

Illustra in breve i maggiori incidenti nucleari

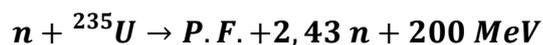
Trattazione teorica: Gli incidenti nucleari sono eventi che si sono verificati a partire dalla seconda metà del XX secolo; queste catastrofi sono molto rare e riguardano quasi sempre centrali nucleari che producono energia elettrica mediante la fissione nucleare. In particolare si possono evidenziare quattro di questi tristi accadimenti:

- **Windscale** (1957)
- **Three mile island** (1979)
- **Chernobyl** (1986)
- **Fukushima** (2011)



Conoscenze basilari per l'argomento:

La fissione o scissione nucleare è un processo fisico-nucleare utilizzato per la produzione di energia elettrica; esso si basa sull'utilizzo di un nucleo atomico di un elemento chimico pesante (uranio-235 o plutonio-239) chiamato combustibile che viene scisso a metà dalla collisione con neutroni. Dalla fissione si producono dei prodotti di fissione (gli isotopi prodotti da tale reazione sono radioattivi a causa di un eccesso di neutroni e subiscono una catena di decadimenti beta; scorie radioattive), circa 2,43 neutroni e 211.5 MeV (Circa 11 MeV sono trasportati via come energia cinetica dei neutrini emessi al momento della fissione).



I nuovi neutroni prodotti possono venire assorbiti dai nuclei degli atomi di uranio-235 producendo una nuova fissione del nucleo. Questo fenomeno viene definito come fattore di moltiplicazione efficace ed è espresso con la lettera K; per definirla bisogna effettuare il rapporto tra il numero dei neutroni prodotti dalle fissioni e il numero dei neutroni che hanno innescato quelle fissioni

$$K = \frac{\text{Neutroni presenti in una generazione}}{\text{Neutroni della generazione precedente}}$$

Questo valore in un reattore nucleare $K=1$ (massa critica) in caso contrario se fosse $K>1$ la reazione sarebbe incontrollata e si rischierebbe la catastrofe (reattore sovrcritico), mentre se fosse $K<1$ si spegnerebbe lentamente (reattore sottocritico).

Possiamo tracciare uno schema riassuntivo degli elementi principali all'interno delle centrali nucleari:

Combustibile: esso è l'elemento radioattivo che viene scisso (in genere Uranio) mediante la collisione con neutroni termici (a bassa velocità).

Fluido refrigerante: questa parte di un reattore nucleare è colei che trasporta l'energia all'utilizzatore per mezzo di generatori di vapore per la produzione di energia elettrica; questo fluido è termovettore (gassoso o liquido, o che subisce un cambio di fase nel processo) e raffredda il nocciolo del reattore.

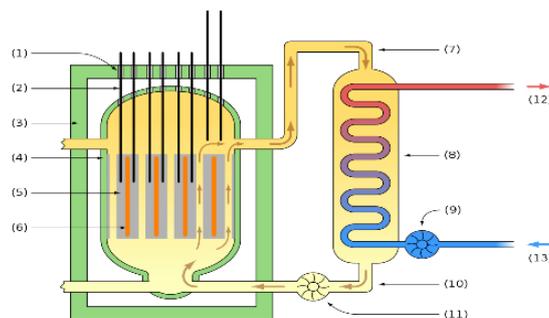
Moderatore: questo componente è fondamentale nelle prime tre generazioni di reattore nucleare, infatti esso riduce la velocità dei neutroni veloci prodotti dalla reazione e li riporta ad essere neutroni termici (a bassa velocità) che hanno più probabilità di fissionare ed avere il fattore di moltiplicazione.

Barre di controllo: esse sono composte da barre metalliche (in genere leghe di argento, cadmio e indio o carburi di boro) atte ad assorbire i neutroni in eccesso liberati dalla reazione; possono essere inserite nel nocciolo e servono a modulare in funzione della potenza energetica da generare, a tenere sotto controllo ed eventualmente arrestare la reazione a catena di fissione in caso di criticità.

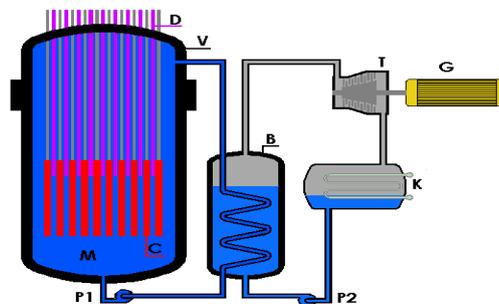
Il 22 ottobre **1934** si ebbe la prima fissione nucleare artificiale di un atomo di Uranio e fu realizzata da un gruppo di fisici italiani guidati da Enrico Fermi (i cosiddetti "ragazzi di via Panisperna") mentre bombardavano dell'uranio con neutroni. Ma solo il 18 dicembre del **1938** venne dimostrato sperimentalmente da Otto Hahn e il suo giovane assistente Fritz Strassmann, che un nucleo di uranio-235, qualora assorba un neutrone, può dividersi in due o più frammenti dando luogo così alla fissione del nucleo. Da qui i chimici e fisici iniziarono a pensare di poter utilizzare questo processo, costruendo dei reattori che contenessero la reazione, per produrre energia o degli ordigni nucleari.

I e II generazione di reattori nucleari:

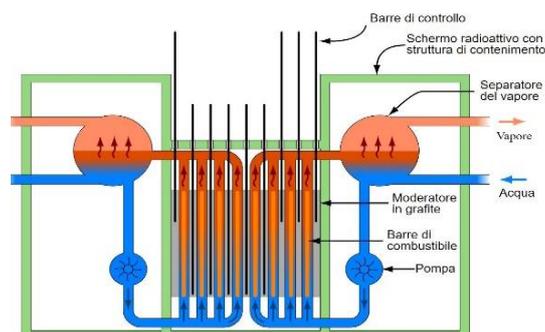
Magnox: in questo reattore si utilizzano pastiglie di ossido d'uranio (UO_2) come combustibile, la grafite come moderatore e l'anidride carbonio come liquido refrigerante; essa non viene inserita direttamente in una turbina, ma la si fa passare per uno scambiatore di calore, dove riscalda tubi contenenti acqua controcorrente tramite il contatto termico ed il vapore così prodotto aziona la turbina.



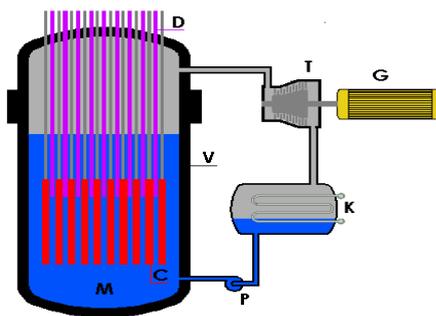
PWR: I reattori di questo tipo hanno due circuiti che lavorano in simbiosi; Il *circuito primario* è costituito da un recipiente in pressione (**V**), che contiene il nocciolo formato da Uranio arricchito come combustibile (**C**) al cui interno scorrono le barre di controllo (**D**), il moderatore di neutroni (**M**) è l'acqua, che funge anche da fluido refrigerante. L'acqua sottrae calore per conduzione al nocciolo caldo spinta da una pompa di ricircolo (**P1**) e per mantenere l'acqua allo stato liquido la pressione è di circa 15,5 MPa (in cui vengono immesse ione ossidrilie per evitare la decomposizione dell'acqua). Mentre Il *circuito secondario*, non radioattivo, è costituito dalla parte superiore del generatore di vapore (**B**) in cui viene fatta circolare acqua. Lo scambio di calore, senza contatto diretto, tra l'acqua del primario e quella del secondario genera vapore che, a pressione relativamente bassa, passa nella turbina (**T**) la quale è accoppiata ad un generatore elettrico (**G**), che produce elettricità da immettere in rete. Dalla turbina il vapore passa al condensatore (**K**) dove viene condensato, fornendo così l'acqua da reimmettere in ciclo mediante la pompa (**P2**)



RBMK: esso è un reattore moderato a grafite e refrigerato con acqua bollente. Il nocciolo consiste in un cilindro di grafite al cui interno passano numerosi canali, entro alcuni dei quali sono posizionate le barre di combustibile in uranio arricchito raffreddate da acqua bollente, mentre in altri sono fatte alloggiare le barre di controllo, inserendo o estraendo le quali si modula la potenza termica prodotta. L'acqua (leggera) assorbe i neutroni, e li rallenta. L'acqua si trova in delle zone tali del reattore (i canali di raffreddamento) per cui non riesce a rallentare a sufficienza i neutroni, compito che è affidato alla grafite per continuare a produrre fissioni e quindi a generare calore nel materiale. Quindi se manca l'acqua il reattore continuerà a generare calore, e la temperatura continuerà a salire velocemente arrivando alla fusione del nocciolo.



BWR: esso è un reattore moderato ad acqua leggera, che utilizza lo stesso moderatore come fluido termovettore (fluido refrigerante). Utilizza acqua in ebollizione e di genera vapore all'interno del reattore, eliminando la necessità di avere generatori di vapore. L'elemento di combustibile **C** (uranio arricchito) è immerso nel moderatore **M**, acqua leggera in cambiamento di fase, che funge anche da refrigerante. Nella stessa acqua sono immerse le barre di controllo **D** usate per modulare l'emissione di neutroni. L'acqua è fatta circolare da una pompa **P**, e, a contatto degli elementi di combustibile caldi, asporta calore e parzialmente vaporizza, raccogliendosi nella parte superiore del recipiente a pressione **V** (come in una caldaia). Il vapore così generato, a pressione relativamente bassa, passa nella turbina **T** accoppiata ad un generatore **G** che produce elettricità da immettere in rete. La turbina (che è collegata meccanicamente ad un alternatore, per trasformare la potenza da meccanica a elettrica) è seguita da un condensatore **K** dove il vapore viene condensato mediante l'acqua di raffreddamento, fornendo così l'acqua da reimmettere nel reattore.



Scala INES (International Nuclear and radiological Event Scale): è la scala internazionale degli eventi nucleari e radiologici sviluppata nel 1989 dall'AIEA (l'agenzia internazionale per l'energia atomica). Essa ha lo scopo di classificare gli incidenti nucleari e radiologici in maniera univoca mettendo in evidenza la gravità degli incidenti di tipo nucleare o radiologico. Questa scala comprende 7 livelli (più un livello 0) ed è divisa in due parti: dal 4° al 7° livello gli incidenti mentre i guasti dal 1° al 3° livello. Il livello 0 è catalogato come una deviazione dal normale processo. Il passaggio da un livello all'altro è un aumento di circa dieci volte il livello sottostante.



Incidenti:

Windscale è uno dei primi incidenti nucleare; verificatosi il 7 ottobre del 1957 nel reattore nucleare **Magnox** senza contenimento. In questo complesso si produceva plutonio per scopi militari, durante la ricottura del moderatore di neutroni di grafite si verificò un incendio in uno dei canali che si estese per l'intero nocciolo. Il fuoco fu domato solo dopo quattro giorni e emise una nube radioattiva pari a un decimo della bomba atomica di Hiroshima. Secondo i dati ufficiali i morti furono 300 per cause ricondotte all'incidente (malattie, leucemie, tumori). Valutato 5 sulla scala INES.

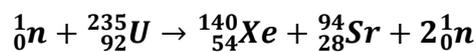
Three Mile Island la catastrofe ebbe luogo il 28 marzo del 1979 sull'omonima isola dove era stato costruito un reattore nucleare **PWR**. L'incidente ebbe inizio nel circuito di refrigerazione secondario, con il blocco della portata di alimentazione ai generatori di vapore. Questo blocco portò, nel circuito primario di raffreddamento del nocciolo, ad un considerevole aumento della pressione del refrigerante si attivò lo "SCRAM" (arresto di emergenza del reattore mediante l'inserimento delle barre di controllo). Ma una valvola di rilascio svuotando così parzialmente il circuito di raffreddamento primario e il calore residuo del nocciolo del reattore non poté essere smaltito causando la fusione parziale del nocciolo. Le conseguenze furono un rilascio di piccole quantità di gas radioattivi e di iodio radioattivo nell'ambiente. Valutato 5 sulla scala INES.

Chernobyl è sicuramente il più famoso incidente nucleare; esso è avvenuto il 26 aprile 1986 dove il reattore **RBMK** numero quattro esplose. La causa fu un test che prevedeva la disattivazione da parte del personale dei dispositivi di sicurezza, portando a un brusco e incontrollato aumento della potenza e quindi della temperatura del nocciolo del reattore, che divenne rapidamente sovracritico. Le barre di carbonato di boro (con estensori di grafite) vennero piegate dal calore le fece piegare così da non riuscire più ad entrare. Il calore crebbe a tal punto da determinare la scissione dell'acqua di refrigerazione in idrogeno e ossigeno, a così elevate pressioni da provocare la rottura delle tubazioni del sistema di raffreddamento del reattore. Il contatto dell'idrogeno e della grafite incandescente con l'aria, a sua volta, innescò una fortissima esplosione, che provocò lo scoppiamento del reattore: una nuvola di materiale radioattivo fuoriuscì da esso e ricadde su vaste aree intorno alla centrale, contaminandole e rendendo necessaria l'evacuazione di oltre 330.000 persone. La nube radioattiva raggiunse ben presto tutti i paesi dell'Europa orientale. Questo incidente è stato valutato 7 sulla scala INES.

Fukushima è un incidente nucleare avvenuto nella centrale nucleare di Fukushima Dai-ichi a Ōkuma, nella prefettura di Fukushima, causato principalmente dopo il terremoto di Tōhoku l'11 marzo 2011. Immediatamente dopo il terremoto, i reattori 1, 2 e 3 che producevano elettricità interruppero automaticamente le loro reazioni di fissione inserendo le barre di controllo in

una procedura di sicurezza legalmente obbligatoria denominata SCRAM, che pone fine alle normali condizioni di funzionamento dei reattori. Dato che i reattori non erano in grado di generare energia per far funzionare le proprie pompe di refrigerazione, i generatori di emergenza diesel sono arrivati per alimentare l'elettronica e i sistemi di raffreddamento. L'acqua inondò rapidamente le stanze basse in cui erano alloggiati i generatori di emergenza. I generatori diesel allagati hanno subito un guasto poco dopo, con conseguente perdita di potenza alle pompe d'acqua di raffreddamento. Queste pompe erano necessarie per far circolare continuamente l'acqua di raffreddamento attraverso i reattori di Generazione II per diversi giorni per mantenere le barre di combustibile dalla fusione, poiché le barre di combustibile continuavano a generare calore di decadimento dopo lo SCRAM. Le barre di combustibile diventerebbero abbastanza calde da fondersi durante il periodo di decadimento del carburante se non fosse disponibile un adeguato dissipatore di calore. Dopo che le pompe di emergenza secondarie (gestite da batterie di back-up) si sono esaurite, un giorno dopo lo tsunami del 12 marzo, le pompe dell'acqua si fermarono e i reattori iniziarono a surriscaldarsi. Le prime quattro unità si riempirono di idrogeno, provocando un'esplosione. In ciascun caso, le esplosioni di aria e idrogeno si sono verificate nella parte superiore di ogni unità, che si trovava nei loro edifici di contenimento secondario superiore. La morte in seguito a questo evento per ora è solo una, ma nonostante questo è stato valutato 7 sulla scala INES

Esempio Illustrativo: calcola l'energia emessa dalla fissione nella seguente reazione



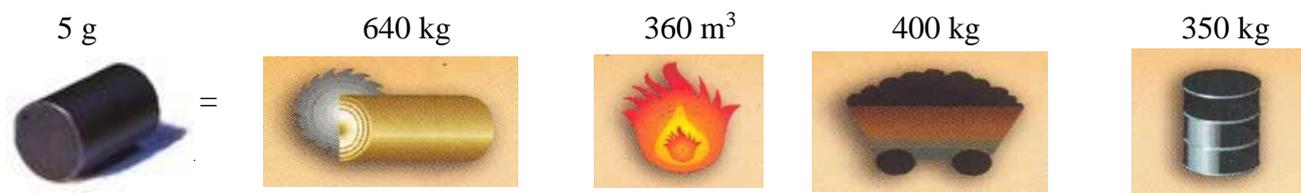
Massa degli atomi reagenti: n (1,009 u) + U (235,044 u) = 236,053 u

Massa degli atomi prodotti: 2n (1,009 u) + Xe (139,922 u) + Sr (93,915 u) = 235,855 u

Differenza = Massa degli atomi reagenti – Massa degli atomi prodotti = 0,198 u 1 u = 931,5 MeV

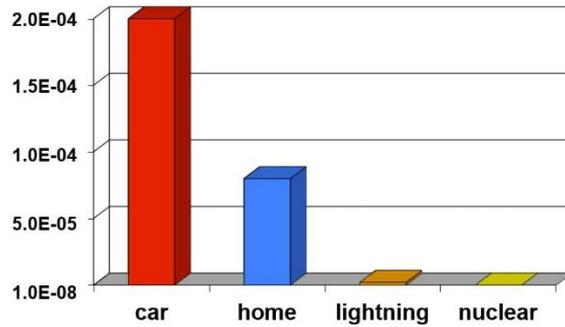
$$E = 0,198 \text{ u} * 931,5 \text{ MeV} = 184,437 \text{ MeV}$$

Confrontiamo la quantità di energia emessa tramite la fissione di 5g di U con altri tipi di fonti energetiche conosciute

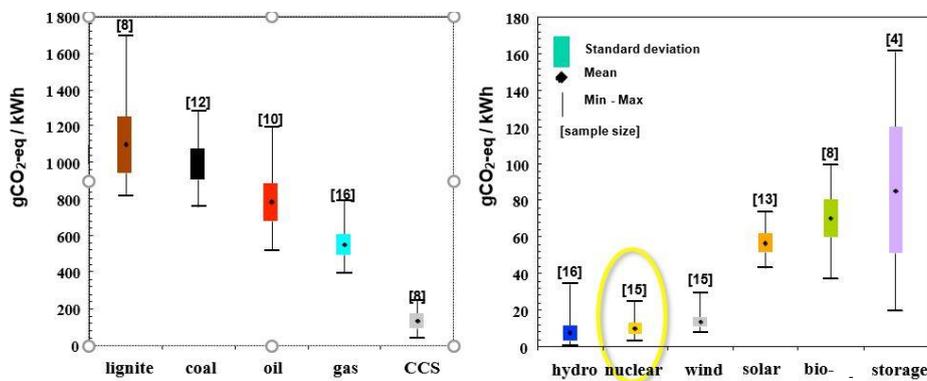


Applicazione tecnologica: reattori nucleari di IV generazione

Gli incidenti nucleari sono eventi molto rari nella storia umana



Questo tipo di energia è stata definita la più sicura dal governo australiano ed è inoltre l'energia più pulita; anche di più rispetto alle energie rinnovabili.



Note: Serious illnesses include respiratory and cerebrovascular hospital admissions, congestive heart failure and chronic bronchitis. For nuclear power, they include all non-fatal cancers and hereditary effects.

Air pollution-related effects

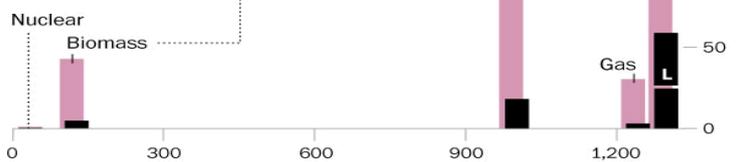
PER TERAWATT HOUR OF ELECTRICITY – EUROPE

■ Serious illnesses

■ Deaths (includes accidents)

Lignite, or brown coal, is considered the lowest form of coal. It has a high water content and is difficult to store and ship, so it is usually burned in power plants near where it is mined.

Biomass is energy from plants or animals that can be burned (wood and some garbage), fermented for ethanol fuel (crops) or tapped for methane gas (rotting garbage or agricultural and human waste).



GRAMS PER KILOWATT HOUR OF ELECTRICITY – WORLD

Greenhouse gases (CO₂ equivalent, from direct and indirect emissions)

Il vero problema di questo tipo di energia oltre al rischio di incidenti è la produzione di scorie radioattive. La soluzione parziale a questi due problemi si avranno con la costruzione di reattori di IV generazione. Infatti in questi nuovi tipi di reattori il design sarà più sicuro e si avrà un'evoluzione nel sistema di produzione di energia. In questo tipo di reattore non si avrà un moderatore; quindi i neutroni prodotti dalla reazione dell'U rimarranno veloci, poiché questi possono creare reazioni a catena con i prodotti di fissione che si trasformano quindi in combustibile.

Questo non permetterà che non si creino scorie dalla successiva fissione, ma le scorie che si creeranno dalla scissione dei prodotti di fissione dell'uranio hanno un tempo di decadimento dell'ordine di 100 anni rispetto ai 10 000 anni dei suoi predecessori.

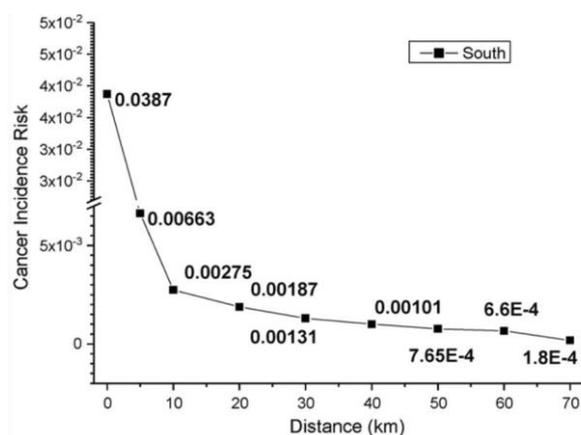
Questo permetterà quindi di utilizzare come combustibile tutte le scorie radioattive prodotte in questi anni e renderà possibili controllare lo smaltimento delle prossime scorie radioattive.

Correlazione con la matematica: statistica e probabilità

Una branca della fisica nucleare si occupa del calcolo del rischio di un incidente nucleare (PRA); Esso è fondamentale per la costruzione dei reattori nucleari e anche per la valutazione dei rischi di quelli in attività. La regola basilare del calcolo del rischio è:

$$\text{Rischio} \left[\frac{\text{Conseguenze delle radiazioni}}{\text{Unità di tempo}} \right] = \text{Frequenza} \left[\frac{\text{Eventi}}{\text{Unità di tempo}} \right] \times \text{Conseguenze} \left[\frac{\text{Radiazioni}}{\text{Evento}} \right]$$

Modellizzazione in fisica: rischio di cancro nel sud di Baiji



Il PRA considera tantissime variabili e calcoli statistici di difficile comprensione quindi propongo una versione semplificata

Trattazione teorica: La probabilità composta e la formula di Bayes

La probabilità composta: essa è la **probabilità statistica** $P(A|B)$ che due eventi indipendenti A e B accadano contemporaneamente (o uno dopo l'altro). La probabilità composta è pari al prodotto delle probabilità dei singoli eventi. Questa formula della probabilità composta è applicabile soltanto se gli eventi sono indipendenti

$$P(AB) = P(A) \cdot P(B)$$

La formula di Bayes: Siano A e B due eventi, e sia B possibile, cioè richiediamo che $P(B) \neq 0$. La probabilità a posteriori di A condizionato a B può essere calcolata nel modo seguente:

$$P(A|B) = P(B|A) \cdot P(A)$$

Dalla definizione di probabilità condizionata, possiamo anche dire che

$$P(A|B) = P(A \cap B) / P(B)$$

Ma l'intersezione insiemistica è un'operazione commutativa: è infatti $A \cap B = B \cap A$. Di conseguenza, possiamo scrivere anche $P(A \cap B) = P(B \cap A)$. Sfruttando sempre la definizione di probabilità condizionata, abbiamo che $P(B \cap A) = P(B|A) \cdot P(A)$. Sostituiamo questa uguaglianza nella prima equazione per ottenere la formula di Bayes:

$$P(A|B) = P(B|A) \cdot P(A) / P(B)$$

Esempio illustrativo dell'argomento:

Una industria che costruisce impianti nucleari ritiene che i siti scelti per gli impianti possano essere suddivisi in due classi: ad alto rischio di incidente e a basso rischio di incidente. Le statistiche mostrano che una località ad alto rischio avrà un incidente nucleare di qualche tipo nell'arco di un anno con probabilità del 5 %, mentre tale probabilità è pari al 2 % per le località a basso rischio.

a) Supponiamo che il 30 % delle località sia ad alto rischio: qual è la probabilità che un impianto abbia un incidente nel primo anno di esercizio?

b) Supponiamo che un nuovo impianto abbia un incidente entro un anno dall'entrata in esercizio. Qual è la probabilità che avvenga in una località ad alto rischio?

Soluzioni: a) Applico la formula della probabilità composta:

$$P = 0,30 \times 0,05 + 0,70 \times 0,02 = 0,015 + 0,014 = 0,029 = 2,9 \%$$

b) Applico il Teorema di Bayes:

$$P = 0,30 \times 0,05 / (0,30 \times 0,05 + 0,70 \times 0,02) = 0,015 / 0,029 = 0,517 = 51,7 \%$$



Fonti:

“Le frontiere della fisica” F.M. Boschetto <http://www.fmboschetto.it/tde4/frame.htm>

“I problemi della fisica 3” J.D. Cutnell, K.W. Johnson, D. Young e S, Stadler

“The radiological assessment, hazard evaluation, and spatial distribution for a hypothetical nuclear power plant accident at Baiji potential site”

<https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/s12302-020-0288-8>

“Basics of Nuclear Power Plant Probabilistic Risk Assessment” Electric power research institute

“Probabilistic Risk Assessment (PRA)” U.S.NRC

“An introduction to the basic of reliability and risk analysis” E. Zio

“Risk assessment of nuclear power plants” R.T. Islamov

“GIF R&D Outlook for Generation IV Nuclear Energy Systems: 2018 Update”

“Introduction to nuclear engineering (A+B) course” Politecnico di Milano

“Statistica e calcolo delle probabilità” F.M. Boschetto

Un ringraziamento speciale a Boris Paladino dottorando in scienze e tecnologie energetiche e nucleari al Politecnico di Milano