattivi
- Non si avvedono dell'importante scoperta, malgrado fosse già stata ipotizzata da Ida Noddack, una chimica tedesca
- 20 ottobre 1934 - Fermi effettua una scoperta sensazionale: bombardando elementi con n precedentemente rallentati, l'effetto aumenta grandemente (“**neutroni lenti**”)
- gennaio 1935 - vengono bombardati nuovamente Th e U con n lenti e per la seconda volta non ci si accorge della scoperta della fissione nucleare

21

James Chadwick



- Discovery of neutron, 1932
- Nobel Prize, 1935

Enrico Fermi

- Discovered slow neutron
- Nobel Prize 1938
- Directed the construction of the first nuclear reactor at the University of Chicago in 1942



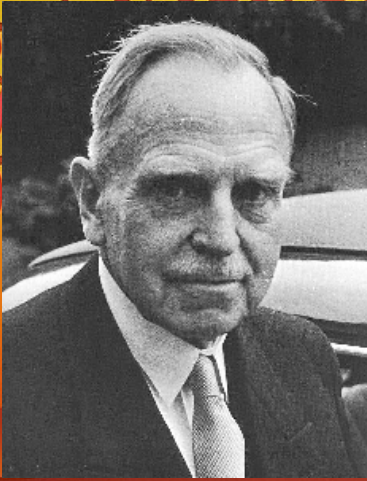
23

La fissione nucleare

- dicembre 1938 - **Otto Hahn** e **Fritz Strassmann** completano a Berlino un esperimento che mette in evidenza che U bombardato con n lenti produce Ba radioattivo, cioè un elemento con Z intermedio ed ipotizzano la **fissione nucleare**
- **Lise Meitner** e **Otto Frisch** interpretano i risultati sperimentali e confermano la scoperta
- Si stima l'energia emessa nel processo: circa 53 milioni di volte quella prodotta dalla combustione di un'uguale massa di C !

24

Otto Hahn



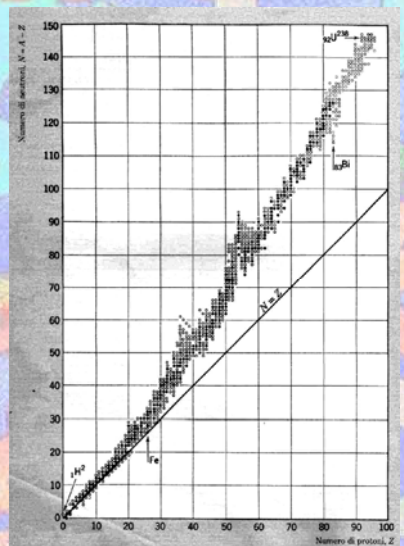
- Fission in 1939
- Nobel Prize, 1944

25

la fissione nucleare 1

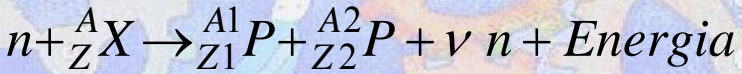
- All'interno del nucleo i protoni tendono a respingersi (repulsione columbiana) mentre i neutroni non risentono di questa repulsione
- I nuclei rimangono stabili per effetto della **forza forte** che tiene insieme p-p, n-n, p-n
- L'intensità di questa forza per bilanciare l'effetto di repulsione columbiana è legata al numero di nucleoni (p+n)
- Per elementi a basso Z si ha N circa uguale a Z mentre, ad alto Z, N cresce maggiormente

per l' ^{238}U si ha $Z = 92$ e $N = 146$

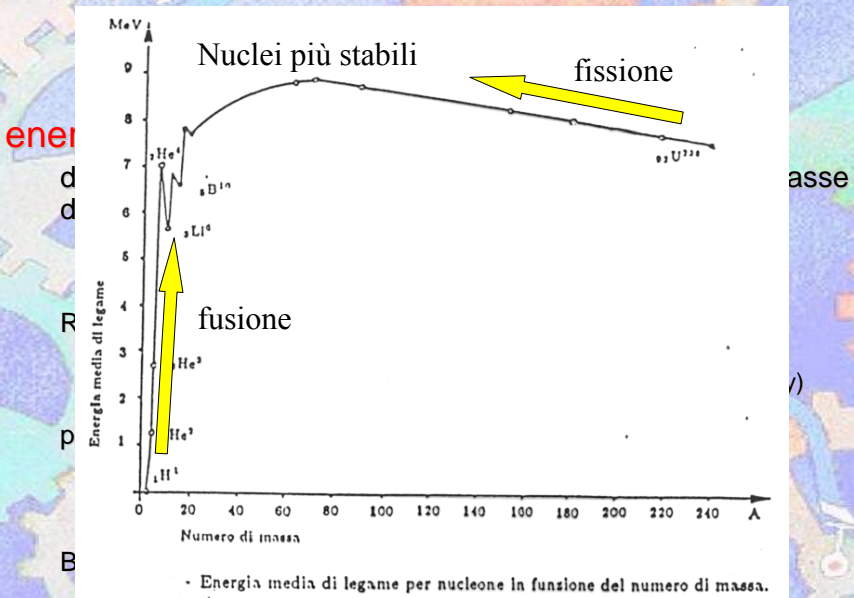


26

la fissione nucleare 2



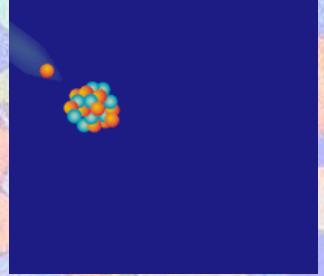
27



28

la reazione a catena

- 1939 - Fermi si trasferisce definitivamente in US e con lui molti dei fisici europei: inizia un intenso programma sulla fissione nucleare
- ^{235}U è in pratica il solo isotopo **fissile** presente in natura, cioè ha un'elevata probabilità di subire fissione se bombardato con n lenti (0.7% nel più abbondante ^{238}U). Inizia un programma industriale per aumentare questa % (**arricchimento**)
- il numero di n liberati in una fissione (>1) è sufficiente ad attivare altre fissioni, istaurando una "**reazione a catena**" in grado cioè di autosostenersi
- "**massa critica**" è la massa necessaria ad innescare una reazione a catena spontaneamente (dipende anche dalla forma geometrica)
- nodo fondamentale: controllare il numero di n
 - $K < 1 \rightarrow$ il numero di n diminuisce
 - $K = 1 \rightarrow$ reazione controllata
 - $K > 1 \rightarrow$ il numero di n aumenta
 - $K >> 1 \rightarrow$ esplosione



$$k = \frac{n \text{ prodotti}}{n \text{ comunque perduti}}$$

29

la "pila atomica"

- Il primo reattore nucleare:
 - materiale fissile ^{235}U



1940: discovery of antibiotics - penicillin (Great Britain)
 1943: first digital computer Colossus (Great Britain)

lizza il
 (rnica")
 ago

a 0.5

vv, si realizza la prima reazione a catena controllata

inizia l'era nucleare ...

il segreto militare

- 1942 – siamo in piena II guerra mondiale
- importanza strategica della fissione nucleare per la grande energia liberata è ben nota ai due schieramenti
- in US si concentrano i più grandi scienziati del mondo che decidono di effettuare le ricerche senza dare grossa diffusione dei risultati e spingono per finanziamenti governativi, azioni che culminano con la lettera di Einstein a Roosevelt

"Se avessi saputo che i tedeschi non sarebbero riusciti a costruire la bomba atomica, non avrei mai alzato un dito."

Albert Einstein

ella
pila atomica con la frase in codice "**Il navigatore italiano è arrivato nel nuovo mondo**". "E come si comportano gli indigeni?" chiedono all'altro capo del filo "Molto bene"...

31

il progetto Manhattan

- Dopo il successo della pila atomica, il governo USA decise un grosso stanziamento (400 milioni di dollari) per la realizzazione di un progetto per la fabbricazione di una bomba: **il progetto Manhattan**
- Forte coinvolgimento industriale americano per la produzione di ^{235}U
- marzo 1943 - si stabilisce di costruire un laboratorio segreto a **Los Alamos** (New Mexico) nel quale effettuare le ricerche e "rinchiudere" gli scienziati sotto la direzione ad Oppenheimer

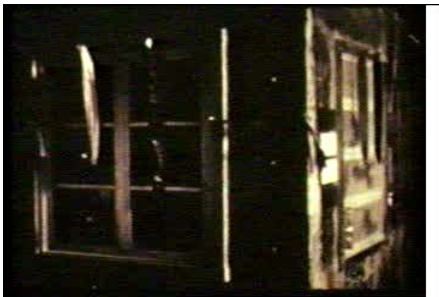
32

la bomba all'Uranio

- Raggiunta la massa critica di ^{235}U , si innesca la reazione a catena incontrollata che porta all'esplosione. Quindi essenzialmente bisogna realizzare un sistema di detonazione che permetta il raggiungimento della massa critica
- Per costruire una bomba è necessario accelerare il più possibile i tempi della reazione a catena, il che richiede l'uso di **n veloci** (di energia pari a quella posseduta al momento della nascita dalla fissione) per ridurre l'intervallo tra una fissione e l'altra. Viene eliminato il moderatore.
- Nella prima bomba si utilizza un sistema di due semi-sfere di ^{235}U che vengono unite al momento della detonazione: 16 kg - 12 cm di diametro
- Prima esplosione: 6 luglio 1945 nel deserto di Alamogordo
- **La stessa tecnica è impiegata nella bomba sganciata su Hiroshima il 6 agosto 1945**



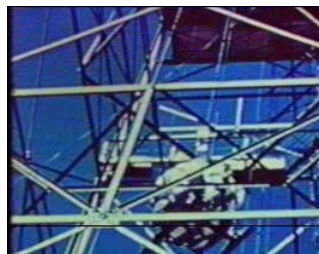
33



damag014.mpg

1945 first atomic explosion

- *Trinity experiment on July 16th first experimental atomic bomb exploded on a 100-foot-tower in the desert Jornada of Death (Jornada del Muerto) in New Mexico (USA)*



34

Trinity Test July 16, 1945

... Beyond this, I have no clues whatever
laboratory leader J. Robert Oppenheimer

**“Batter my heart,
three person'd God”**

John Donne, 1631

“If the radiance of a thousand suns
were to burst into the sky,
that would be like
the splendor of the Mighty One
I am become Death,
the shatterer of Worlds”

*Bhagavad Gita,
a date between 500 and 50 BC*



La bomba al Plutonio

- Il Pu è un elemento artificiale, cioè non esiste in natura
- Ottenuto dall' U^{238} che, dopo aver assorbito 1 n, diviene U^{239} che, a sua volta, decade in Np^{239} dal quale, con un ulteriore decadimento, si origina Pu^{239} (**fertilizzazione** – usata anche per produrre nuovo fissile nelle attuali centrali e soprattutto nelle centrali a n veloci – miglior sfruttamento della risorsa U naturale)
- Il Pu^{239} ha un numero dispari di n ed essendo più complesso dell' U^{235} è molto più instabile
- L'innesco avviene allo stesso modo della bomba ad U (mettere insieme velocemente più parti per raggiungere la massa critica)
- **La seconda bomba è sganciata su Nagasaki il 9 agosto 1945**

i dubbi della scienza

Novembre 1944: si capisce che la Germania non riuscirà ad arrivare alla bomba ed iniziano i dubbi degli scienziati: non ci sono più motivi per la realizzazione della bomba

Primavera 1945: alcuni scienziati scrivono a Roosevelt: fermiamoci!

Aprile 1945:
Finisce la

6 agosto 1945: Hiroshima

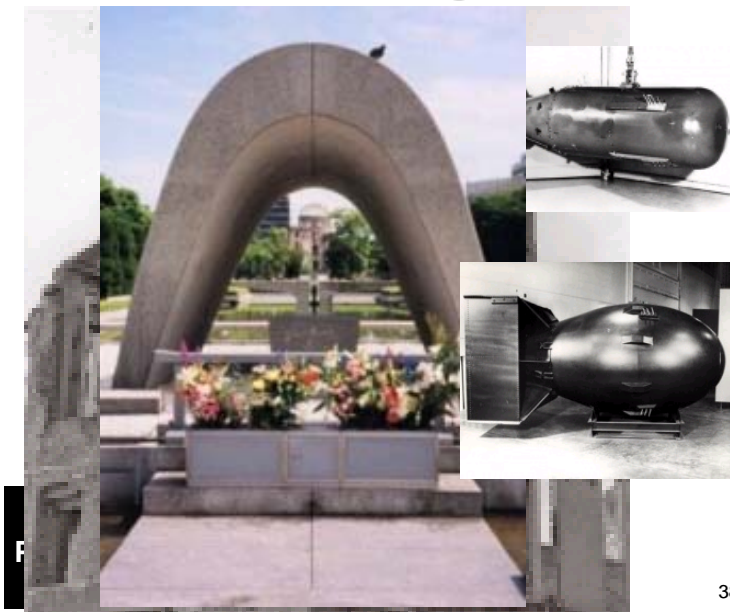
Presidente.
finisce

9 agosto 1945: Nagasaki

Giugno 1945: un gruppo di fisici (Oppenheimer, Fermi e altri) chiede di lanciare subito la bomba sul Giappone; altri chiedono di usare la bomba solo nel deserto a scopo dimostrativo. Truman decide per il lancio sul Giappone.

Luglio 1945: pronti i 2 tipi di bombe - lancio dimostrativo nel New Messico: potenza: 20000 ton di tritolo
Ultimatum al Giappone: respinto.

Hiroshima e Nagasaki



Fine dei fondamentali

- radiazione = processo con emissione energetica da nuclei instabili allo scopo di ridurre la loro energia interna
- La radiazione può essere indotta (radiazione artificiale)
- **Combustibile** - U più o meno arricchito (aumenta la percentuale del fissile ^{235}U)
- **Moderatore** per rallentare i n: grafite, acqua
- Per tenere sotto controllo la reazione: materiali con alto potere di assorbimento di n (Cd, B, Ag)
- Dalla fissione si libera una grande quantità di energia e si producono elementi altamente radioattivi (scorie radioattive)

- **IMPORTANTE: raffreddare il sistema per evitare che fonda**

Passiamo all'uso civile dell'energia nucleare...

39

sommario

- **Gli inizi** (dalla fine XIX secolo alla fine II Guerra Mondiale)
 - La scoperta della radioattività
 - La fissione nucleare e la "pila atomica" (prima reazione a catena controllata)
 - L'impiego militare dell'energia nucleare
- **L'energia nucleare a scopi civili**
(dalla II Guerra Mondiale al crollo del muro passando dalla guerra fredda)
 - Le centrali nucleari: come funzionano?
 - Occidente vs. ex-URSS
 - TMI-2 (USA) (1979)
- **L'incidente di Chernobyl (1986)**
 - Cosa è accaduto prima e dopo il disastro?
 - Perché non potrebbe succedere in una centrale "occidentale"
- **Il futuro non è lontano: Generations III, III+ e IV**
 - La fusione?

40

DATE STORICHE ENERGIA NUCLEARE

■ NASCE C.I.S.E.

19.12.1946

1946 - 1950

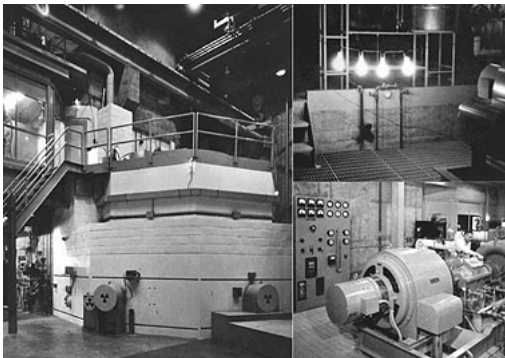
knowledge about chain reactions spreads



- **1946:** first controlled nuclear chain reaction in the former Soviet Union (reactor F-1 in Moscow)
- **1947:** first controlled nuclear chain reaction in West Europe (experimental facility UK GLEEP in Great Britain)
- **1947:** start of investigations of controlled chain reaction based on fast neutrons (Los Alamos laboratories)
- **1950:** first experiments dealing with nuclear fusion (A. Saharov)
- **1950:** transition to the postindustrial society began in USA with "TV-bom"

1951

first "nuclear" electric bulb



- the research reactor EBR-1 (USA, Argonne National Laboratory) was the first nuclear reactor equipped with the facility for production of electricity: on December 20th, for the first time an electric bulb gave light based on energy produced by fission of uranium nuclei with fast neutrons
- nuclear industry was directed into the development of thermal reactors in which fission is based on slowed-down (thermal) neutrons

DATE STORICHE ENERGIA NUCLEARE

1954

first nuclear power plant



- *the nuclear reactor APS-1 in Obninsk (Soviet Union) was incorporated into a station for sustained production of electricity (power of 5 MW)*
- *this type of water cooled and graphite moderated nuclear reactor was the precursor of the later RBMK reactor type (Chernobyl), which was developed after the year 1964*
- *the development of nuclear technology also started within the framework of civil institutions; private initiative was enabled in USA*

- CONFERENZA GINEVRA "ATOMS FOR PEACE" **1955**
- CRISI SUEZ **1956**
- CESSIONE CENTRO ISPRA A JRC **29.07.1959** 43

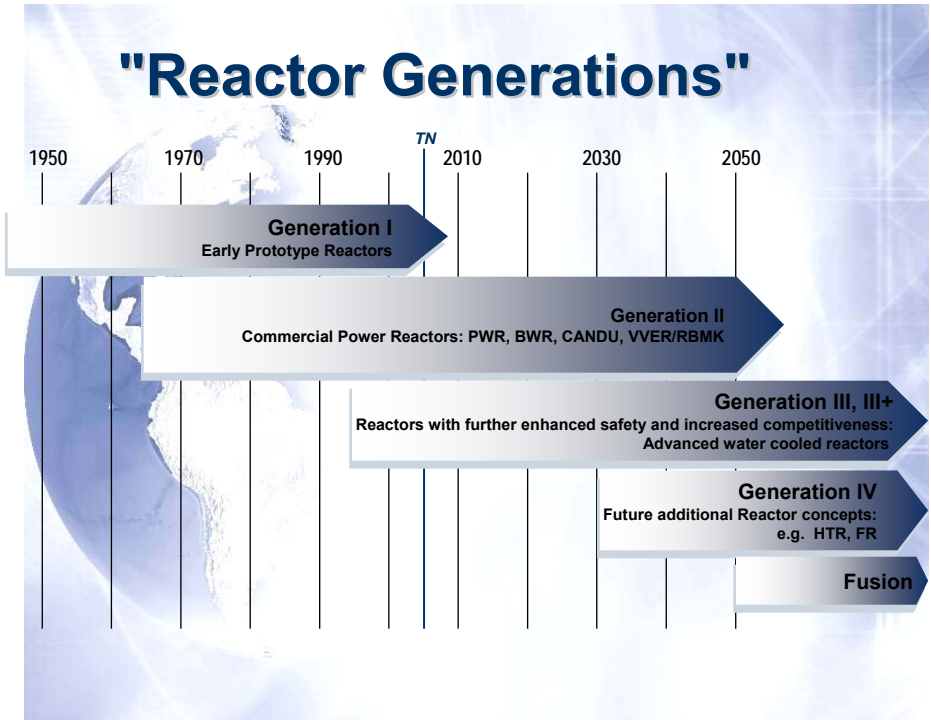
DATE STORICHE ENERGIA NUCLEARE

- NASCE C.N.E.N. **21.09.1959**
- NASCE ENEL DALLE NAZIONALIZZAZIONI **01.1963**
- CASO IPPOLITO **estate 1963**
- BLACKOUT NY **09.11.1965**
- "ENTUSIASMO NUCLEARE" **1966-1976**
- TRATTATO NON PROLIFERAZIONE (*oggi ca. 155 Paesi*
– NO: INDIA, PAKISTAN, ISRAELE,...) **1970, rinnov. 1995**
- GUERRA KIPPUR **06.10.1973**
- INDIA OTTIENE BOMBA ATOMICA **05.1974**
- PREVISIONI (fantasmagoriche...) ANGELINI-RISTAGNO **1974**
- DISCORSO CARTER SU PROLIFERAZIONE **07.04.1977**

DATE STORICHE ENERGIA NUCLEARE

- INCIDENTE TMI 28.03.1979
- BOMBARDAMENTO ISRAELIANO DI BAGDAD 07.06.1981
- PUN Piano Unificato Nucleare - PWR 1981
- INCIDENTE CHERNOBYL 26.04.1986
- CONFERENZA NAZIONALE SULL'ENERGIA 02.1987
- PROGETTO CIRENE (completo 95%) 1987
- REFERENDUM
(CIPE, *partecipaz.soc.estere, sussidio comuni*) 8-9.11.1987
- GUERRA DEL GOLFO 16.01.1991
- PROTOCOLLO DI KYOTO 12.1997
- PAKISTAN OTTIENE BOMBA 1998
- CRISI ENERGETICA IN CALIFORNIA 12.2000

45



le centrali nucleari (1)

- Inizialmente costruite in USA, UK, F, C, I e URSS fra il primo dopoguerra e gli inizi anni '60
- Potenze medie dei primi impianti: 150-300 MWe
- Aumento taglia con Gen. II: 900 MWe
- Attuale Gen. III: 1400-1600 MWe (50-300 MWe centrali a combustibile fossile a singola unità)
- Riferimento: in Friuli V.G. si ha una potenza installata di circa 1300 MW

47

classificazione delle centrali nucleari

Scopo	Potenza		Propulsione		Ricerca	
energia n	Termica				Veloce	
comb.(u)	Naturale			Arricchito		
stato Fuel	Solido			Liquido		
disp. Fuel	Omogenea			Eterogenea		
fluido termovettore	Acqua leggera (LWR)	Acqua pesante	Gas (CO ₂ , He)	Metalli liquidi (Na, Pb /Bi)	Fluidi organici	
Moderatore	Acqua leggera		Acqua pesante	Grafite (RBMK)		
ciclo termod.	Diretto (BWR)	Indiretto (PWR/VVER)	<u>oppure</u>	Vapore	Gas	
sviluppo	Provati	(Avanzati	Evolutivi	Innovativi)		
Impianto	Vessel in pressione			Tubi in pressione		
contenitore	Piena pressione			Soppressione di pressione		

centrali nucleari in Italia

- **LATINA** (gas-grafite)
- **GARIGLIANO** (BWR)
- **TRINO VERC.** (PWR)
- **CAORSO** (BWR)
- **MONTALTO** (BWR)

costruzione	In rete	Ultima rete
1958	1963	1986
1959	1964	1978
1961	1965	1987
1971	1978	1986
1983	-	-

49

la corsa italiana alle prime centrali

1956: Edison acquista l'impianto Westinghouse per Trino Vercellese (in parallelo nel 1964)



TRINO VERCELLESE

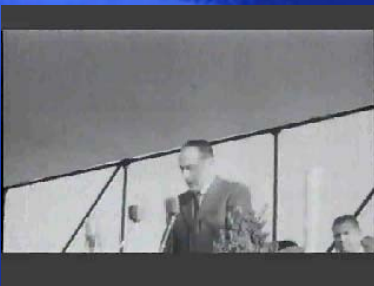
PWR, (185→)250 MWe



51

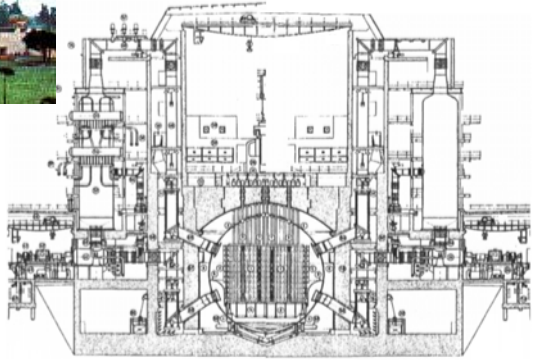
la corsa italiana alle prime centrali

1956: ENI ordina un impianto di concezione inglese per il sito di Latina (il primo connesso alla rete, nel 1963)



LATINA

MAGNOX (GAS-GRAFITE), 200 MWe



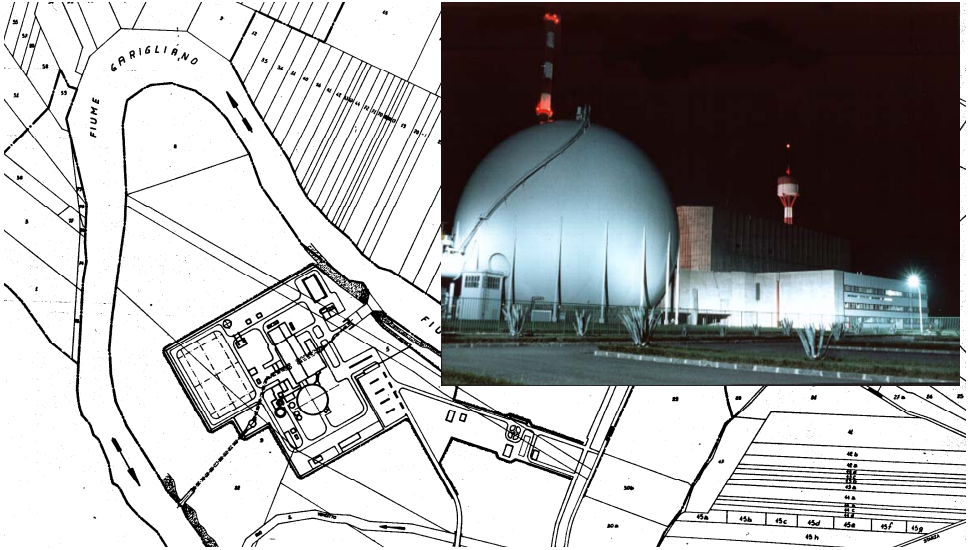
la corsa italiana alle prime centrali

1958: SENN (IRI) assegna a General Electric (GE) la fornitura per il reattore di Garigliano (in parallelo nel 1964)

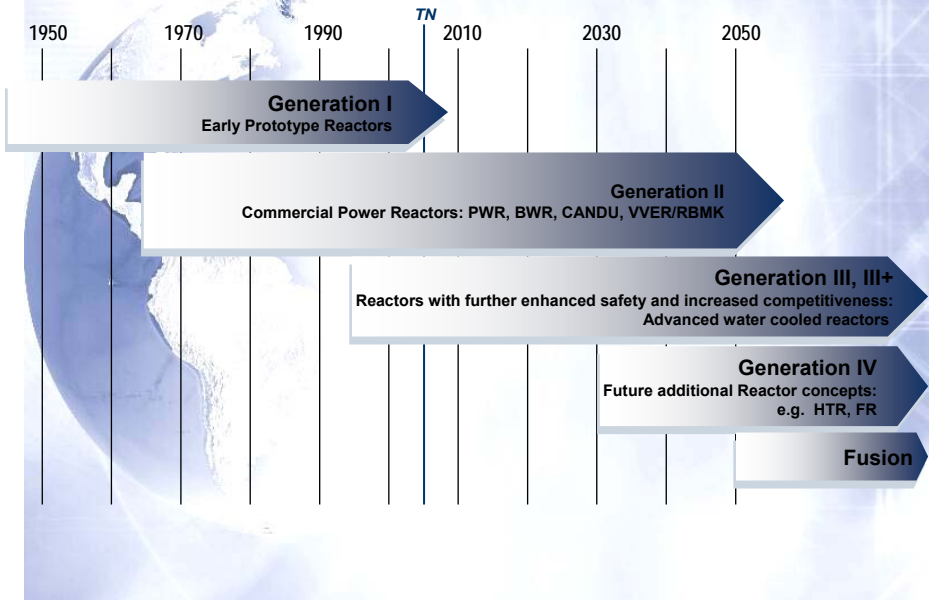


GARIGLIANO

BWR, 150 MWe



"Reactor Generations"



CAORSO

BWR, 800 MWe



MONTALTO DI CASTRO

BWR, 900 MWe



MARK III CONTAINMENT

REACTOR BUILDING

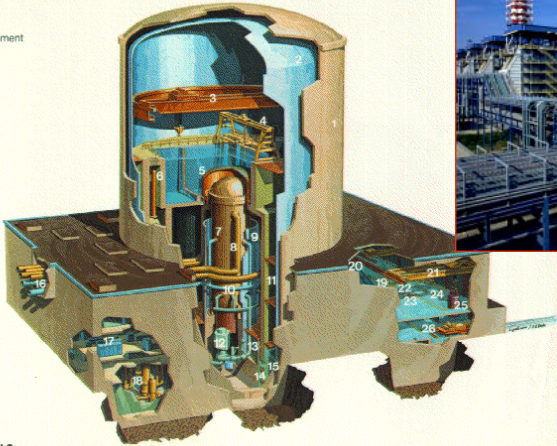
1. Shield Building
2. Free-Standing Steel Containment
3. Piler Crane
4. Refueling Platform
5. Upper Pool
6. Reactor Water Cleanup
7. Reactor Vessel
8. Steam Line
9. Shield Wall
10. Feedwater Line
11. Drywell
12. Recirculation Loop
13. Weir Wall
14. Horizontal Vent
15. Suppression Pool

AUXILIARY BUILDING

16. Steam Line Tunnel
17. Motor Control Centers
18. H/W System

FUEL BUILDING

19. Fuel Transfer Bridge
20. Fuel Transfer Tube
21. Cask Handling Crane
22. Fuel Storage Pool
23. New Fuel Vault
24. Cask Loading Pool
25. Spent Fuel Shipping Cask
26. Fuel Cask Skid



GENERAL ELECTRIC

59

439 Nuclear Power Stations Worldwide

North America
121

Western Europe
130

Central & Eastern
Europe
67

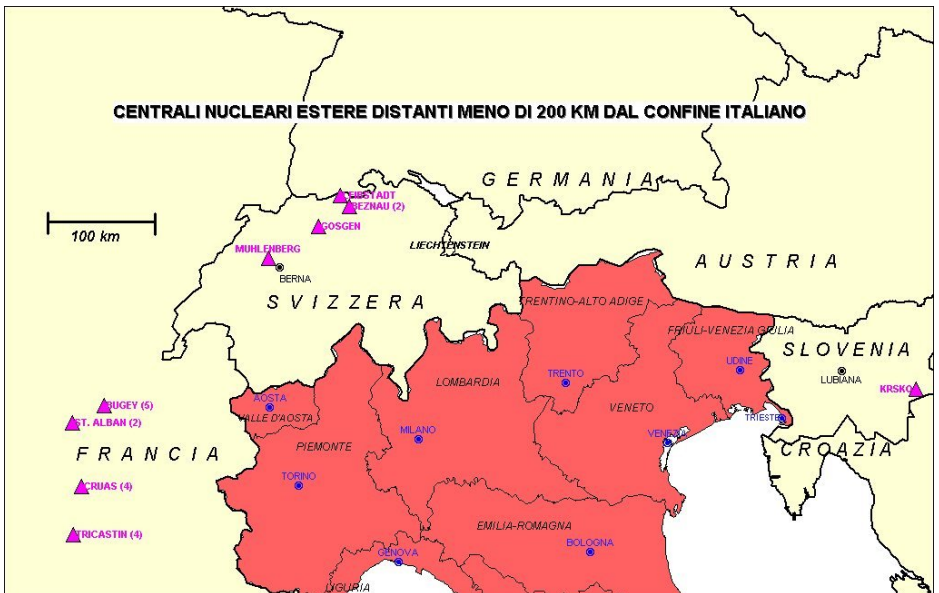
Asia
109

Latin America
6

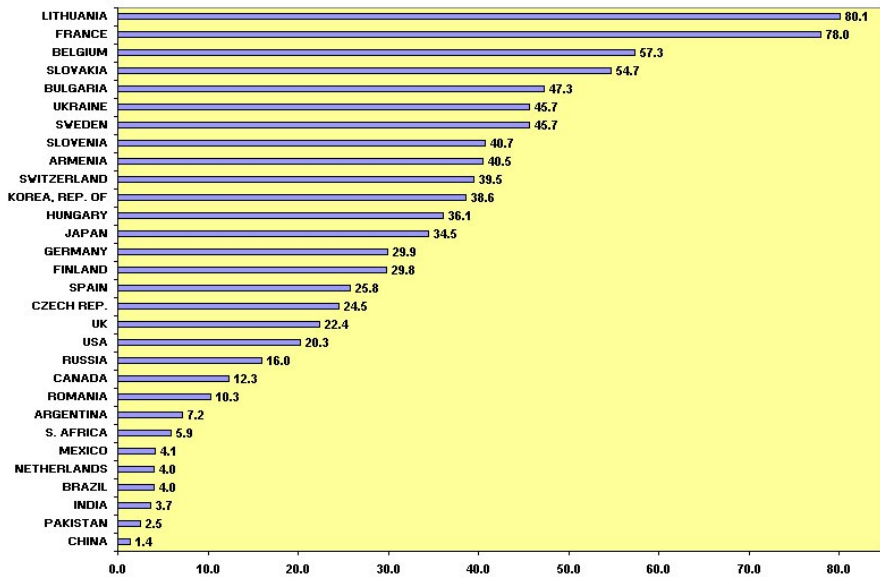
Africa
2

*Countries using nuclear power represent
2/3 of the world population*

Source: WNA (January 2007)

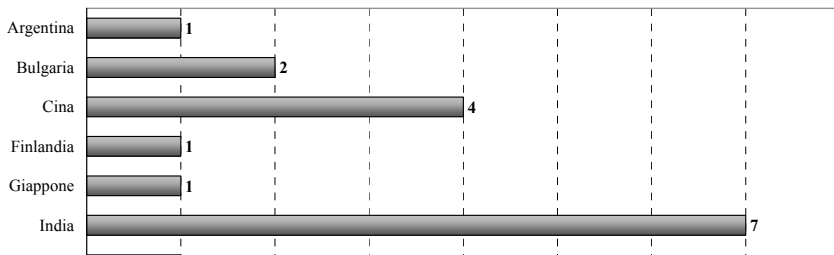


Nuclear Share of Electricity Generation in 2005



Source: IAEA, 2006 63

27 Nuclear Reactors under construction in 2006



33 Nuclear Reactors under construction in 2007



Source: IAEA, 2006 64



**esempio di struttura
di un Impianto Nucleare
(PWR)**

65



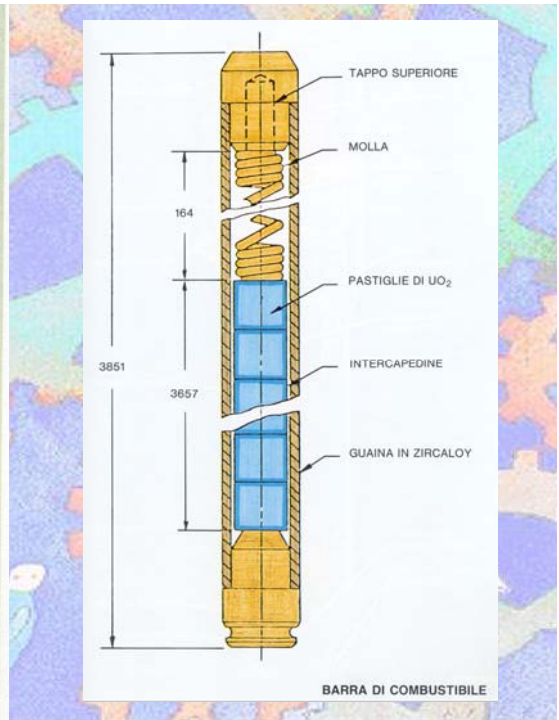
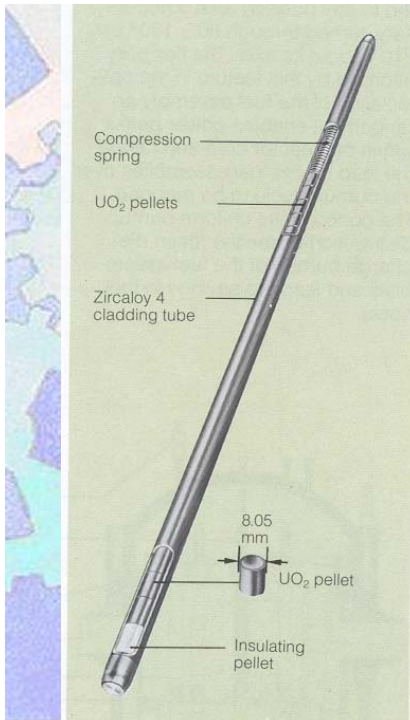
**esempio di struttura
di un Impianto Nucleare
(EPR)**

66

le centrali nucleari (3)

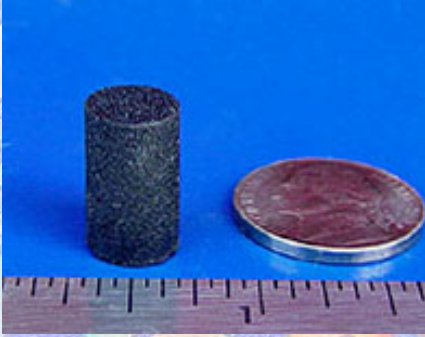
- Nel nocciolo (*core*) avvengono le reazioni nucleari, che riscaldano a temperature intorno ai 1000 °C le pasticche (*pellets*) di combustibile leggermente arricchito (UO_2) impilate in barrette (*cladding*) ed assemblate negli elementi di combustibile (*fuel assembly*)
- Queste barrette sono refrigerate dall'acqua di raffreddamento che asportando calore si riscalda e può essere utilizzata o in un GV o direttamente in turbina
- L'acqua si trova a circa 300-330°C
 - non evapora nei PWR perché tenuta a circa 155 bar
 - In saturazione nei BWR a circa 70 bar
- **L'acqua è sia fluido termovettore che moderatore**

67



Fuel Pellets

Fuel of most commercial reactors use uranium dioxide (UO_2) enriched to about 3-5% U-235

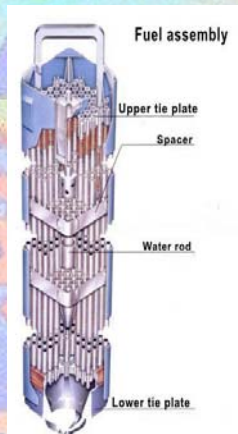
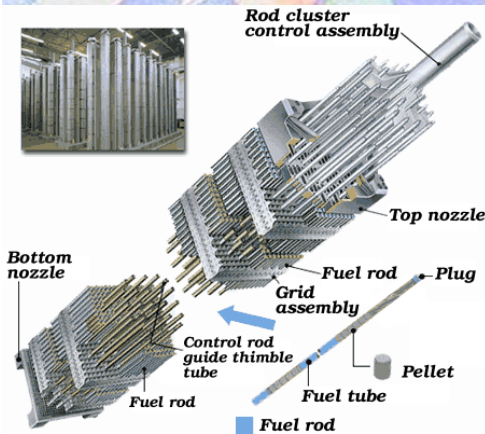


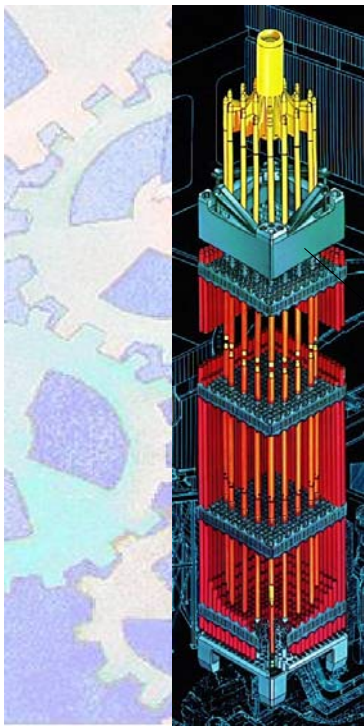
- A 1.0 by 1.5 cm ceramic, cylindrical pellet
- Resistant to melting temperatures greater than 2000°F



Fuel Assemblies

- Fuel pellets are put into rods of zircaloy or stainless steel
- About 200 rods are made into assemblies and 200 assemblies make up a core.

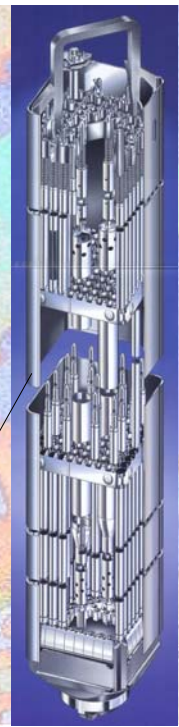




Fuel Assembly

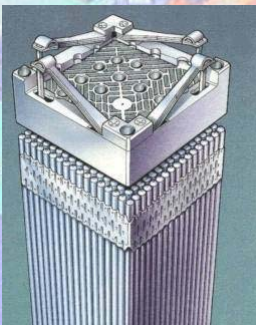
PWR

BWR



il nocciolo

- è composto da 3 elementi fondamentali:
 - il combustibile (UO_2 arricchito circa al 3%)
 - il moderatore (acqua, acqua pesante o grafite)
 - I sistemi di controllo



Safety Systems

Safety systems are designed to retain FP radioactive materials using layered & redundant protection systems + natural safety systems



73

Reactor Safety

The basic purpose of Reactor Safety is

TO MAINTAIN THE INTEGRITY OF THE MULTIPLE BARRIERS TO THE FP RELEASES

It is supported by a 3-level defence approach:

1. prevention
2. protection
3. mitigation

74

Barrier #1: Fuel Cladding

There are many properties that fuel cladding must have; some of these are:

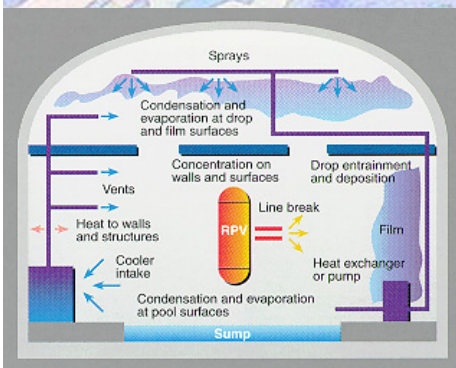
- Able to withstand high temperatures & transient temperatures
- High corrosion resistance
- Low thermal neutron absorption
- High thermal conductivity to minimize thermal stress & low expansion
- Zirconium, aluminum, magnesium and beryllium have been used as cladding

Barrier #2: Reactor Pressure Vessel

Reactor vessels are made from low carbon steels which make the vessel less brittle. Duration of a reactor vessel is about 60 years.

- Thickness of vessel depends on pressure & dimensions
- Radioisotopes & samples used for a continuous quality control

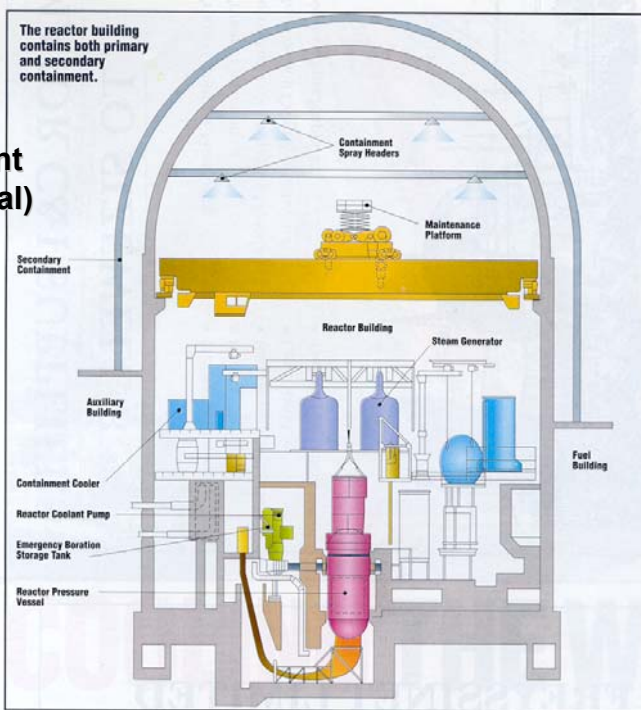
Barrier #3: Containment



The obvious picture of containment is the containment dome. It is a reinforced concrete dome about so many meters high.

- 1 - 2 m thick & composed of a lot of rebar
- Can survive impact of Boeing 747
- Prevents the release of radioactive gases

Pressure Containment (PWR typical)



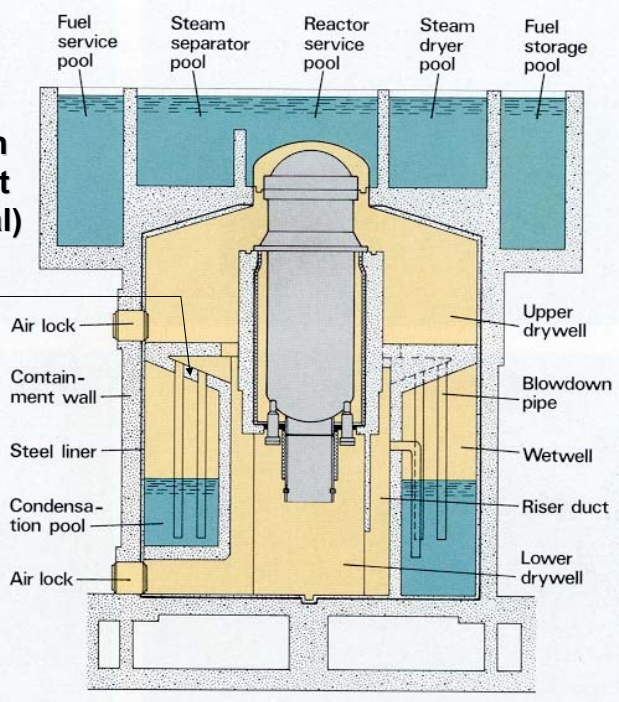
77

Contenitore PWR

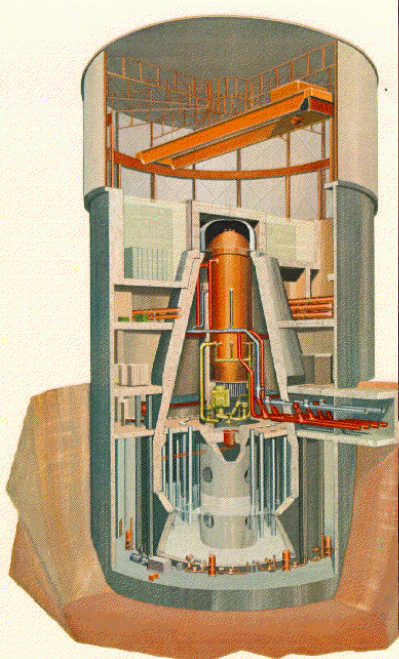
- Calcestruzzo armato vs. Precompresso vs. Acciaio
- Contenitore primario (70000 m³, 4.1 bar ass., 1.4 m spessore, liner acciaio 10mm)
- Contenitore secondario (0.8 m spessore, missili/eventi esterni)
- Intercapedine in depressione
- Sistemi aux. e sicurezza:
 - Sprayers o Ice condenser
 - Condiz. e filtrazione aria
 - Filtrazione e controllo aria intercapedine
 - Ricombinatori idrogeno

78

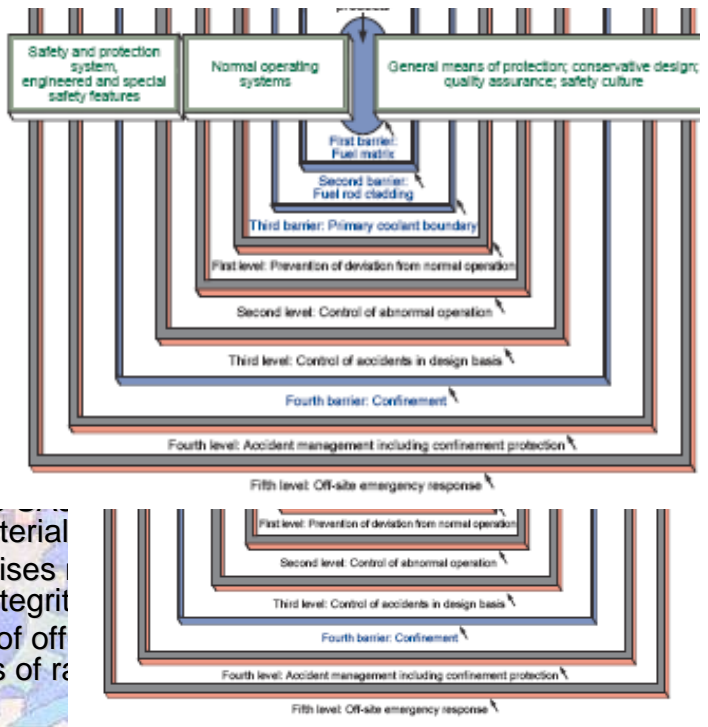
Pressure Suppression Containment (BWR typical)



BWR CONCRETE CONTAINMENT



- **I level** of protection: design, QA, safety systems, reinforcing each other to prevent releases
- **II level** is the response to a system failure: integrity of the primary system
- **III level** is affected by evolution of failure from DBAs into radioactive material
- **IV level** comprises **containment** integrity
- **V level** is that of off-site mitigation effects of radiation on environment



Strategy	Accident prevention			Accident mitigation				
Operational state of the plant	Normal operation	Anticipated operational occurrences	Design basis and complex operating states	Severe accidents beyond the design basis	Post-severe accident situation			
Level of defence in depth	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5			
Objective	Prevention of abnormal operation and failure	Control of abnormal operation and detection of failures	Control of accidents below the severity level postulated in the design basis	Control of severe plant conditions, including prevention of accident progression, and mitigation of the consequences of severe accidents, including confinement protection	Mitigation of radiological consequences of significant releases of radioactive materials			
Essential features	Conservative design and quality in construction and operation	Control, limiting and protection systems and other surveillance features	Engineered safety features and accident procedures	Complementary measures and accident management, including confinement protection	Off-site emergency response			
Control	Normal operating activities		Control of accidents in design basis	Accident management				
Procedures	Normal operating procedures		Emergency operating procedures	Ultimate part of emergency operating procedures				
Response	Normal operating systems		Engineered safety features	Special design features	Off-site emergency preparations			
Condition of barriers	Area of specified acceptable fuel design limit			Fuel failure	Severe fuel damage	Fuel melt	Uncontrolled fuel melt	Loss of confinement

Colour code: NORMAL (orange), POSTULATED ACCIDENTS (blue), EMERGENCY (red)

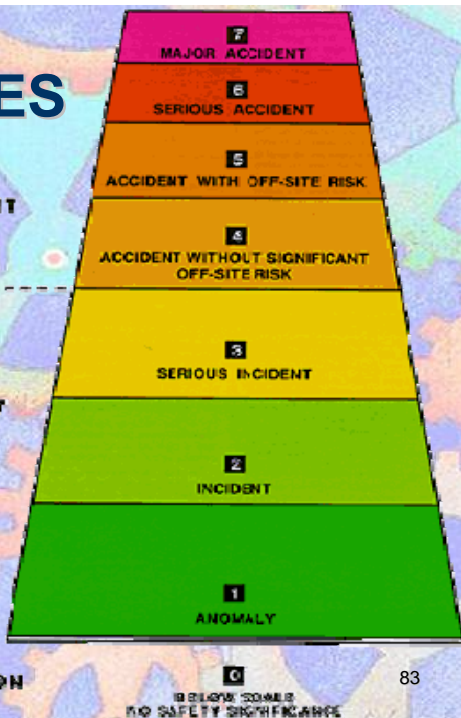
INES

IAEA
Nuclear
Events
Scale

ACCIDENT

INCIDENT

DEVIATION



83

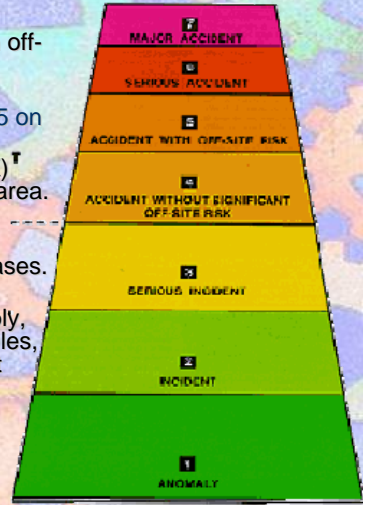
INES Basic Structure

LEVEL	CRITERIA OR SAFETY ATTRIBUTES		
	OFF-SITE IMPACT	ON-SITE IMPACT	DEFENCE IN DEPTH DEGRADATION
7 MAJOR ACCIDENT	Major release: widespread health and environmental effects		No Safety Layers remaining
6 SERIOUS ACCIDENT	Significant release: likely to require full implementation of planned countermeasures		
5 ACCIDENT WITH OFF-SITE RISK	Limited release: likely to require partial implementation of planned countermeasures	Severe damage to reactor core/radiological barriers	
4 ACCIDENT WITHOUT SIGNIFICANT OFF-SITE RISK	Minor release: public exposure of the order of prescribed limits	Significant damage to reactor core/radiological barriers/fatal exposure of a worker	
3 SERIOUS INCIDENT	Very small release: public exposure at a fraction of prescribed limits	Severe spread of contamination / acute health effects to a worker	Near accident - no safety layers remaining
2 INCIDENT		Significant spread of contamination/overexposure of a worker	Incidents with significant failures in safety provisions
1 ANOMALY			Anomaly beyond the authorised operating regime
0 BELOW SCALE EVENT	NO SAFETY SIGNIFICANCE		
OUT OF SCALE EVENT	NO SAFETY RELEVANCE		

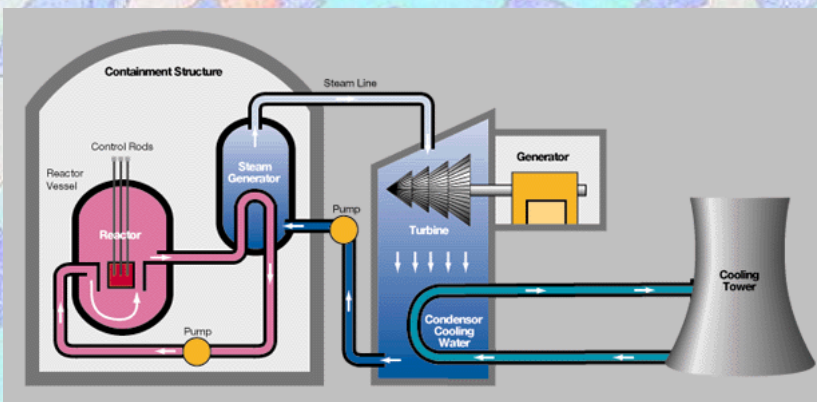
84

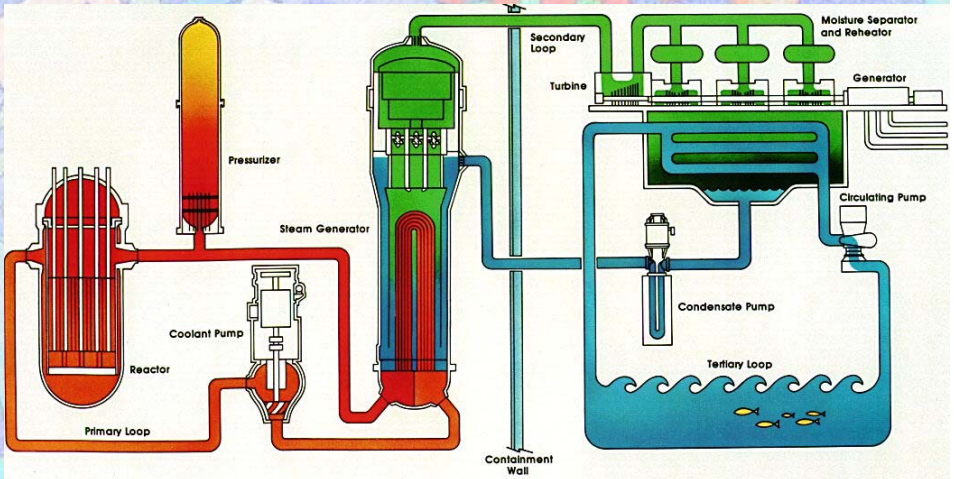
Major Accidents & Incidents


- 1986 accident at **Chernobyl** NPP (USSR now Ukraine) had widespread environmental & human health effects - Level 7
- 1957 accident at **Kyshtym** reprocessing plant (now in Russia) led to large off-site release. Emergency measures, including evacuation, taken to limit serious health effects. Based on off-site impact classified Level 6
- 1957 accident in a graphite reactor at **Windscale** (Sellafield UK) involved external releases. Based on off-site impact Level 5
- 1979 accident at **TMI** (USA) resulted in a severe damaged core. Off-site releases very limited; Level 5 on on-site impact
- 1973 accident at **Windscale** reprocessing plant (UK)† involved release of radioactive material into a plant area. Level 4 on on-site impact
- 1980 accident at **Saint-Laurent** NPP (F) resulted in partial core damage, but there was no external releases. Level 4 on the on-site impact
- 1983 accident at Buenos Aires **RA-2** critical assembly, power excursion due to non-observance of safety rules, resulted in operator death. Level 4 on on-site impact
- 1989 incident at **Vandellos** NPP (E) no external releases nor core damage or contamination on site. However, damage to safety systems due to fire degraded defence-in-depth. Level 3



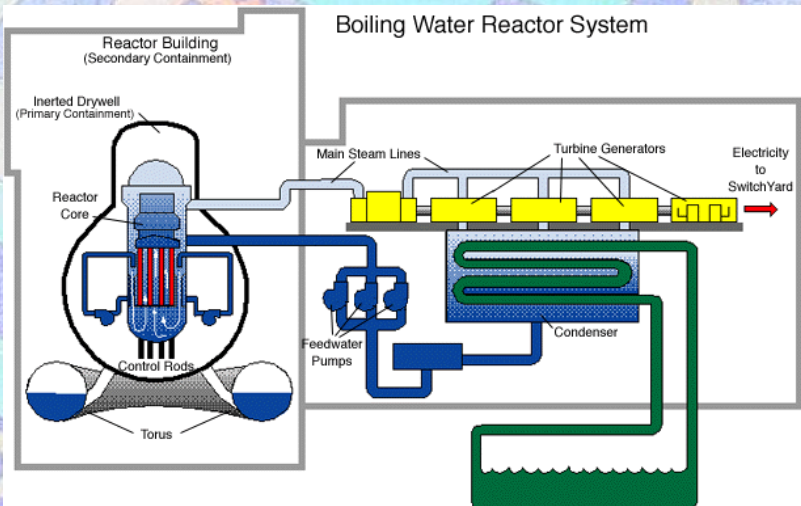
PWR cycle

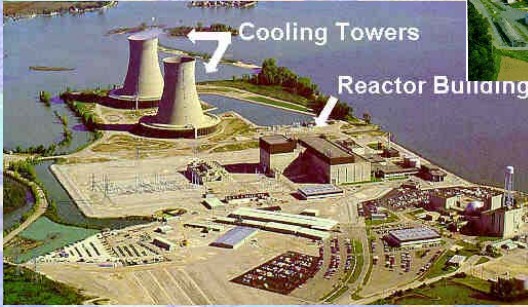




 Nuclear Steam Supply System
 MB 3618A

BWR cycle





main data (approx.)

■ PWR		■ BWR
1000 → 4000	Power (MWth)	2000 → 4000
300 → 1350	Power (MWe)	600 → 1350
155	Pressure (bar)	75
330	Tout (°C)	290
292	Tin (°C)	278
66.5	Turbine Press. (bar)	68
178 (max.413)	Linear Power (W/cm)	196 (max.440)
157	Fuel assembly	624
(17×17) 264	Fuel rod per assembly	(8×8) 62

PWR & BWR main components

- Core (fuel + control system)
- Vessel
- Main pump (*BWR: jet pump*)

+ *PWR only*

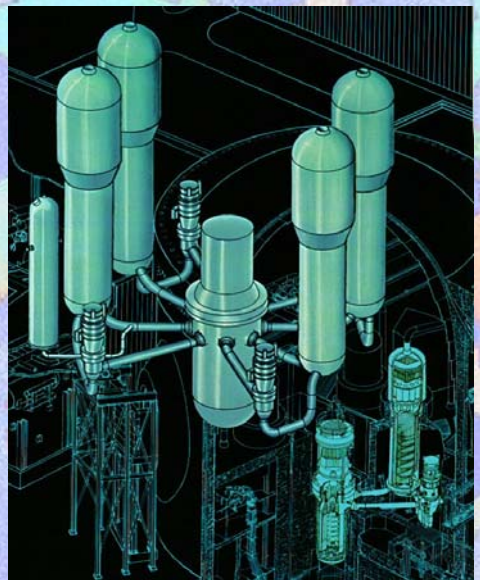
- Steam generator
- Pressuriser

91

Primary Loop

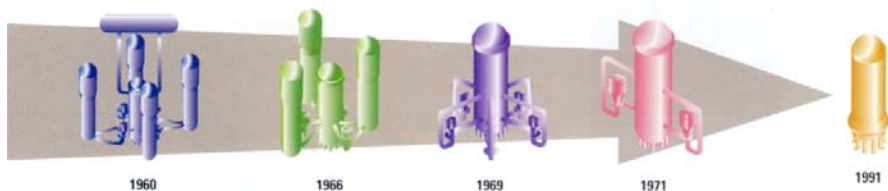
It contains:

- Reactor Vessel
- Steam Generator
- Pressurizer
- Coolant Pump



**CENTRALE NUCLEARE ENEL
DI CAORSO
SPACCATO DEL CONTENITORE
A PRESSIONE DEL NOCCIOLO**

- 1 SISTEMA DI SFIATO E DI SPRUZZAMENTO (DELLA) TESTATA
- 2 MANIGLIA (DI) SOLLEVAMENTO (DEGLI) ESSICCATORI DI VAPORE
- 3 ESSICCATORI DI VAPORE
- 4 USCITA (DELI) VAPORE
- 5 ENTRATA (DELL') ACQUA (DI) SPRUZZAMENTO (DEL) NOCCIOLO
- 6 SEPARATORI DI UMIDITA'
- 7 ENTRATA (DELL') ACQUA (DI) ALIMENTO
- 8 DISTRIBUTORE (DELL') ACQUA (DI) ALIMENTO
- 9 ENTRATA (DELL') ACQUA (DI) RAFFREDDAMENTO (DI) EMERGENZA DEL NOCCIOLO A BASSA PRESSIONE
- 10 TUBAZIONE (DELL') ACQUA (DI) SPRUZZAMENTO DEL NOCCIOLO
- 11 DISTRIBUTORE (DELL') ACQUA (DI) SPRUZZAMENTO DEL NOCCIOLO
- 12 PIASTRA ANULARE SUPERIORE DI SUPPORTO
- 13 INIETTORI IDRAULICI
- 14 MANTELO DEL NOCCIOLO
- 15 ELEMENTI DI COMBUSTIBILE
- 16 BARRA DI CONTROLLO
- 17 PIASTRA ANULARE INFERIORE DI SUPPORTO
- 18 ENTRATA (DELL') ACQUA DI RICIRCOLAZIONE
- 19 USCITA (DELL') ACQUA DI RICIRCOLAZIONE
- 20 SUPPORTO (DEL) RECIPIENTE A PRESSIONE
- 21 SCHERMATURA BIOLOGICA
- 22 MECCANISMI (DI) COMANDO (DELLE) BARRE DI CONTROLLO
- 23 TUBAZIONI IDRAULICHE (DI) COMANDO (DELLE) BARRE DI CONTROLLO
- 24 MISURATORI DI FLUSSO NEL NOCCIOLO



While indirect cycle designs remain similar to early submarine reactors, GE's BWR technology has benefitted from nearly a half-century of continuous evolution, simplification and improvement, culminating with the ABWR.



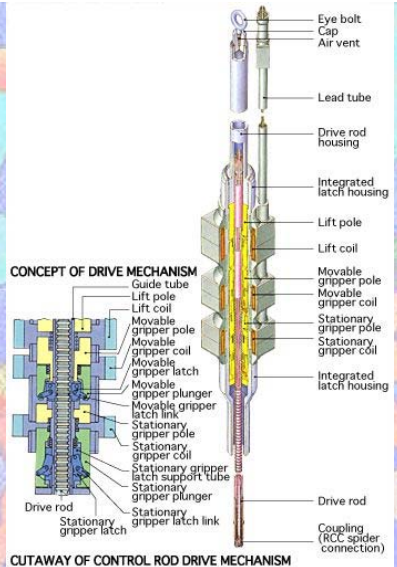
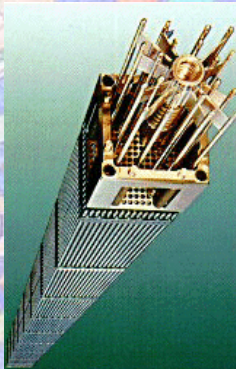
control rods

PWR		BWR
"Spider" (eccez.:Trino)	<i>Tipologia</i>	cruciformi
alto	<i>Ingresso</i>	basso
Gravità + motore passo passo + magneti	<i>Movimentazione</i>	Idraulica + elettrica + magneti
tipicam.(per 17x17) 24 barrette Ag-In-Cd in SS	<i>Materiale</i>	Carburo di Boro in SS
Veleni solubili (acido borico) + veleni bruciabili in fuel (Boro, Erblio, Ittrio,...)	<i>Altri mezzi controllo reattività</i>	NO solubili, veleni bruciabili in fuel (Gadolino)

97

Control Rods

Control rods are used to control reactor power by absorbing neutrons that would otherwise fission and create more power

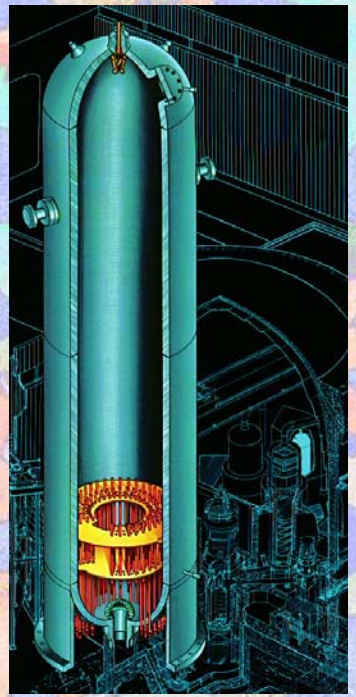


- Control rods are made of boron steel, cadmium or hafnium. They are in the shape of cylinders, sheets or cruciform blades
- There are anywhere from 29 to 100+ rods per core

98

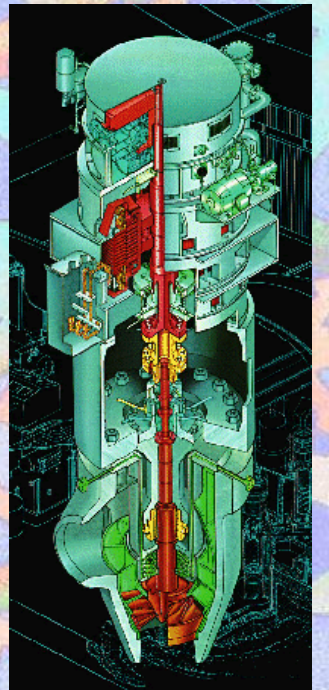
Pressurizer

- In the PWR, pressure must be maintained fairly constant. For that purpose is the pressurizer
- There is just one pressurizer in the system
- It contains a tube full of water and steam with a spray nozzle
- When there is too much pressure, it responds by spraying cool water on the steam to condense some of it to reduce pressure
- When there is not enough pressure, a heater activates and heats up the water
- Power Operated Relief Valve (PORV)



Coolant Pump

- In order to cool the reactor and circulate water for electricity production, there is a need for coolant pumps
- The standard PWR has one coolant pump per loop, meaning four per system

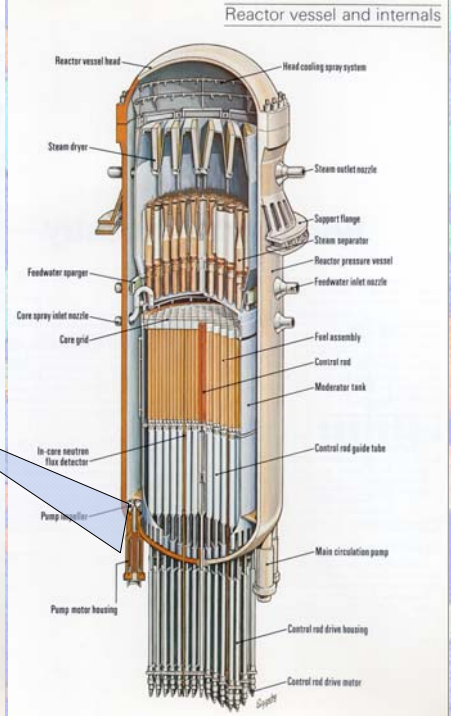
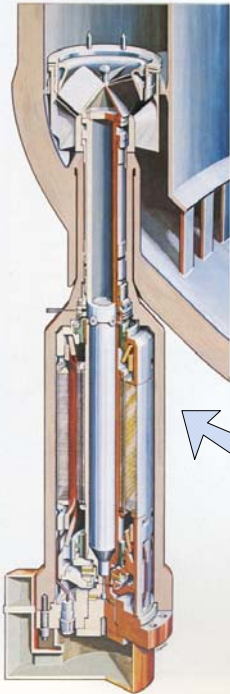


PWR centrifugal pumps



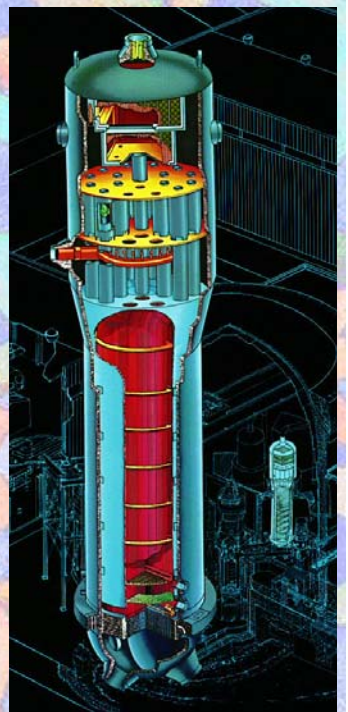
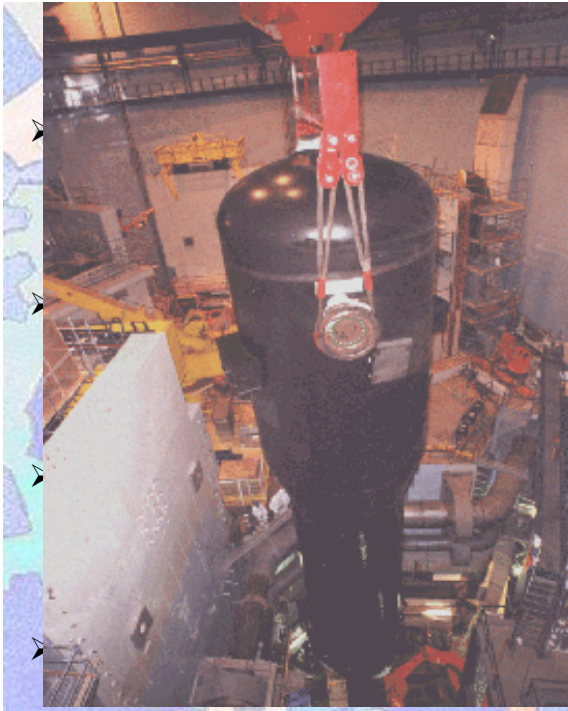
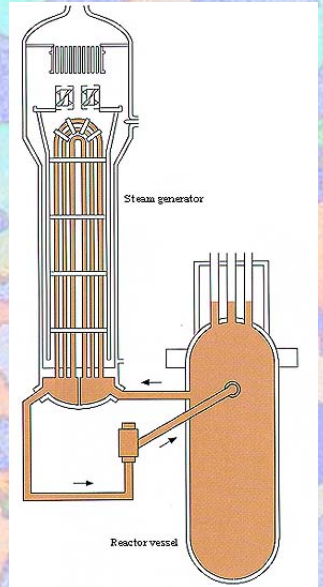
Assembly of a reactor coolant pump (Photograph by courtesy of Klein, Schanzlin und Becker)

BWR internal pumps



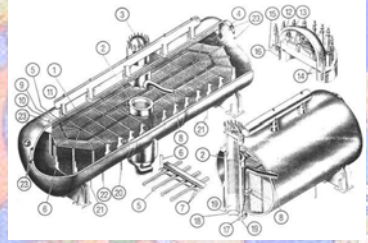
Primary Coolant Systems SGs

- ✓ **Three Types:**
 - Once-through
 - Horizontal U-tube
 - Vertical U-Tube
- ✓ **~3000 Tubes**
- ✓ **~80°C heat transfer**
- ✓ **Steam collected and dried at the top**

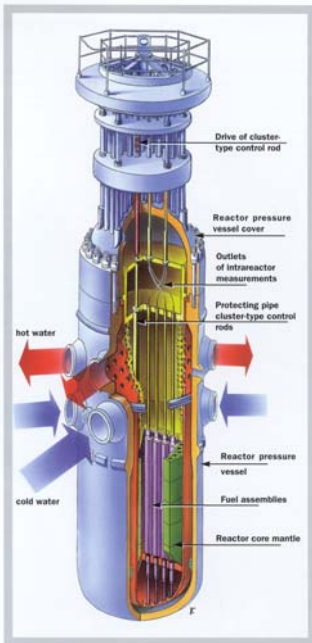


o
d
t
s

Steam Generators



Reactor



VVER (RUS, FIN)

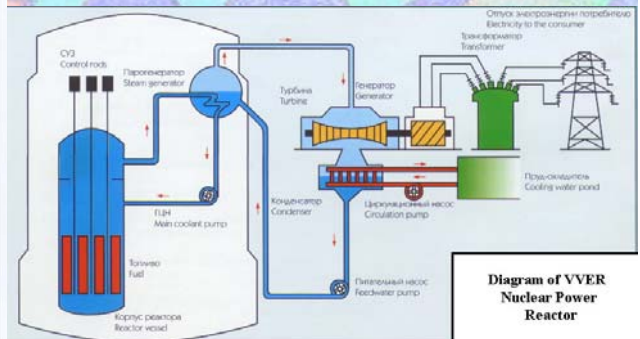
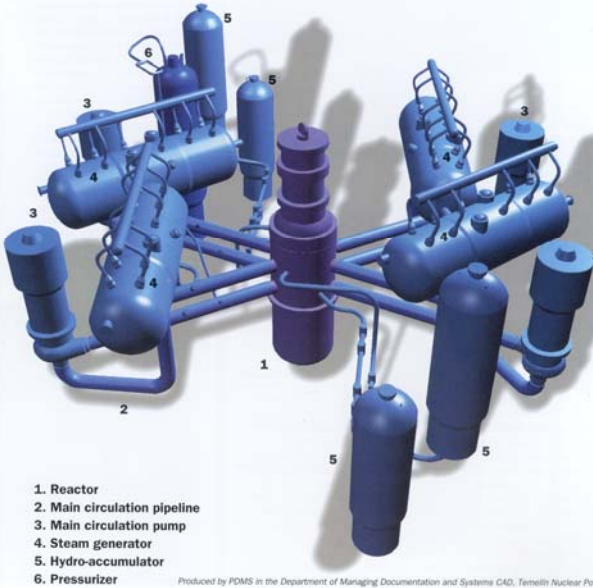


Diagram of VVER Nuclear Power Reactor

Spatial arrangement of the primary circuit



1. Reactor
2. Main circulation pipeline
3. Main circulation pump
4. Steam generator
5. Hydro-accumulator
6. Pressurizer

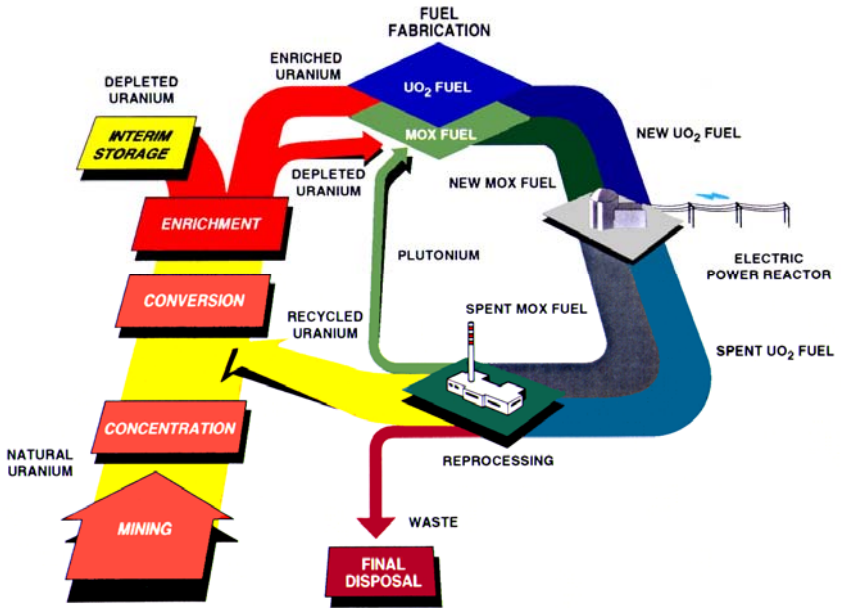
Produced by PDMS in the Department of Managing Documentation and Systems CAD, Terni Nuclear Power Plant

le scorie radioattive

- L'energia nucleare, in condizioni di funzionamento normale, ha un impatto ambientale molto minore delle centrali a combustibile fossile e non produce né anidride carbonica né ceneri
- Il problema è che si ha produzione di scorie nucleari: prodotti di fissione (cesio, stronzio, iodio, ...) e attinidi
- Sono stati proposti alcuni tipi di trattamento, dal bruciamento nel "Rubbiatrone" alla vetrificazione
- Al momento, comunque, l'unico modo di gestire le scorie è disporle in contenitori adeguatamente schermati, in posti geologicamente stabili e adeguatamente monitorati
- È esattamente quello che si fa con i rifiuti chimicamente tossici (anzi per i rifiuti nucleari c'è un'attenzione molto maggiore e una produzione molto minore)
- Per esempio, il sito di Cadarache, in Provenza, dove si trovano alcuni reattori funzionanti ed un deposito di scorie, causa un'esposizione alla popolazione di $7 \mu\text{Sv}/\text{anno}$ (contro circa $1 \text{ mSv}/\text{anno}$ di fondo naturale)

sono cmq ancora il vero problema dell'energia nucleare.

THE NUCLEAR FUEL CYCLE



2/10/0003

l'incidente di Three Miles Island

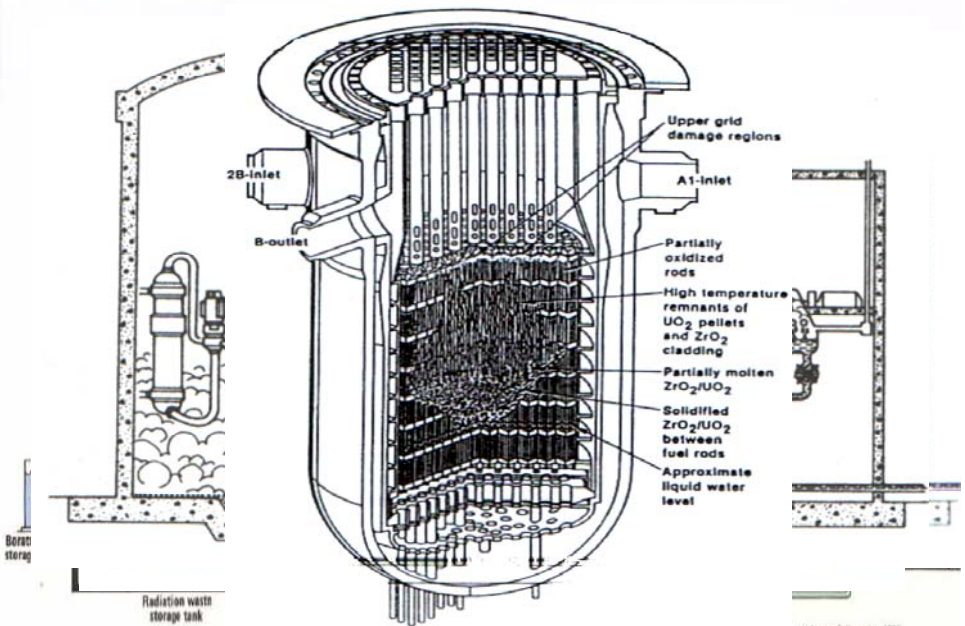
- Centrale USA dotata di 2 reattori PWR
- Il 27 marzo 1979, nell'unità 2, per la mancata chiusura di una valvola di rilascio PORV, l'acqua di raffreddamento iniziò ad uscire dal circuito primario, pressurizzando l'edificio di contenimento
- **Errore iniziale nell'interpretazione dello stato della PORV**
- I sistemi automatici di sicurezza spensero il reattore e gli altri sistemi di emergenza intervennero correttamente MA
- **Gli operatori fermarono il sistema High Pressure Injection (HPI):**
 - sistema entrato correttamente in funzione
 - fermato per alto livello nel pressurizzatore (non comprensione del transitorio – errori nell'addestramento)
 - Conseguenza: perdita di refrigerante non reintegrata
- Depressurizzazione del RCS, diminuzione di livello di refrigerante nel nocciolo, danneggiamento (fusione) di parte del nocciolo
- Il sistema di contenimento evitò grossi rilasci e solo una piccola parte dei gas radioattivi venne dispersa nell'ambiente esterno
- Decretata un'emergenza locale e la zona vicina fu evacuata (circa 140,000 persone coinvolte ma nessuno subì danni da radiazioni)
- L'incidente colpì profondamente l'opinione pubblica (documentato nel film "Sindrome cinese" e nel concerto "No Nukes") portando a una rivisitazione dei piani energetici ed a uno stop al nucleare americano¹⁰

Accident description

- 0s both main feedwater pumps trip
- 3s PORV opens
- 8s Reactor trips due to high pressure
- 13s P decreases but the PORV does not close
- 14s AFW pumps ready (valves close)
- 2m HPI automatically start
- 2-3m Primary tank relief opens / PRZ level increases
- 3-5m SGs voided / HPI limited
- 7m Start-up sump pumps
- 8m AFW valves are open
- 74/100m All pumps are stopped
- 142m PORV is closed
- 174m Declaration of site emergency

111

plant & accident description



possibili conclusioni da TMI-2

- Il sistema di contenimento ha giocato un ruolo fondamentale nella prevenzione delle conseguenze dell'incidente
- **Ultima barriera per i rilasci esterni quando le altre 2 (guaina e RCS) erano compromesse**
- Modestissimi rilasci esterni (10 μ Sv/uomo)
- L'impianto aveva risposto correttamente
- **Insegnamenti notevoli, soprattutto in materia di formazione del personale** (cioè preparazione a fronteggiare situazioni nuove e impreviste) e in materia di **analisi di sequenze di piccoli malfunzionamenti in catena singolarmente poco rilevanti**
- Si capì inoltre che le informazioni inerenti la sicurezza dovevano circolare in maniera più efficace ed essere disponibili (una situazione analoga era già successa due anni prima in un altro impianto senza conseguenze poiché stava funzionando a basso carico)
- Esercenti impianti nucleari in USA sono società private

113

sommario

- **Gli inizi** (*dalla fine XIX secolo alla fine II Guerra Mondiale*)
 - La scoperta della radioattività
 - La fissione nucleare e la "pila atomica" (prima reazione a catena controllata)
 - L'impiego militare dell'energia nucleare
- **L'energia nucleare a scopi civili**
(*dalla II Guerra Mondiale al crollo del muro passando dalla guerra fredda*)
 - Le centrali nucleari: come funzionano?
 - Occidente vs. ex-URSS
 - TMI-2 (USA) (1979)
- **L'incidente di Chernobyl (1986)**
 - Cosa è accaduto prima e dopo il disastro?
 - Perché non potrebbe succedere in una centrale "occidentale"
- **Il futuro non è lontano: Generations III, III+ e IV**
 - La fusione?

114



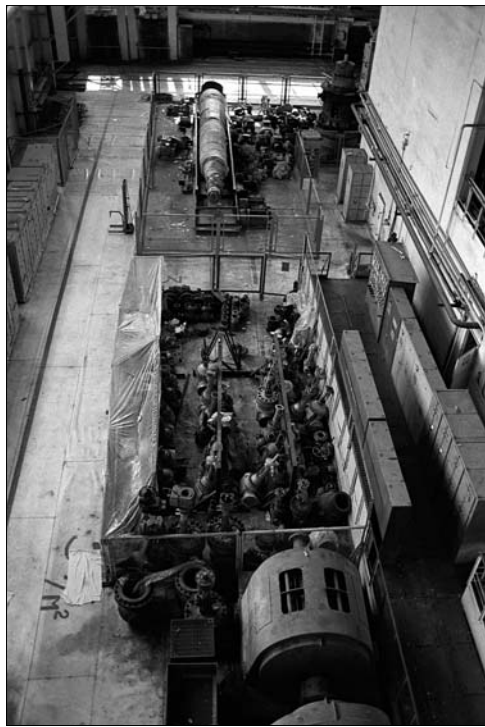




119







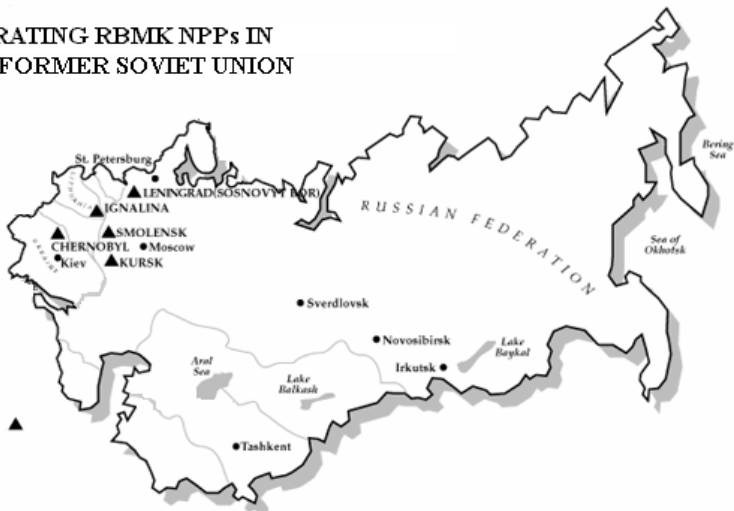
la centrale di Chernobyl

- 4 unità da 1000 MWe: il n.3 e 4 appartenevano all'associazione di RBMK (high power)

OPERATING RBMK NPPs IN THE FORMER SOVIET UNION

- RE
- so
- im
- sc
- Il r
- fil
- RE
- po
- de
- de
- po
- 19
- 4
- VI
- La
- gr
- Nt

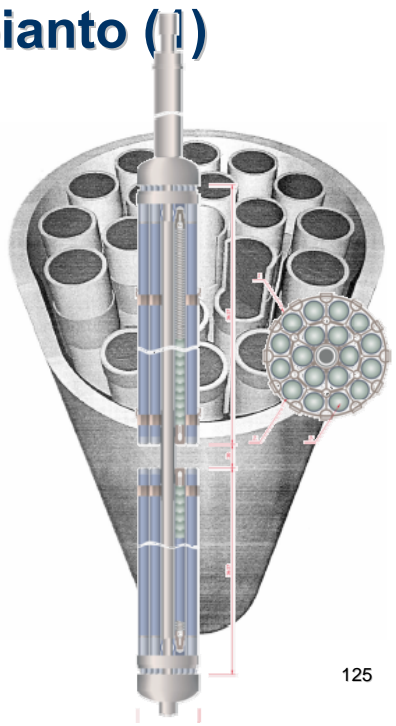
RBMK ▲



Finlandia) basato sui VVER: non vi sono RBMK al di fuori dell'ex-URSS

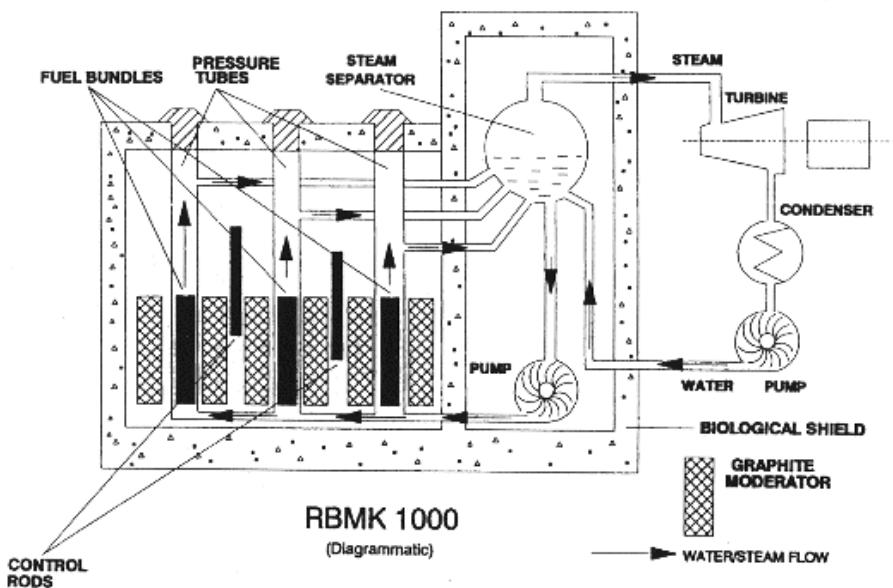
schema impianto (1)

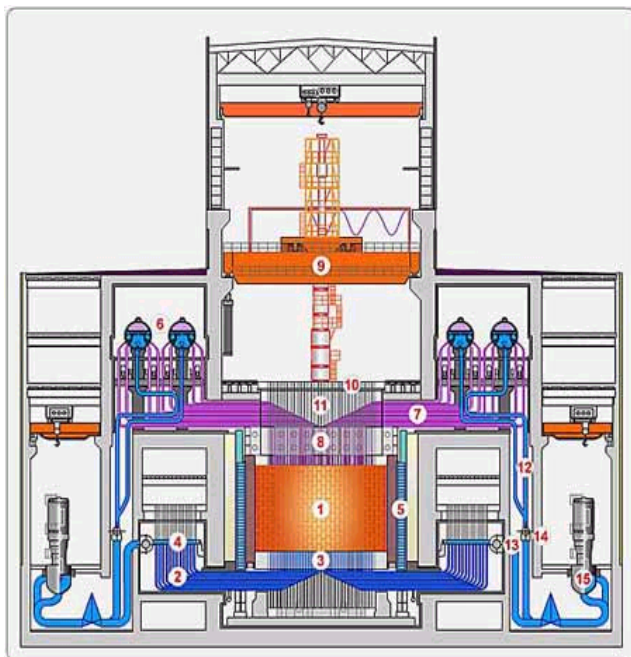
- Nocciolo costituito da 1600 canali contenenti ciascuno 2 elementi a 18 barre di U, debolmente arricchito 2%
- Nei canali scorre acqua leggerabollente
- Tubi di refrigerazione immersi in un gigantesco cilindro di grafite (7 m di altezza, 12 m di diametro)
- moderatore (grafite) diverso dal refrigerante (acqua bollente)
- **privo di contenimento (facilitare produzione Pu)**



125

schema impianto (2)





- 1-Core
- 2-Water pipe
- 3-Bottom plate
- 4-Distrib. Header
- 5-Shield
- 6-Steam Drum
- 7-Steam Water Pipe
- 8-Reactor top plate
- 9-Refuel machine
- 10-Reactor lid struct.
- 11-Reactor channel
- 12-Downcomers
- 13-Pressure Header
- 14-Suction header
- 15-Main Pump

127

deficienze di progetto

- Comportamento intrinsecamente instabile dovuto al **coefficiente positivo di vuoto** che prevale a basse potenze: maggior fattore che influirà sull'incidente
- Carezza del sistema di contenimento vs. efficacia in TMI-2
 - Inadeguatezza delle barre di controllo:
 - Rappresenta il comportamento del reattore rispetto alla formazione di
- Contenimento principale è costituito da un liner metallico inertizzato con azoto per impedire alla grafite di entrare in contatto con l'ossigeno
- Contenitore esterno in calcestruzzo
- Molti macchinari sospesi alla copertura, incluse condutture acqua di refrigerazione
- Dopo TMI le condutture inferiori furono inserite in una vasca di acqua
- La scelta del ricambio continuo del combustibile (senza spegnere il reattore) per la produzione di Pu, richiede l'inserimento di una gru opportuna: gli impianti risultano molto alti (oltre 70 m) rendendo difficoltosa la realizzazione di un contenimento che includa le condutture superiori
- Nell'incidente quando la pressione divenne eccessiva, a causa dell'enorme aumento di potenza, tutte queste condutture si lesionarono rilasciando all'esterno il contenuto

l'incidente (25 aprile 1986)

- Il reattore doveva essere fermato per manutenzione e si volle sfruttare questo fermo per una prova tecnica già condotta su altri RBMK con esito negativo
- **nel caso si fosse avuta un'interruzione nella potenza elettrica esterna, l'inerzia del gruppo turbo-alternatore sarebbe stata sufficiente per generare la potenza elettrica necessaria per i dispositivi di emergenza fino all'entrata in funzione dei generatori diesel ausiliari**
- Per realizzare il test si dovettero escludere i sistemi sia di spegnimento automatico che di raffreddamento di emergenza, per portare il reattore a un regime di funzionamento instabile
- **"Gli operatori del reattore provocarono l'incidente, non con errori umani ma con atti penalmente rilevanti, vi tuttavia i progettisti dei reattori RBMK sono i veri responsabili del disastro di Chernobyl"**
- **violazione continua, deliberata e prolungata delle norme di sicurezza**

129

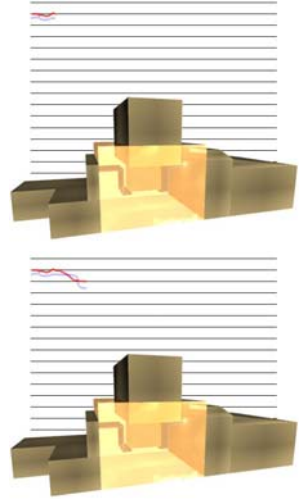
Stato del reattore

- Al momento del test circa il 75% degli elementi di combustibile avevano un alto tasso di bruciamento e quindi risultavano molto **avvelenati** dai prodotti di fissione radioattivi
- In situazioni di riduzione della potenza vi è un problema di avvelenamento da Xe^{135} (che tende a bassa potenza tende ad impedire l'aumento di potenza del reattore per svariate ore prima di decadere)
- **il momento scelto il test fu errato**

130

L'incidente (1)

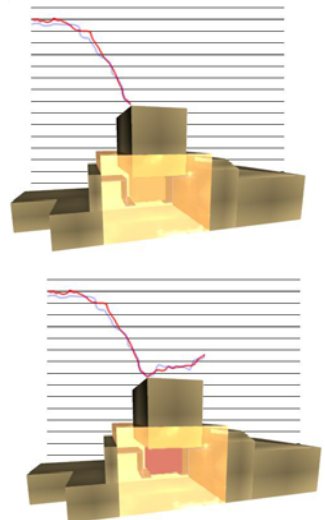
- Circa un'ora prima del test vengono **esclusi alcuni sistemi di raffreddamento di emergenza** del nocciolo
- Intorno alle ore 23 del 25 aprile il controllore della rete acconsente ad una riduzione di potenza (già il reattore operava al 50% -). La potenza richiesta per il test è di 1000 MWth (limite di sicurezza sul coefficiente di vuoto)



131

L'incidente (2)

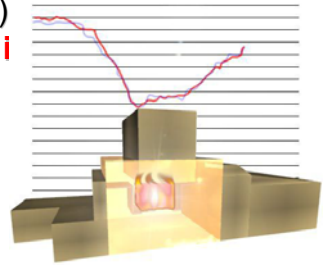
- Per vari problemi (principalmente la **cattiva taratura degli strumenti**) la potenza precipita a 30 MW, dove l'instabilità diventa dominante. Gli operatori pensano di poter innalzare la potenza ai 1000 MWth **escludendo i controlli automatici delle barre di controllo e passando ad operazioni manuali**
- Solo verso l'una del 26 aprile si riesce a stabilizzare il reattore a circa 200 MW ma non si riesce ad aumentare questa potenza a seguito dello Xe
- Potenza insufficiente per il test e fuori dai limiti operazionali
- Benché una direttiva richiedesse un minimo di 30 barre di controllo inserite per garantire la sicurezza, per realizzare il test **si alzano quasi tutte le barre di controllo (solo 7 inserite)**
- In caso di un innalzamento di potenza, sarebbero occorsi circa 20 s per spegnere il reattore
- Nonostante ciò si decide di continuare il test



132

L'incidente (3)

- Gli operatori collegano la pompa principale al gruppo tubo-alternatore (01:07): eccesso di acqua, collasso dei vuoti, caduta della pressione del vapore nel nocciolo e nuova riduzione della potenza
- Le protezioni automatiche che dovrebbe spegnere il reattore quando scende la pressione risultano escluse
- Il reattore diviene instabile e gli operatori tentano aggiustamenti ogni 5 s cercando (senza riuscirvi adeguatamente) di mantenere costante la potenza, anche rimuovendo le barre di controllo manuali
- Si è nelle condizioni di fare il test (1:22:30)
- **Ogni procedura di esercizio indica che i essere spento immediatamente**
- Inizia il test



L'incidente (4)

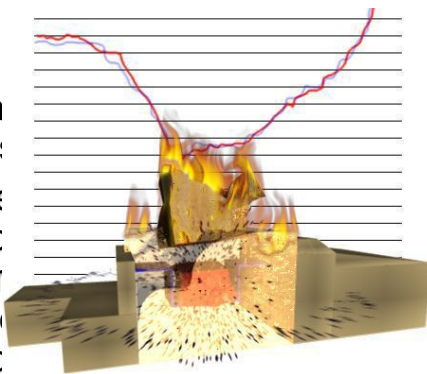
- 01:23:04 vengono chiuse le valvole regolatrici del turbogeneratore, scollegando la turbina
- La produzione di elettricità si abbassa e non è in grado di mantenere in funzione la pompa del refrigerante
- Il vapore si ferma all'interno del nocciolo e forma rapidamente delle bolle
- **La potenza del reattore comincia a crescere (coefficiente positivo di vuoti!)**
- Le bolle di vapore non refrigerano adeguatamente gli elementi di combustibile che iniziano a surriscaldarsi
- I vuoti aumentano e con essi **cresce la temperatura del nocciolo** e la pressione del vapore
- Aumenta l'instabilità del reattore e la produzione di vapore nei canali di refrigerazione

L'incidente (5)

- Quando la potenza inizia ad aumentare visibilmente, gli operatori si rendono conto che è iniziata l'emergenza e azionano lo spegnimento rapido
- **01:23:40 solo 36 s dall'inizio della prova ... Ma è già troppo tardi**
- Tutte le barre di controllo sono state alzate
- la lentezza nell'inserzione avrebbe potuto abbassare la potenza di 5% / s. Non è sufficiente!
- **in 7 s la potenza arriva a 10 volte la nominale** e gli operatori non sono in grado di prevenire questo enorme aumento

135

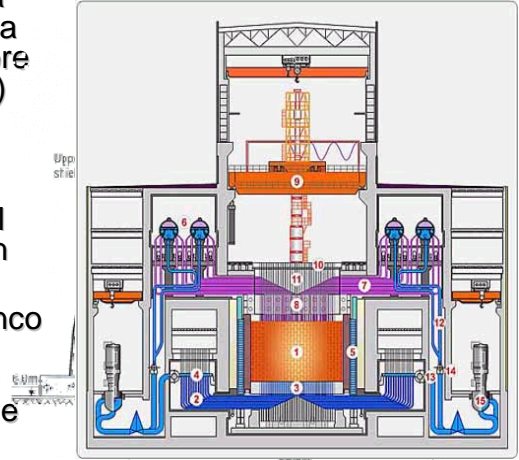
- Le barre in che si era : tà strada, dopo
- L'operatore servomecc cadere per pressione distrutto i c ttrica al arre possono La forte ra avevano o le barre
- **1:23:47, solo 7 s dopo l'inizio dell'emergenza** si verificarono in successione 2 esplosioni, di vapore e di idrogeno, che scoperchiarono il nocciolo e demolirono l'edificio reattore
- Frammenti di combustibile ad alta temperatura, reagendo con l'acqua, provocano la prima esplosione di vapore



136

L'incidente (7)

- La sequenza degli eventi termina con la divergenza della potenza a valori circa 100 volte superiori al valore nominale (320.000 MWth)
- La prima esplosione danneggiò il tetto e fece sollevare il coperchio monoblocco di acciaio del nocciolo, di circa 2000 ton
- Nel ricadere questo coperchio si adagiò di fianco incastrandosi tra le opere murarie e nei suoi spostamenti strappò cavi e tubature provocando svariati danni a catena
- Inizia l'incendio della grafite



137

L'inc

- Passano solo 2 o 3 secondi e la reazione è molto più violenta, causa reazione ad alta temperatura
- Circa il 25% dei blocchi di grafite fiamme, insieme a frammenti di parti del nocciolo e delle tubature estendono l'incendio al tetto
- Le spaccature nel tetto provocano l'estensione ulteriore dell'incendio
- Il pennacchio di fumi, si alza per oltre un km sopra il tetto
- I componenti pesanti di questi fumi ricadono più o meno nelle vicinanze, ma i gas, iniziano la loro marcia per l'Europa iniziando dal Nord-Est della centrale, spinti dai venti prevalenti

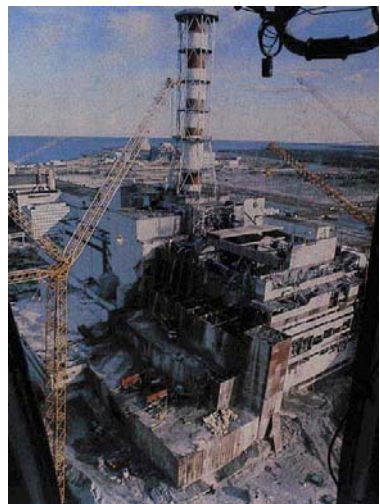


138

L'incidente (9)

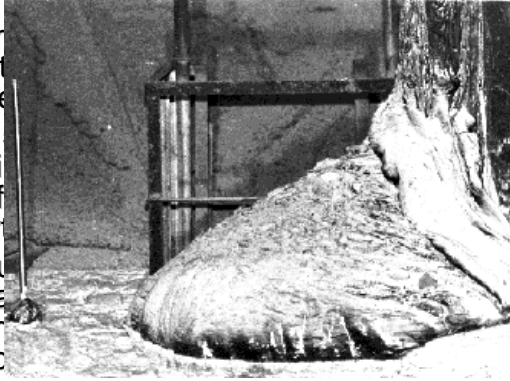
- Intervenire su un incendio simile era un problema quasi insormontabile per gli operatori di emergenza e le modalità standard di intervento rischiavano di stabilire nuove condizioni di criticità nella massa fusa combustibile - grafite
- Per spegnere l'incendio furono sacrificate molte vite tra i vigili del fuoco che lavorarono in condizioni di esposizione a massicce dosi di radiazioni: oltre ai 3 operatori morti immediatamente a seguito dell'esplosione, 28 vigili del fuoco morirono per irradiazione acuta entro tre mesi e 19 nei 20 anni successivi (**ONU Chernobyl Forum**)
- L'incendio fu contenuto tramite l'impiego di elicotteri che scaricarono all'interno dell'edificio, attraverso il tetto, 5000 ton di Carburo di Boro, piombo, sabbia e argilla
- Il nocciolo semidistrutto finì però con l'essere ricoperto da uno strato termicamente isolante e la temperatura cominciò a salire determinando un nuovo brusco aumento dei rilasci

Dopo il disastro (1)



L'incidente (10)

- Il 6 maggio si ebbe il cedimento strutturale dello schermo inferiore del nocciolo, che contribuì inaspettatamente a determinare una drastica riduzione delle emissioni
- Parte della massa lavica rifluì nelle piscine di soppressione poste sotto il reattore, la migliore condizione possibile di confinamento
- Il 9 maggio si iniziò la realizzazione di un nuovo schermo di raffreddamento sotto il reattore, la realizzazione di un nuovo schermo di raffreddamento
- Ci vollero 18 mesi per realizzare una barriera al fallout, la realizzazione di un nuovo schermo di raffreddamento
- A questo punto si iniziò l'operazione più importante (il confinamento definitivo), realizzata in tempi record



141

Dopo il disastro (2)

- Il nucleo è ancora attivo
- Bisognava quindi schermarlo per evitare anche che la pioggia entrasse in contatto con esso perché potrebbe causare altre esplosioni
- Si decise di rinchiudere tutto in un sarcofago di cemento armato all'interno del quale vennero rinchiuse anche i frammenti scagliati dalle esplosioni (decine di migliaia di soldati dell'Armata Rossa vennero impiegati per questo)
- Il sarcofago fu definitivamente sigillato alla fine del 1986



142

Dopo il disastro (3)

- Rimase da stabilire che fine avesse fatto il nucleo
- Vennero utilizzati robot e fatte delle trivellazioni per avere accesso nel cemento armato (con spessore anche 3 m)
- Nell'estate del 1988 si scopre che il nucleo è sprofondato per 4 m nel sottosuolo
- In questo suo procedere si è mescolato con la sabbia delle strutture formando uno strano ammasso che lo ha raffreddato e ha fermato la reazione



143

La notizia

- In Italia la notizia arriva il 28 aprile (2 giorni dopo l'incidente)
- Alle 17:58 l'ANSA dirama per la prima volta la notizia che in una centrale vicino Stoccolma sono stati rilevati alti livelli di radioattività e vengono evacuate 600 persone nella centrale. Poco dopo si capisce che le forti anomalie non provengono dalla loro centrale
- Il responsabile dell'Istituto nazionale di ricerca per la difesa dichiarò alla radio svedese: *"Crediamo che provenga dall'Unione Sovietica, forse da una centrale nucleare"*
- Quasi subito l'ente sovietico per l'energia atomica fa sapere all'Ambasciata di Svezia a Mosca che non aveva notizia *"di incidenti in centrali nucleari sovietiche"*
- La sera stessa però l'agenzia di stampa sovietica Tass diffonde un comunicato in cui per la prima volta si ammetteva l'incidente: *"Il danneggiamento di un reattore ha provocato oggi un incidente nella centrale nucleare di Chernobyl, nella regione di Kiev, in Ukraina. Si sta dando aiuto a coloro che sono stati colpiti"*.

144

Conseguenze (1)

- Quanta radioattività fu espulsa? La radioattività presente al momento dell'incidente era circa 10^{20} Bq. La totalità di gas radioattivi e il 4% circa della massa del combustibile, circa 6 ton di frammenti e polveri, furono espulsi dall'edificio. Complessivamente il rilascio è stato di circa 10^{19} Bq
- La totalità dei frammenti pesanti ricadde subito nei pressi dell'edificio. In alta atmosfera, spinti dal gradiente termico dell'incendio, finirono gas, vapori e il pulviscolo più leggero
- Entro 100 km, specie in Bielorussia, si depositò la maggior parte del particolato per precipitazione. Il pulviscolo microscopico sospeso in precipiterà nei giorni successivi per dilavamento nelle varie regioni interessate, con modalità dipendenti dai valori delle precipitazioni locali
- area più contaminata raggio 30 km (zona evacuata, circa 120.000 persone)
- 10.500 km² contaminati da Cs-137 in quantità superiori a 555 kBq/m² (Bielorussia, Federazione Russa e Ucraina) e circa 250.000 persone
- 28.000 km² contaminati da Cs137 in quantità superiori a 185 kBq/m² e circa 850.000 persone
- Questi valori, nei casi più gravi, significano un superamento di circa 400 volte delle soglie di attenzione per contaminazioni superficiali accettate in ambienti di lavoro, certamente elevati e probabilmente significativi per effetti sanitari tardivi ma comunque di gran lunga inferiori alle soglie per effetti di irradiazione acuta

Conseguenze (2)

- All'esterno dell'URSS la nube radioattiva, svuotata di polveri ma non di gas, interessò fino al 30 aprile Polonia, Svezia, Olanda, Belgio e Gran Bretagna
- Dopo tale data il vento cambiò direzione e furono investiti i Balcani e il Mediterraneo Settentrionale, quindi anche l'Italia
- Gli effetti saranno misurabili su tutto l'emisfero settentrionale nei mesi successivi e l'entità delle deposizioni al suolo dipese in ciascun paese dalla distanza dall'impianto, dall'orografia e dalle condizioni atmosferiche
- La nube depositò in URSS il particolato più pesante contenente attinidi e frammenti di fissione
- In Europa predominarono I-131, Te e Cs-137/134
- Le deposizioni più rilevanti interessarono la Scandinavia, l'Austria, la Svizzera meridionale e orientale e parte della Germania meridionale, dove il passaggio della nube coincise con abbondanti piogge
- In altri paesi (Francia, Spagna e Portogallo) gli effetti furono di gran lunga minori
- L'Italia fu interessata da deposizioni molto contenute e furono colpite quasi esclusivamente le regioni del Nord nel periodo dal 3 al 7 maggio
- I rapporti dal 1 maggio dell'ENEA parlavano di campi di radiazioni circa doppi rispetto al valore del fondo naturale e comunque non preoccupanti dal punto di vista sanitario

Conseguenze (3)

- Il bilancio fornito dal Chernobyl Forum per le vittime sia a corto sia a lungo termine: 2 lavoratori morti immediatamente per le esplosioni iniziali; 28 morti nei mesi successivi dei 237 gravemente irradiati fra i 1000 lavoratori e pompieri che spensero l'incendio; 19 di questi ultimi che morirono fra il 1987 e il 2005; 9 morti fra i 4000 casi di tumore alla tiroide
- A questo totale di morti accertate come causate direttamente dal disastro, si devono aggiungere i 9000 morti presunti per tumori e leucemie che non sarà possibile registrare direttamente in osservazioni epidemiologiche ma che si aggiungeranno al numero normale di decessi per queste patologie
- È stato riscontrato che circa 4000 individui hanno sviluppato tumori alla tiroide direttamente attribuibili all'accumulo di I 131 radioattivo all'interno dell'organo. La fascia di popolazione più colpita fu la più giovane (0-14 anni), per la maggiore assunzione quotidiana di iodio, soprattutto attraverso il consumo di latte
- Fortunatamente le probabilità di guarigione da questo tipo di tumori è molto alta (fino al 99% per i casi legati a Chernobyl) e di conseguenza le vittime sono state relativamente poche, 15 secondo l'OMS. Gli altri guarirono, anche se sono ancora tenuti sotto controllo
- È da segnalare che in questo caso le reticenze/lentezze sovietiche nel lanciare l'allarme furono fatali. Sarebbe infatti bastato somministrare subito iodio non radioattivo alla popolazione, per evitare che quello radioattivo si accumulasse nella tiroide. L'emergenza sarebbe stata superata rapidamente poiché la radioattività dello I 131 dura molto poco (tempo di dimezzamento 8 giorni)

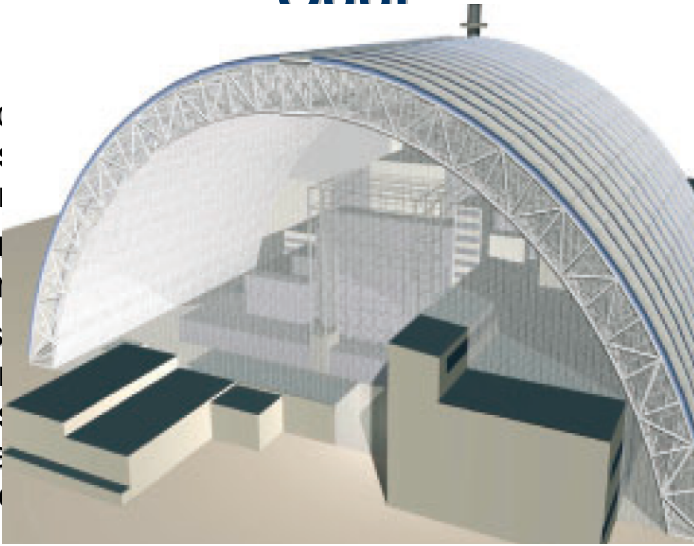
147

Conseguenze (4)

- Negli anni successivi all'incidente sia le istituzioni sovietiche, sia molte organizzazioni internazionali (tra cui l'OMS) hanno condotto un'azione di sorveglianza sanitaria sulla popolazione, 5-6 milioni di persone della regione a lungo raggio intorno Chernobyl irradiate da piccole dosi di radiazioni
- L'andamento epidemiologico, cioè statistico, di decessi dovuti a tumori e leucemie non ha mostrato variazioni di rilievo in confronto alla situazione precedente il disastro
- **Non è stato cioè possibile registrare variazioni chiaramente distinguibili da fluttuazioni casuali, dei decessi dovuti a queste patologie rispetto alla media considerata "normale" di incidenza, che è di circa il 25% di decessi nella popolazione umana**
- Tuttavia le conclusioni del Chernobyl Forum arrivano a stimare in 9000 decessi aggiuntivi per tumori e leucemie sull'arco degli 80 anni successivi al disastro, da sommarsi al 25% di quei 6 milioni della popolazione presa in esame, cioè 1,5 milioni di persone che comunque morirà per malattie oncologiche per cause non legate all'incidente
- Le 9000 vittime presunte rappresentano solo lo 0,6% del totale, percentuale troppo piccola su un arco di 80 anni per essere chiaramente osservabile, distinguibile statisticamente rispetto a fluttuazioni casuali
- Sempre secondo le Agenzie dell'ONU non ci sono state variazioni di rilievo nel numero di malformazioni alla nascita

148

- La
int
ba:
riei
- L'u
con
- Il s
ha
pe:
pre
op



ale
non
e il
n

Conclusioni

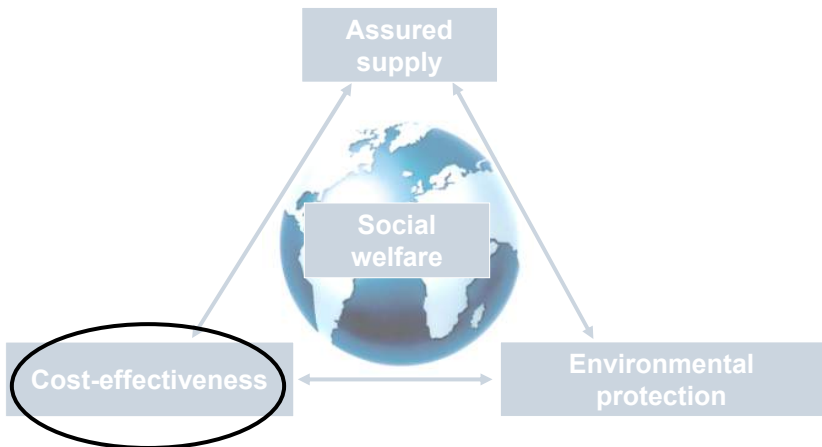
- La dinamica dell'incidente di Chernobyl ha portato a una rivisitazione della filosofia con cui vengono costruite le centrali. Visto che l'incidente è stato causato da un errore umano e dalla palese infrazione delle più elementari norme di sicurezza, la progettazione di nuove centrali si sta orientando verso impianti intrinsecamente sicuri rispetto alla componente umana.
- Oltre che nella concezione dell'impianto, molte delle responsabilità dell'incidente vanno comunque ravvisate sia nell'incompetenza del personale addetto (pochi degli operatori erano esperti in campo nucleare) che nella diffusissima tendenza ad ignorare le più elementari norme di sicurezza che dominava nell'ambiente nucleare sovietico (tanto per capirci, molte delle infrazioni alle procedure di sicurezza che venivano abitualmente perpetrate in reattori come quello di Chernobyl in Europa hanno rilevanza penale)

sommario

- **Gli inizi** (*dalla fine XIX secolo alla fine II Guerra Mondiale*)
 - La scoperta della radioattività
 - La fissione nucleare e la “pila atomica” (prima reazione a catena controllata)
 - L’impiego militare dell’energia nucleare
- **L’energia nucleare a scopi civili** (*dalla II Guerra Mondiale al crollo del muro passando dalla guerra fredda*)
 - Le centrali nucleari: come funzionano?
 - Occidente vs. ex-URSS
 - TMI-2 (USA) (1979)
- **L’incidente di Chernobyl (1986)**
 - Cosa è accaduto prima e dopo il disastro?
 - Perché non potrebbe succedere in una centrale “occidentale”
- **Il futuro non è lontano: Generations III, III+ e IV**
 - **La fusione?**

151

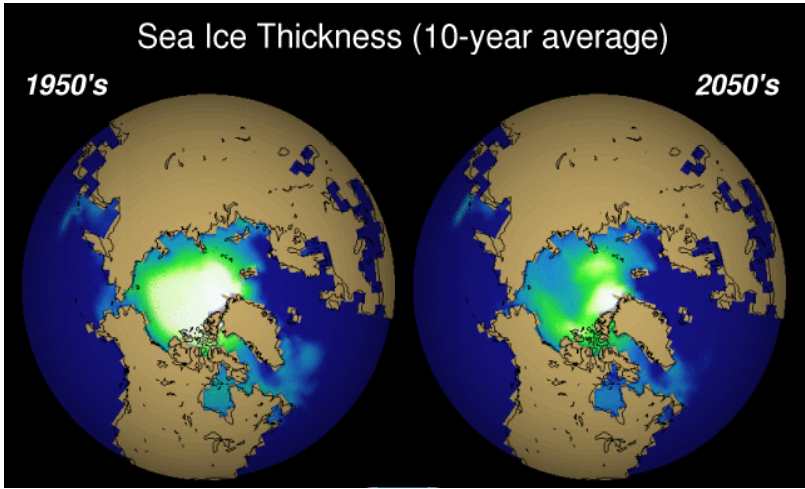
Triangolo Energetico



152

A Global Crisis: Climate Change

Can nuclear energy help ?



Source: Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Princeton University

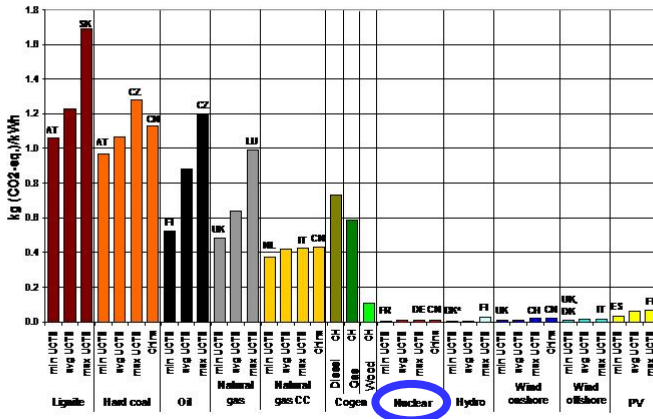
153



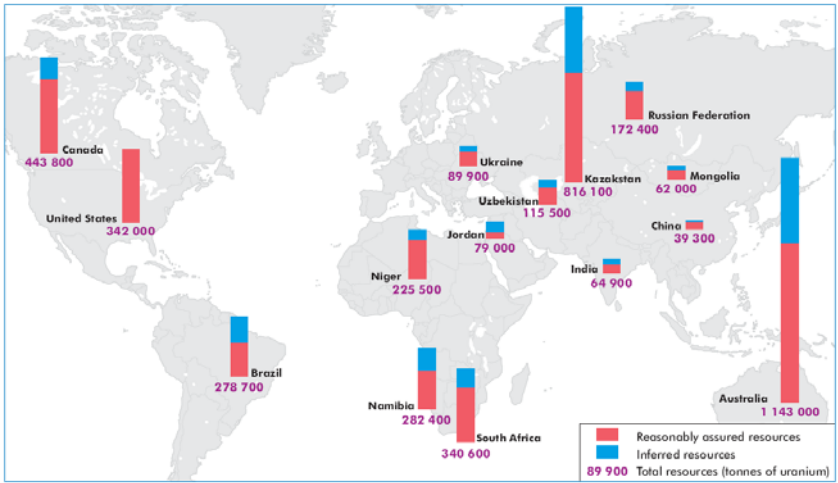
Agence pour l'énergie nucléaire
Nuclear Energy Agency



Figure 3.1 – Greenhouse gas emissions of selected energy chains



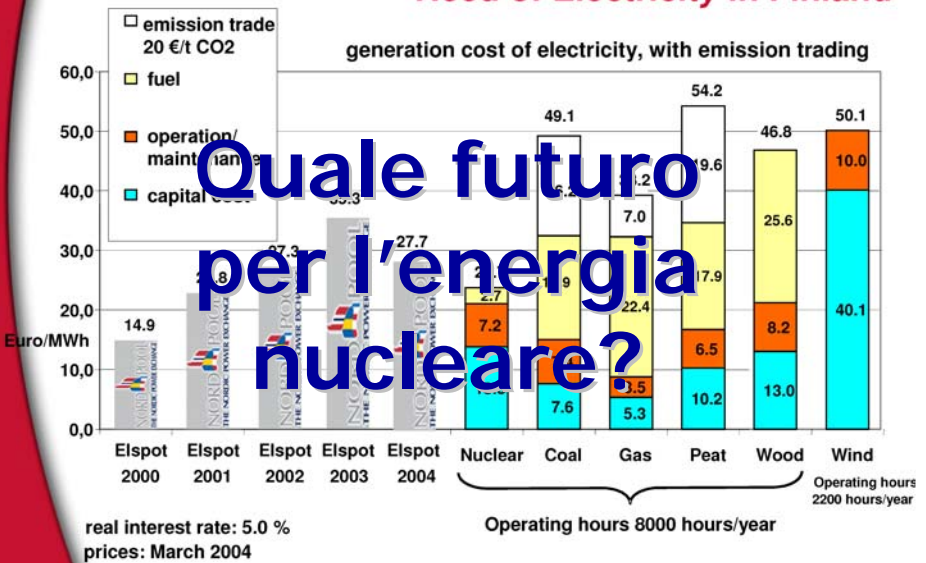
Assured Supply: Global Distribution of Uranium (Top 20 Countries - 1/1/2005)



Uranium resources are widely distributed around the world

155

Economical Best Alternative: Nuclear Power Need of Electricity in Finland

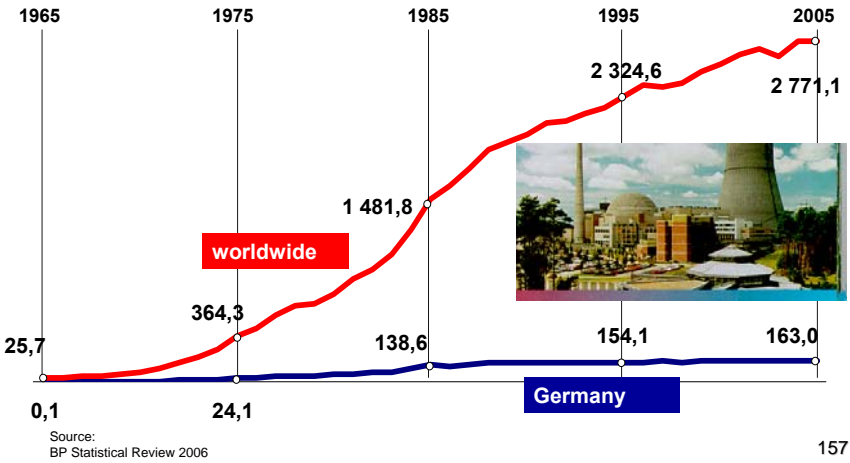


**Quale futuro
per l'energia
nucleare?**

Source: R.Tarjanne & K. Luostarinen 06.04.2004
 Lappeenranta University of Technology

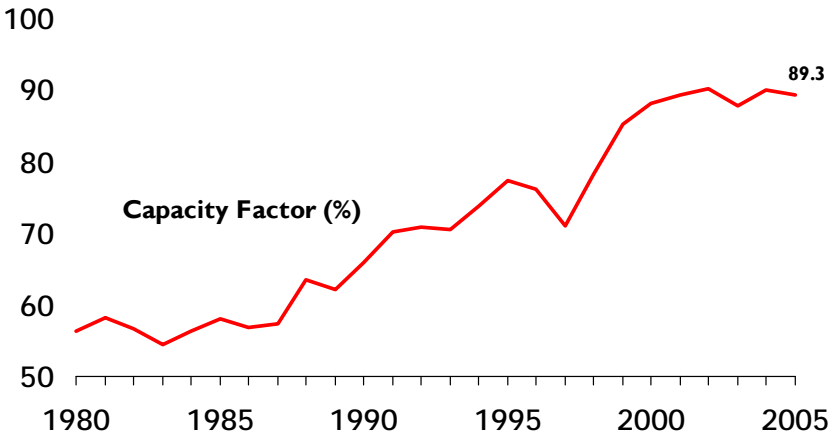
Rinascimento Nucleare? Nuclear Electricity Production

Annual Production [TWh]



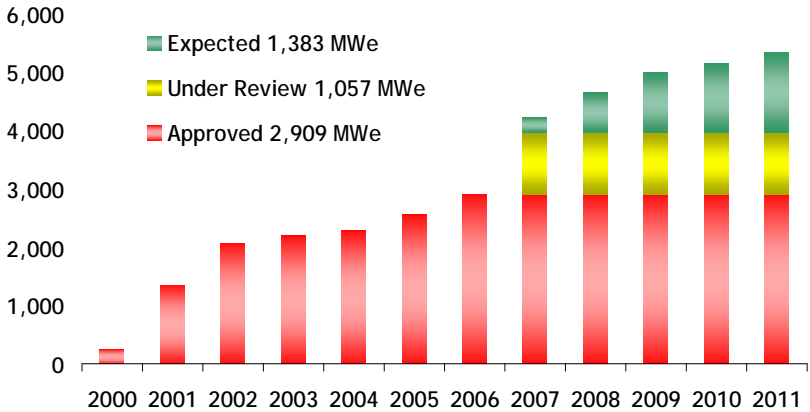
157

Average capacity factor at US reactors



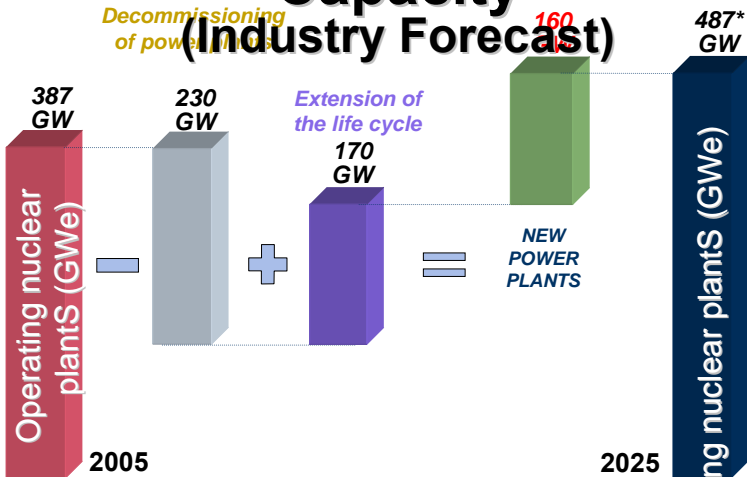
158

US nuclear capacity additions at existing facilities



159

Evolution of Installed Nuclear Capacity (Industry Forecast)




Dove e di che tipo ?

* Source: AREVA

160

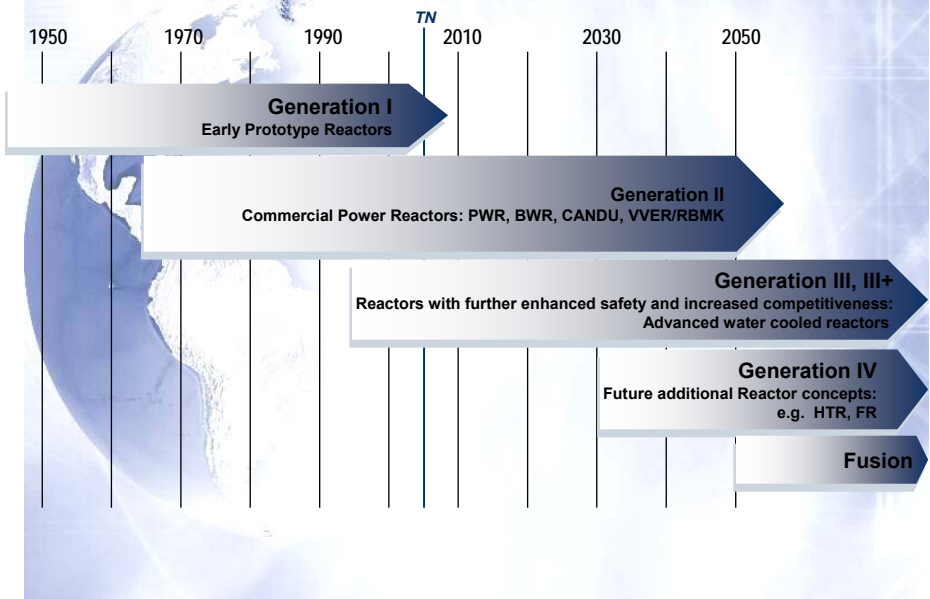
Nuclear Energy in the EU

	Countries using nuclear power	Number of NPPs in operation	Nuclear share in electricity production
EU-15	8	136	33.4%
EU-27	15	152	30.0%

Around 70% of EU citizens live in the fifteen countries that use nuclear power (EU 15)

161

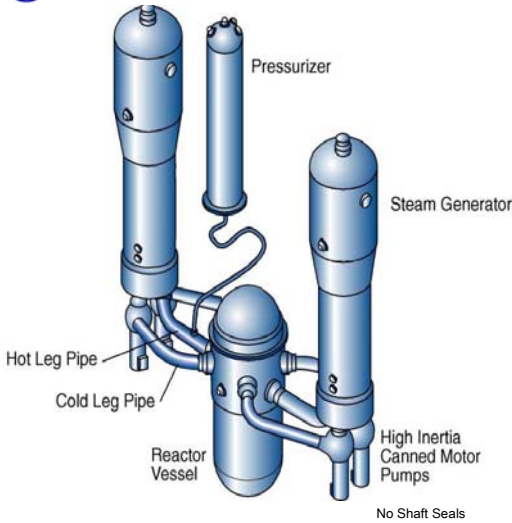
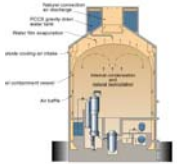
"Reactor Generations"



AP1000 Overview



TOSHIBA



- 1100 MWe PWR
- 2 loops, 2 SGs
- 4 recirculation pumps
- ALL safety-grade systems are PASSIVE:
 - ✓ Core Cooling System
 - ✓ Safety Injection
 - ✓ Containment Cooling System
- Severe Accidents Mitigation
- Improved Safety Margins:
 - ✓ Core Damage Frequency $5.09E-07$ (NRC: $1 E-4$)
 - ✓ Large Release Frequency $5.92E-08$ (NRC: $1 E-6$)

163



EPR Overview



- 1600 MWe PWR
- 4 loops, 4 SGs
- Safety Systems are ACTIVE
- High Redundancy
 - ✓ 4x 100% diesel trains
 - ✓ Physical separation
 - ✓ Two safeguard buildings
- Severe Accidents Mitigation
- Improved Safety Margins:
 - ✓ Core Damage Frequency $4.00E-07$ (NRC: $1 E-4$)

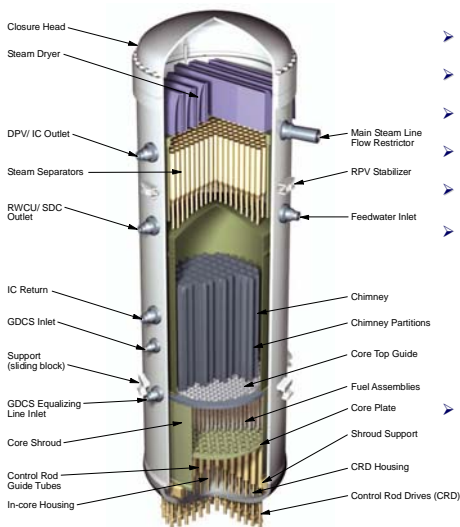
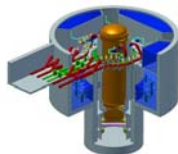


164



ESBWR Overview

(Economic Simplified BWR)



- 1550 MWe BWR
- Typical BWR operating conditions
- Natural circulation reactor
- Large RPV - large water inventory
- Core at lower elevation within RPV
- ALL safety-grade systems are PASSIVE:

- ✓ Core Cooling System
- ✓ Safety Injection
- ✓ Containment Cooling System

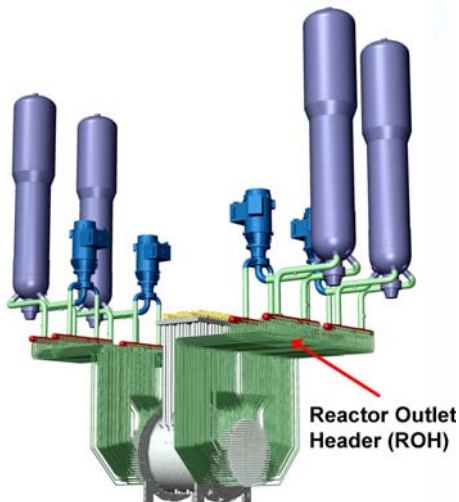
- Improved Safety Margins:

- ✓ Core Damage Frequency $3.00E-08$ (NRC: $1 E-4$)

165



ACR1000 Overview



- 1200 MWe PHWR
- 2 loops, 4 SGs
- Low P&T moderator
- Light water coolant (LEU)
- On-power fuelling
- PASSIVE shutdown systems
- Redundancy
- Improved Safety Margins:

- ✓ Core Damage Frequency $\sim 4 E-7$ (NRC: $1 E-4$)

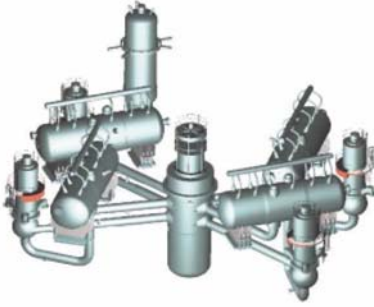
166



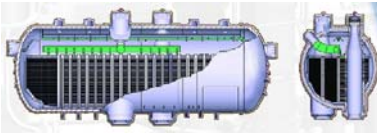
AES-2006: Overview



ATOMSTROYEXPORT



- > 1160 MWe VVER
- > 4 loops, 4 SGs
- > Double containment
- > Passive safety systems:
 - ✓ Residual Heat Removal System
 - ✓ Containment Cooling System
- > Redundant active systems
- > Improved Safety Margins:
 - ✓ Core Damage Frequency $1 E-06$ (NRC: $1 E-4$)
 - ✓ Large Release Frequency $1 E-07$ (NRC: $1 E-6$)



167 **VVERs**

Nuclear Energy in the EU



Italy:
 Access to generation capacity of the French EPR assured for ENEL (12.5 %)

ITALY

Completion of Mochovce 3, 4 (Slovakia)



Nuclear Energy in the EU



ITALY

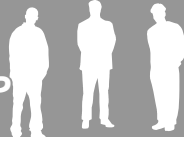
Italy:
**ENEL tra i partner
selezionati per Belene**

**Possibile offerta per
Cernavoda 3 & 4**

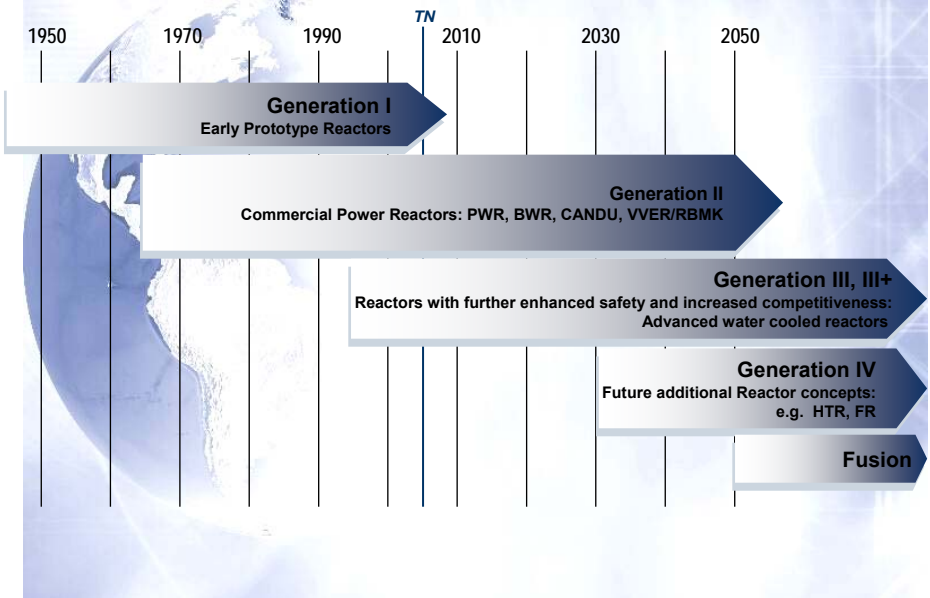
Ansaldo

SOGIN

GEN-IV, GNEP



"Reactor Generations"



dove stiamo andando?



Generation IV

Project proposed by US DOE in June 1999

- Engaged industries & research communities worldwide in a discussion on objectives & characteristics that next-generation nuclear energy systems should attain
- First steps achieved in October 2002:
 - select most promising concepts for further development
 - evaluating R&D needed to bring these concepts to maturity for potential commercialization expected by 2030
- Consequently a set of technology goals in key areas of:
 - sustainability
 - safety
 - economics
- New concepts of nuclear systems belong to 4 categories:
 - water cooled
 - gas cooled
 - liquid metal cooled
 - non-classical nuclear system

Generation IV

8 technology goals that may enable realization of new nuclear energy systems: sustainability (3), safety & reliability (3), economics (2), proliferation resistance and physical protection

- Sustainability - focus on fuel utilization, waste management and proliferation
 - ability to meet the needs of present generations while enhancing and not jeopardizing ability of future generations to meet society's needs
 1. Gen. IV systems & fuel cycles will provide sustainable energy that meets clean air objectives and promotes long-term availability of systems and effective fuel utilization
 2. Gen. IV systems will minimize & manage their nuclear waste and notably reduce long term stewardship burden in future, thereby improving protection for public health & environment
 3. Gen. IV systems & fuel cycles will increase assurance that they are a very unattractive route for diversion or theft of weapons-usable materials
- Safety and Reliability - focus on safe & reliable operation, investment protection
 - Essentially eliminating the need for emergency response
 - During normal operation or anticipated transients, systems must preserve their safety margins, prevent accidents and keep accidents from deteriorating into more severe
 - At the same time, competitiveness requires a high level of reliability & performance
 1. Gen. IV systems operations will excel in safety & reliability
 2. Gen. IV systems will have a very low likelihood & degree of core damage
 3. Gen. IV systems will eliminate the need for offsite emergency response
- Economics - focus competitive life cycle, energy production costs and financial risk
 - Future nuclear systems should accommodate a range of plant options including load following and anticipate the increased use of distributed power and smaller units
 - Gen. IV systems will primarily produce electricity but they may also find profitable to produce a broader range of products, i.e., potable water, process heat or hydrogen
 1. Gen. IV systems will have a clear life-cycle cost advantage over other energy sources.
 2. Gen. IV systems will have a level of financial risk comparable to other energy projects

173

Gen. IV Nuclear Energy Systems

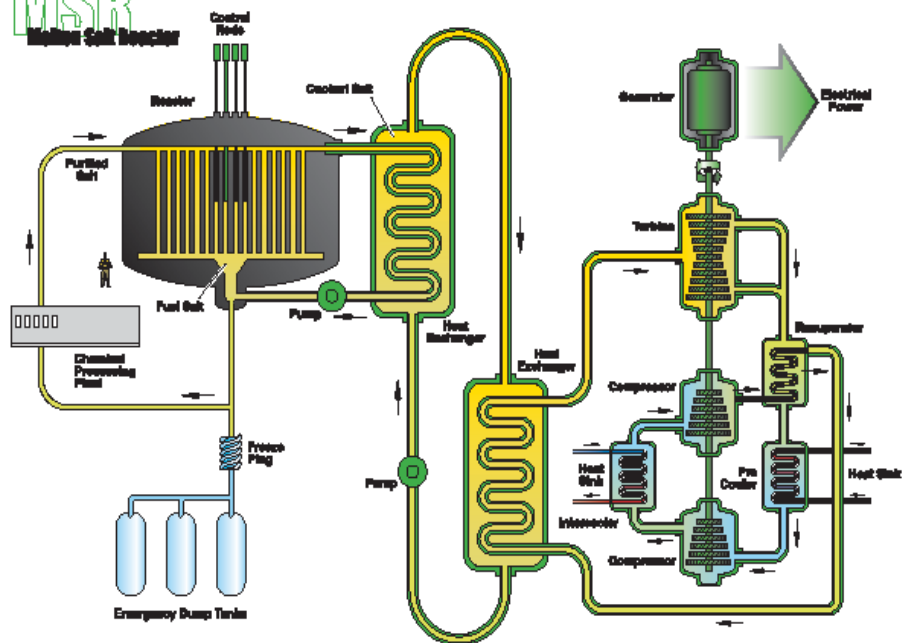
- Gen. IV roadmap culminated in selection of 6 systems
 - Identify systems that make significant advances toward the technology goals
 - Ensure that important missions of electricity generation, hydrogen and process heat production, and actinide management may be adequately addressed
 - Accommodate range of national priorities & interests of GIF countries
 - Provide some overlapping coverage of capabilities, because not all of systems may ultimately be viable or attain their performance objectives & attract commercial deployment

Gas Cooled Fast Reactor	GFR
Lead-Cooled Fast Reactor	LFR
Molten Salt Reactor	MSR
Sodium-Cooled Fast Reactor	SFR
Supercritical-Water-Cooled Reactor	SCWR
Very-High-Temperature Reactor	VHTR

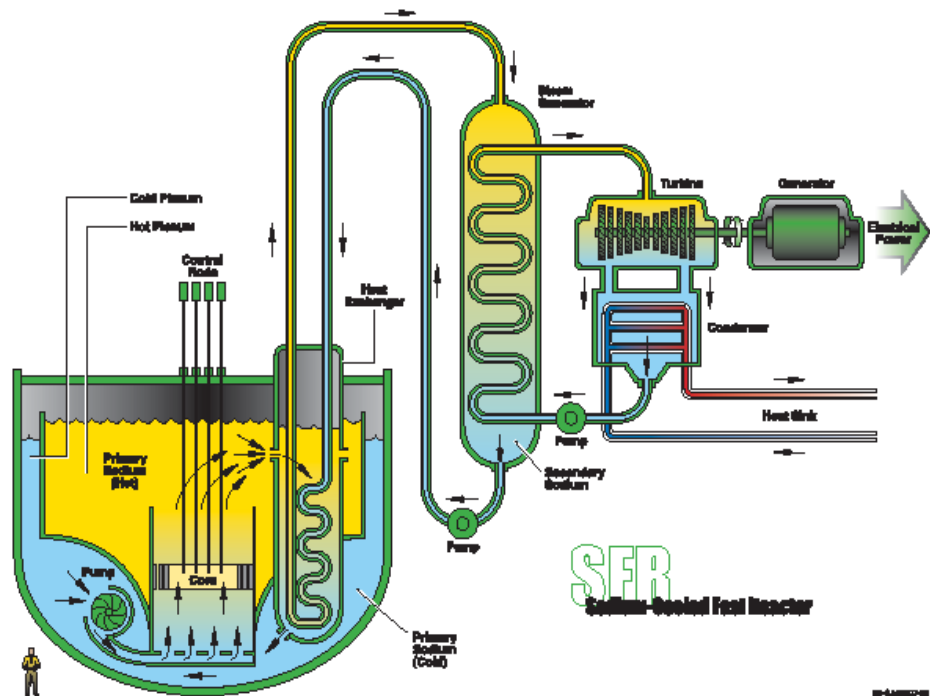
174

MSR

Molten Salt Reactor



20-04-002-02



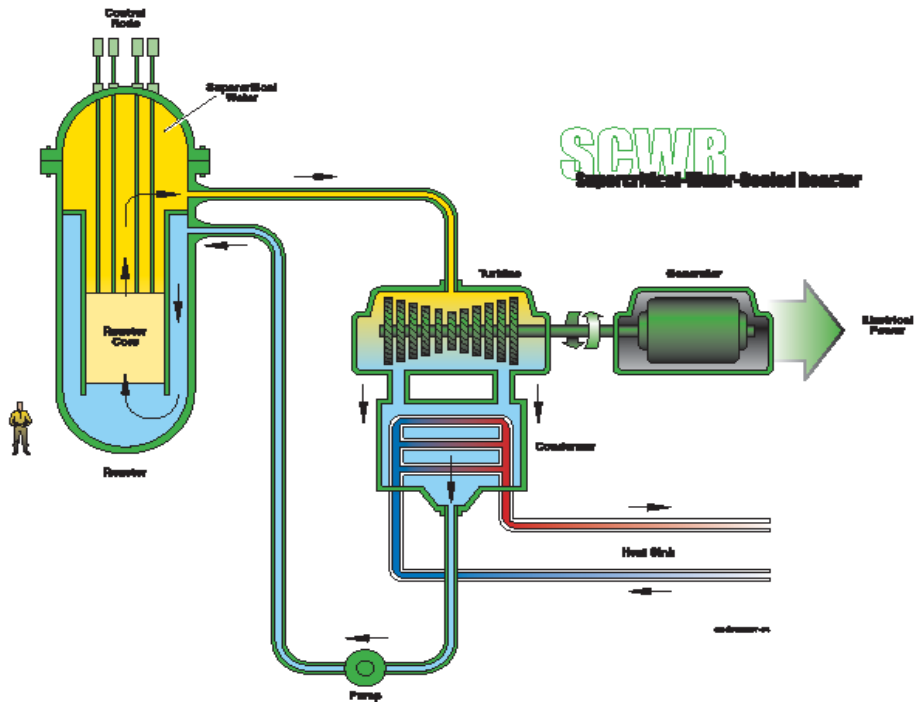
SFR

Sodium-Cooled Fast Reactor

20-04-002-02

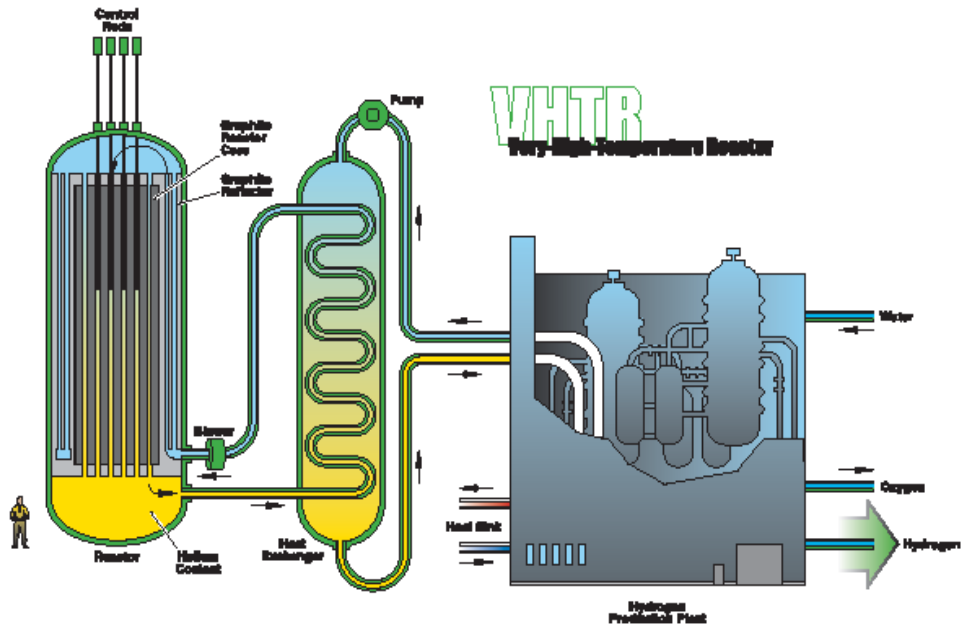
SCWR

Supercritical-Water-Cooled Reactor



VHTR

Very-High-Temperature Reactor



E la fusione?



181

Fusione : perché?

La ricerca sulla fusione nucleare è condotta in quasi tutto il mondo con l'obiettivo di rendere disponibile una fonte di energia

- ✓ inesauribile
- ✓ rispettosa dell'ambiente
- ✓ sicura
- ✓ economicamente competitiva

cioè di fornire una risorsa necessaria al sistema economico e sociale

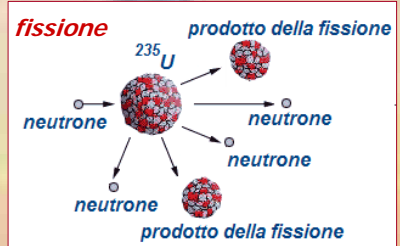
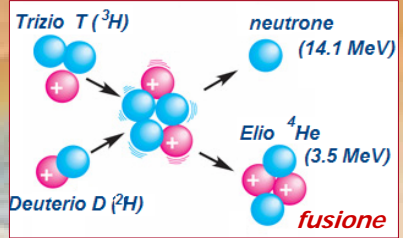
182



Che cos'è la fusione?

E' una reazione nucleare

- 2 nuclei leggeri (deuterio + trizio) si fondono dando origine ad un nucleo più pesante (elio) con rilascio di energia
- alimenta il sole e tutte le stelle
- reazione opposta alla fissione



183

Il combustibile: deuterio, litio

Deuterio : 1 g in 39 litri di acqua

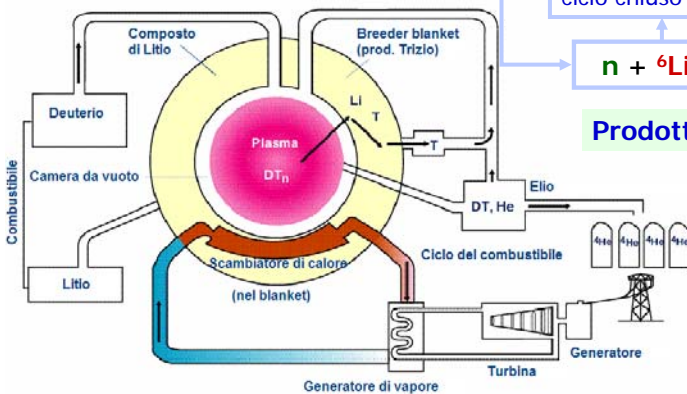
Litio : molto abbondante nelle rocce, oceani, acque minerali



Trizio: isotopo a vita breve ($t_{1/2} \sim 12$ anni) prodotto in ciclo chiuso nel reattore



Prodotto finale: elio



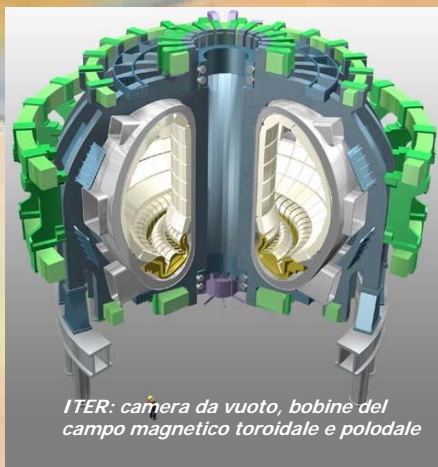
184

Per ottenere la fusione occorre:

- riscaldare il gas di deuterio-trizio a 150-200 milioni di °C
- mantenerlo in un'opportuna configurazione di equilibrio
- evitarne il contatto con le pareti della camera di reazione

Confinamento magnetico (→ ITER)

Il plasma è confinato in una camera a forma toroidale mediante intensi campi magnetici prodotti da bobine avvolte intorno alla camera stessa



ITER: camera da vuoto, bobine del campo magnetico toroidale e polodale

Quali sono i vantaggi della fusione?

Combustibili: estremamente abbondanti (D, Li), economici e facili da estrarre, geograficamente distribuiti in modo omogeneo

Ambiente: nessuna emissione di gas a effetto serra, nessun impatto dovuto all'estrazione dei combustibili

Sicurezza: intrinseca

Rifiuti: nessuna produzione di scorie radioattive, produzione di materiali strutturali attivati che richiedono depositi superficiali per ~100 anni

Il programma europeo sulla Fusione

Obiettivo: *"... la realizzazione comune di prototipi di reattori per impianti di potenza in grado di soddisfare i requisiti di sicurezza delle operazioni, rispetto dell'ambiente e fattibilità economica"*

La ricerca sulla fusione fa parte del programma EURATOM ed è completamente integrata a livello europeo attraverso accordi di Associazione con EURATOM:

- ✓ coordinamento dei programmi nazionali
- ✓ collaborazioni tra centri di ricerca
- ✓ conduzione dell'esperimento JET
- ✓ partecipazione alle collaborazioni internazionali quali ITER



Joint European Torus (JET)

187

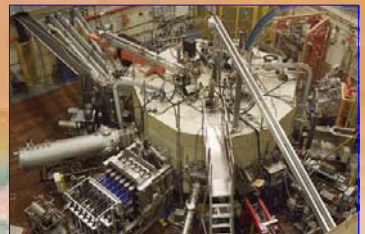
La fusione in Italia

L' Italia è fortemente impegnata nelle ricerche sulla fusione sia nel campo della fisica sia nel campo della tecnologia

Le attività vengono svolte nell'ambito dell' Associazione ENEA-EURATOM:

- ENEA
- Consorzio RFX
(ENEA, CNR, INFN, Un. Padova, Acciaierie Venete)
- Istituto di Fisica del Plasma (CNR-Milano)
- Consorzio Universitario CREATE
- Università

Tokamak FTU ENEA - Frascati



Reversed Field Pinch RFX - Padova



188

European Fusion Development Agreement (EFDA)

Accordo tra tutte le Associazioni EURATOM per rafforzare la collaborazione e il coordinamento del programma fusione

In particolare per:

- ✓ Programma tecnologico di Ricerca & Sviluppo
- ✓ Conduzione dell'esperimento comunitario JET
(situato a Culham, Inghilterra, attualmente il più grande al mondo)



Joint European Torus (JET)

189

6PQ EURATOM- Fusione (2002-06): Budget 824 M€

- Spesa totale annua ~ 500 M€ nel 6PQ (2002-06)
(~ 35% Euratom + ~ 65% fondi nazionali)
- Personale impegnato: ~2.000 fisici & ingegneri (~200 studenti PhD)

7PQ EURATOM- Fusione (2007-11): Budget 1947 M€

- ✓ Realizzazione di ITER: preparazione del sito, organizzazione dell'Agenzia Europea per ITER, costruzione dei componenti europei, supporto al progetto, supporto tecnico/amministrativo
- ✓ R&S in preparazione delle operazioni ITER: sfruttamento scientifico degli impianti esistenti e JET
- ✓ R&S per il reattore dimostrativo DEMO
- ✓ Attività di formazione e training

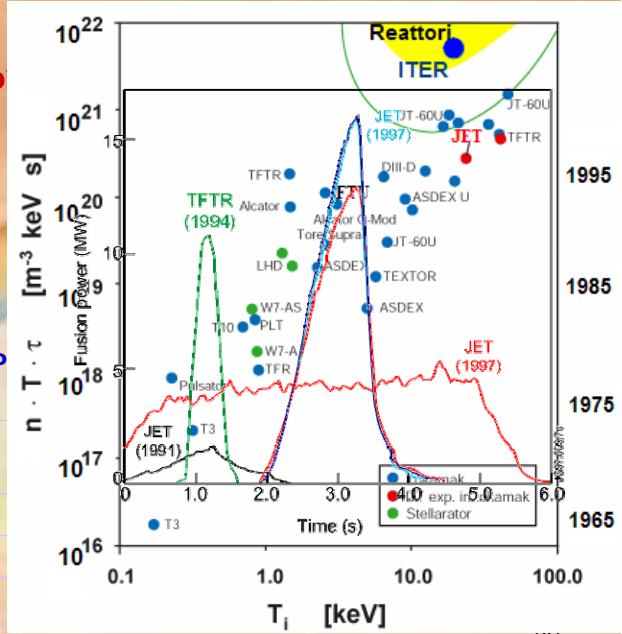
190

A che punto siamo

Record di potenza di fusione prodotta: 16 MW in JET (1997)

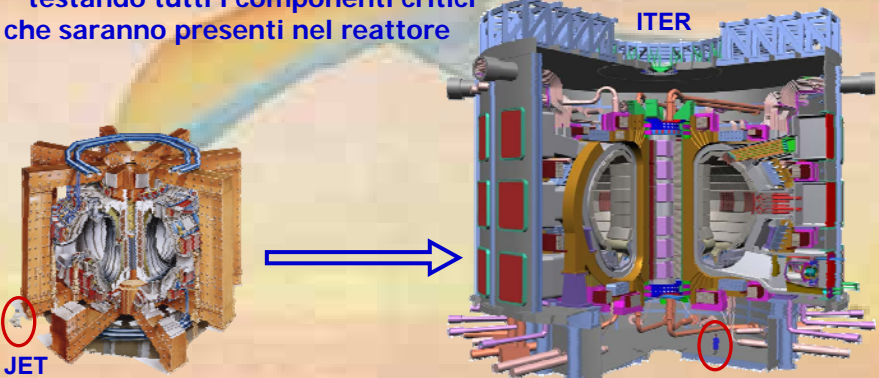
$$\text{Guadagno } Q = P_{\text{fusion}} / P$$

	Guadagno Q
JET	0.65★
ITER	5 - 10
Reattore	40 - 60



ITER: il prossimo passo

- per dimostrare la fattibilità scientifica e tecnologica della fusione per la generazione di energia elettrica
- in condizioni simili a quelle del reattore
- testando tutti i componenti critici che saranno presenti nel reattore



ITER, the “next step machine”



- ITER will produce a burning plasma & demonstrate power producing capabilities

- The device incorporates some key reactor-relevant technologies



- Direct investment costs (~ 4.26 Billion Euro – value 2005) shared among Partners mostly through in-kind contributions



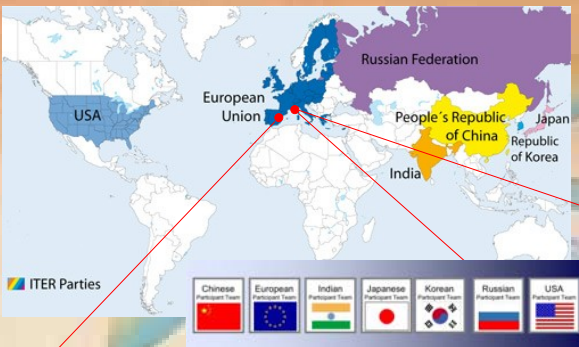
- Construction site: Cadarache (F)

- International ITER Agreement signed in Nov 2006

- Ratification of the Agreement in early 2007



ITER: un'impresa internazionale



Partners:
Europa, Giappone,
Stati Uniti, Russia,
India, Cina, Corea

Sito: Cadarache (CEA)
(EU-Francia)

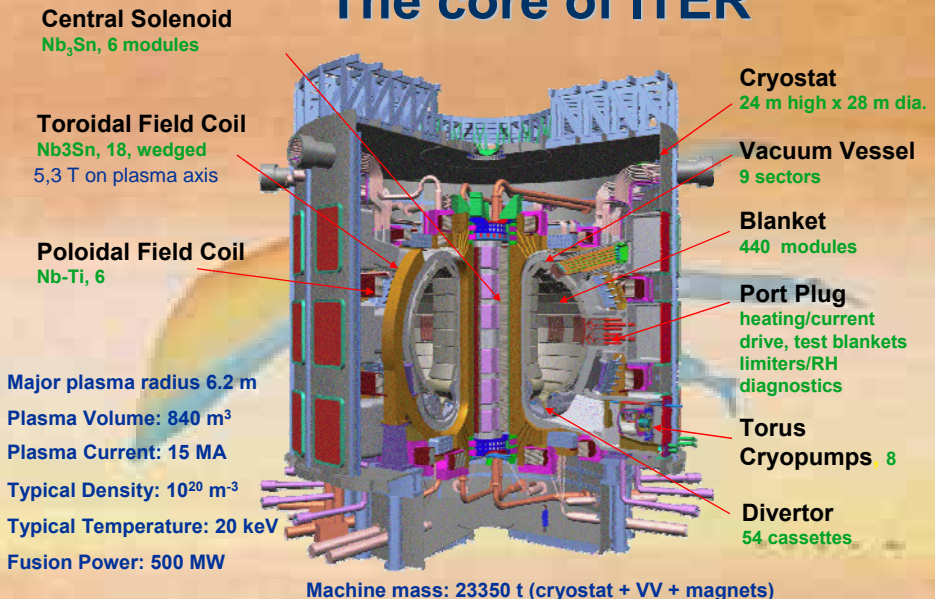
L'Europa sta organizzando
l'Agencia Europea per ITER
(Barcellona, Spagna)
per fornire al meglio il proprio
contributo alla realizzazione di ITER



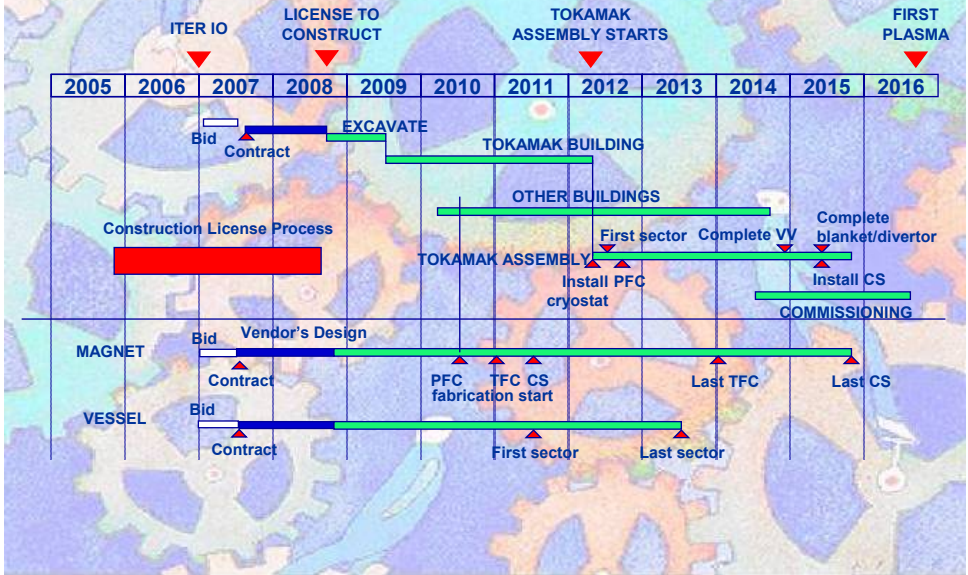
ITER - the aims

- Produce and study inductively-driven, **burning plasma** at $Q \geq 10$ (400-500 MW) for an "extended" time, ≥ 300 s
- Aim at producing and studying "**steady-state**", burning plasma with non-inductive drive $Q \geq 5$
- Demonstrate the availability and integration of essential **fusion reactor technologies**
- Test **components for a future reactor** including tritium breeding module concepts
- First plasma in 2016

The core of ITER



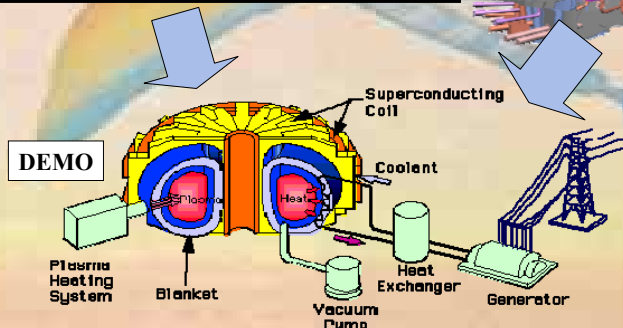
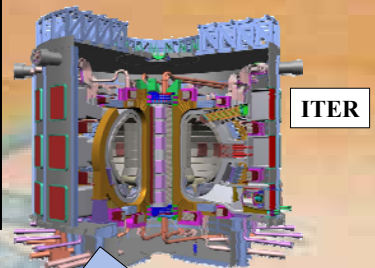
Integrated Project Schedule



Fusion development roadmap

R&D Accompanying Programme

- Strong EU role in scientific and technological exploitation of ITER
- R&D on reactor relevant materials
- Advance reactor oriented R&D: concept improvements, nuclear components development



broader approach

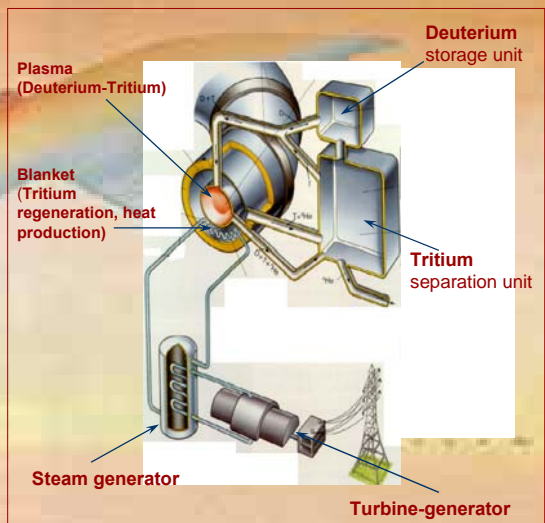
Bilateral agreement between the Government of Japan and EURATOM

- > The Broader Approach Activities shall comprise the following 3 projects:
 - > Engineering Validation and Engineering Design Activities for the International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF);
 - > Satellite Tokamak Programme
 - > International Fusion Energy Research Centre (IFERC): Computer Simulation Center, DEMO Design and R&D Coordination Center, ITER Remote Experimentation Center
- > Resources for implementation of Broader Approach shall comprise mainly contribution in kind. European contribution from France, Italy, Spain, Germany and Switzerland.
- > The Broader Approach will last 10 years starting from beginning of 2007
- > Allocation of Contribution of the Parties: 678 M€ (50% JS, 50% EU)

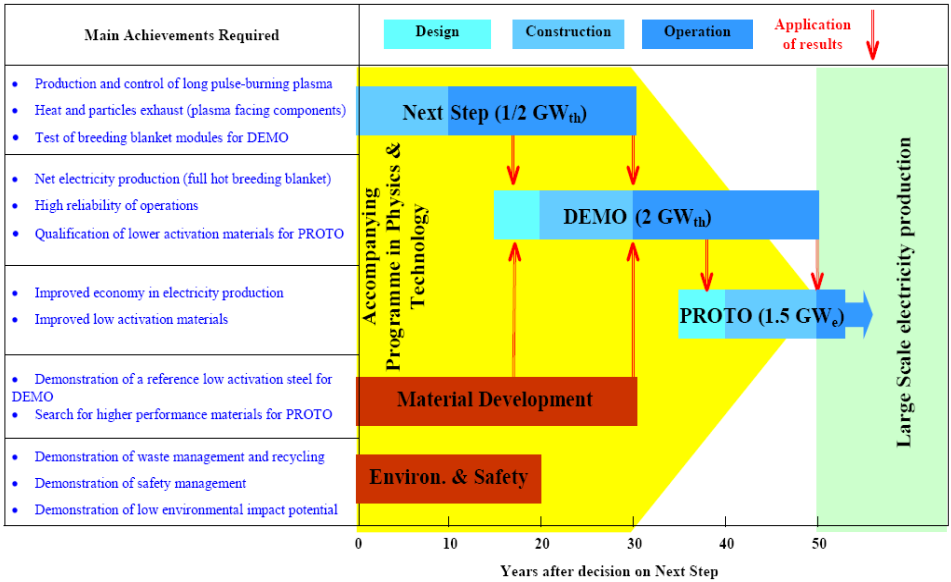
objective of EU fusion programme:

Construction of a prototype electricity generating reactor

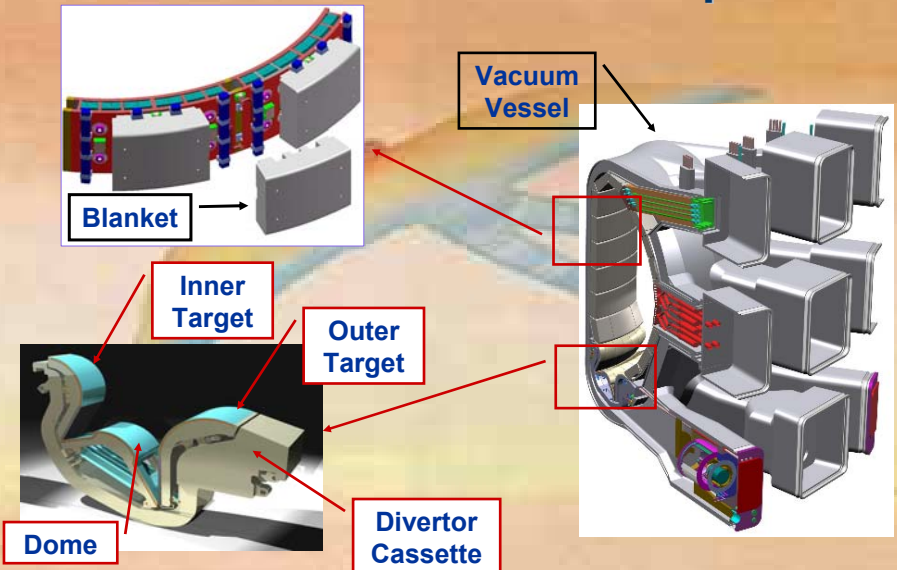
- in a burning plasma the energy of the He nuclei largely contribute to the heating of the plasma
- neutrons energy is converted into heat in the structures (blanket) lining the torus walls
- a circulating coolant removes the heat and, in the heat exchangers, steam will be generated to drive turbines for electricity production



Fusion Roadmap



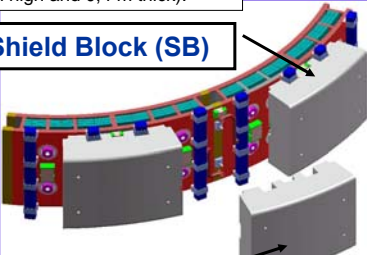
Vessel/In-Vessel ITER Components



ITER – R&D: Blanket Modules

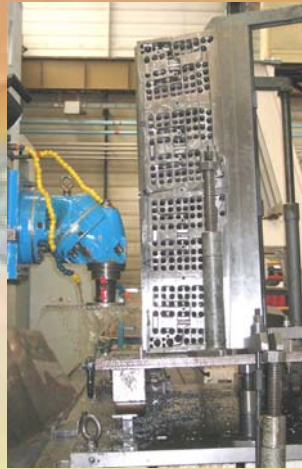
SB: Water cooled 316LN massive structure (1,5 m long, 1 m high and 0,4 m thick).

Shield Block (SB)



First Wall (FW)

FW: bi-metallic structure (20 mm thick CuCrZr bonded to 40 mm thick 316LNSS). Be tiles 10 mm thick bonded to CuCrZr plate. Bonding techniques: HIP and Brazing



Shield Block

Forged block (front) + 3216LN powder with embedded cooling tubes (rear). All assembly HIPped.

ITER - R&D Magnets – Full Size Conductor Tests

- TF coils - Full size conductor samples tested in Sultan facility (Nb_3Sn)



SC and Cu strand 0,82 mm diameter
SC strand Cu:nonCu 1,0
Local void fraction in strand bundle 32,2%
 $I = 68 \text{ kA}$, max $B = 11,8 \text{ T}$, $T = 5 \text{ K}$

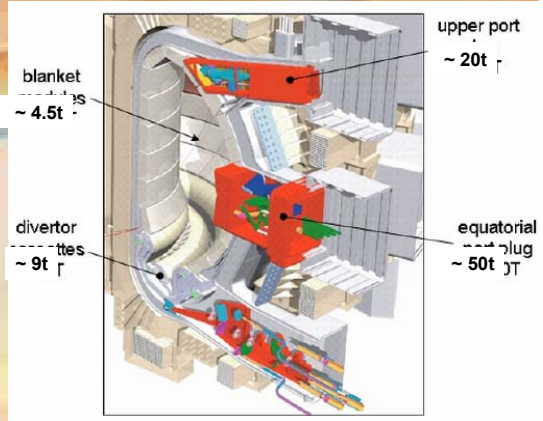


Remote Maintenance Activities

ITER remote maintenance is based on the removal of relatively **large modular systems** followed by refurbishment in a **hot-cell**.

The main in-vessel sub-systems comprise:

- **Blanket** modules
- **Divertor** cassettes
- **Port plugs** (containing diagnostics and heating systems)



Breeding Blanket (BB)

- Objectives:
 - Production of Tritium by (n, Li) reactions
 - Extraction of the plasma and nuclear heat by an appropriate coolant
 - Gamma and neutron shielding to protect the vacuum vessel and the superconducting magnet
- The first generation of BB is the one requiring the smallest extrapolation in technology

	Helium-cooled Lithium-Lead	Helium-cooled Pebble Bed
Tritium breeding	liquid Li	Li-ceramic (Li_4SiO_4 , Li_2TiO_3)
Neutron multiplier	Pb	Be
Coolant	He at 300 - 500°C, 8 MPa	

- Test Blanket modules will be tested in ITER

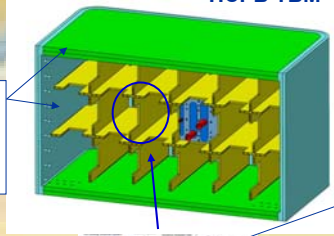
The solid Breeder (HCPB) TBM



Cooling Plate Mock-up ready for testing

HCPB TBM

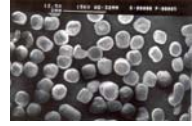
Box structure: EUROFER ferritic-martensitic (low activation) steel



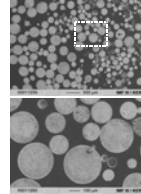
Be pebbles (neutron multiplier)



Breeder pebbles



Li₂TiO₃ pebbles option
(Extrusion fabrication process, Ø 0.6 – 1.2 mm)



Li₂SiO₄ pebble option
(Melt-Spraying fabrication; Ø 0.4 – 0.6 mm)

Conclusions?

- Fusion plasmas with significant thermonuclear reactions have been produced in Tokamaks, JET in particular
- These results have helped the definition of ITER design, the machine which to a large extent addresses scientific & technical feasibility of fusion power
- Joint construction of ITER is ready to start and the first plasma is planned in 2016
- Nuclear components (Breeding blanket, divertor and first wall) and the activation structural materials are being developed
- Intense high-energy neutron source (IFMIF) planned to be fully operational in 2020 for a full validation of fusion materials
- This integrated programme aims to allow starting the final design construction of DEMO reactor in about 20 years from now