

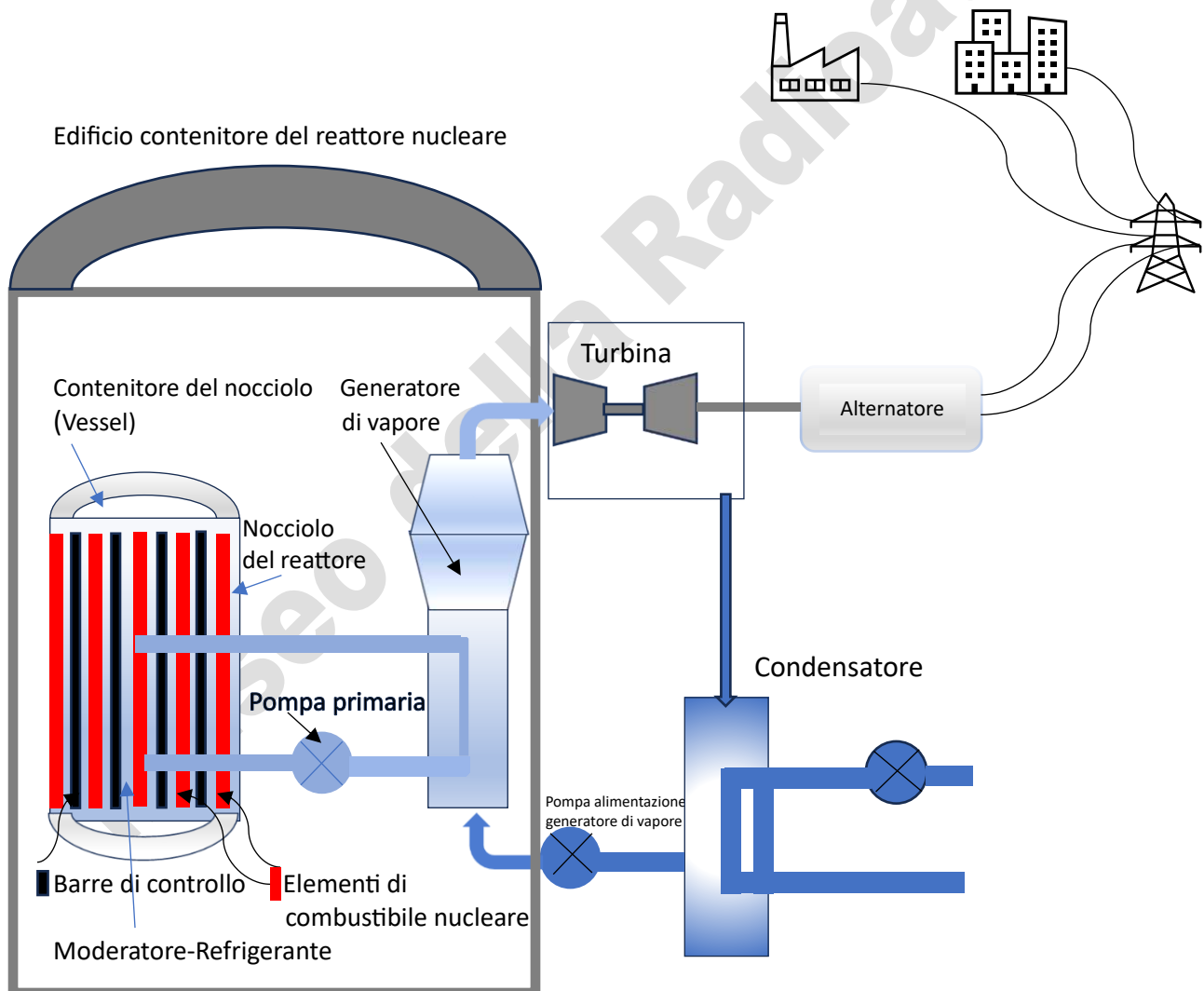
L'energia nucleare, i reattori nucleari a fissione e le loro principali caratteristiche

ENERGIA NUCLEARE → energia che si origina da reazioni che avvengono nel nucleo degli atomi.

Un **reattore nucleare a fissione** è un impianto nel cui “nociolo” si sfruttano le reazioni nucleari indotte dai neutroni nel materiale fissile per produrre energia. La reazione a catena si sviluppa in modo controllato. Il fluido refrigerante a contatto degli elementi di combustibile contenenti il fissile si riscalda e genera vapore che si espande in una turbina collegata ad un alternatore che produce energia elettrica. È interessante notare i vari tipi di energia prodotta in un reattore nucleare:

nucleare → termica → meccanica → elettrica

Nonostante esistano diversi tipi di reattori nucleari, tutti presentano caratteristiche generali comuni.



In particolare, il nocciolo di un reattore nucleare è costituito dai seguenti elementi distintivi:



- *materiali combustibili*, tipicamente ossidi di uranio e di plutonio UO_2 , PuO_2 con diversi livelli di arricchimento isotopico, incamiciati in guaine che vanno a costituire l'elemento di combustibile nucleare
- *moderatori*, costituiti da nuclei a basso numero di massa, cosicché nell'urto elastico con essi i neutroni perdono molta della loro energia iniziale e *si termalizzano*, aumentando la probabilità di essere assorbiti dai nuclei di fissile e provocare la fissione. Tipici moderatori sono *l'acqua leggera* (H_2O), *l'acqua pesante* (D_2O) e la *grafite*
- *refrigeranti*, necessari per asportare l'energia termica prodotta dalle fissioni nell'elemento di combustibile. Le principali caratteristiche sono: buone proprietà termiche (alto calore specifico e coefficiente di scambio termico), bassa reattività chimica con i materiali combustibili e strutturali, bassa sezione d'urto di cattura neutronica e basso costo. Tipici refrigeranti sono *l'acqua leggera* (H_2O), *gas inerti* (He , CO_2) o *sodio liquido* nei reattori veloci
- *materiali di controllo* del flusso neutronico e quindi della reazione a catena. Sono costituiti da materiali che sono in grado di assorbire i neutroni in eccesso rispetto a quelli necessari per l'autosostentamento della reazione a catena, tipicamente Boro e Cadmio;
- *materiali strutturali e di rivestimento delle guaine di combustibile*, le cui principali caratteristiche sono: buone proprietà meccaniche anche ad alta temperatura e sotto irraggiamento neutronico, compatibilità con il combustibile nucleare e con il refrigerante, buone proprietà nucleari per ottenere un'accettabile economia neutronica. Tipici materiali strutturali sono acciaio inox e leghe di Zirconio

Va sottolineato il fatto che in molti reattori commerciali, moderatore neutronico e refrigerante sono lo stesso mezzo. Esempio: Acqua leggera.

Classificazione dei reattori nucleari

La prima fondamentale distinzione tra i vari tipi di reattori risiede *nell'energia cinetica dei neutroni* che inducono la fissione.

Reattori **TERMICI** → la reazione a catena è sostenuta da *neutroni termici* cioè neutroni con energia inferiore a 1 eV

neutroni termici → sono neutroni da fissione che vengono *rallentati* dal *moderatore*, i cui nuclei ne riducono l'energia fino ad un valore confrontabile con quella di agitazione dei nuclei del mezzo in cui si trovano. Si dice che sono in *equilibrio termico* con il mezzo stesso. Alla temperatura di 20 °C *l'energia termica* è pari a **0,025 eV**. Con questi valori, la probabilità per un neutrone di essere assorbito da un nucleo fissile e indurre fissione è estremamente elevata.

Reattori **VELOCI** → la reazione a catena è sostenuta da *neutroni veloci*, in assenza del moderatore
neutroni veloci → sono neutroni da fissione con energia media compresa tra 100 KeV e 10 MeV. Proprio per la loro elevata energia, la probabilità di essere assorbiti e indurre fissione è molto più bassa rispetto ai neutroni termici. Per questo motivo, nei reattori veloci è necessario aumentare la quantità di fissile e l'arricchimento

isotopico dell'uranio nel nocciolo, affinché la reazione a catena si autosostenga.

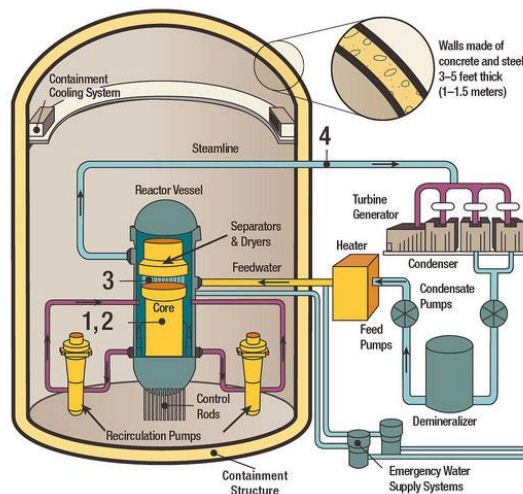
La seconda fondamentale distinzione viene fatta considerando se il combustibile nucleare sia in un'unica fase generalmente liquida con moderatore e refrigerante, ed allora si parla di Reattori **OMOGENEI**; oppure se combustibile nucleare, moderatore e refrigerante sono tra loro separati, in quest'ultimo caso si parla di Reattori **ETEROGENEI**.

Reattori Termici Eterogenei

La più importante filiera commerciale di reattori nucleari termici è quella che utilizza *acqua leggera* (**LWR light water reactor**) come fluido refrigerante e moderatore. Essi rappresentano circa il 90% dei reattori attualmente in esercizio. Appartengono a questa categoria i reattori ad acqua bollente **BWR Boiling Water Reactor** e quelli ad acqua pressurizzata **PWR Pressurized Water Reactor**.

Reattore ad acqua bollente - BWR

È un reattore moderato e refrigerato ad acqua leggera H₂O, cosiddetto a "ciclo diretto", in quanto la sua caratteristica principale consiste nel produrre direttamente nel nocciolo il vapore che successivamente verrà utilizzato in turbina per produrre energia elettrica, eliminando così la necessità di generatori di vapore separati. Uno dei suoi vantaggi è pertanto la semplicità costruttiva.



Funzionamento di un BWR

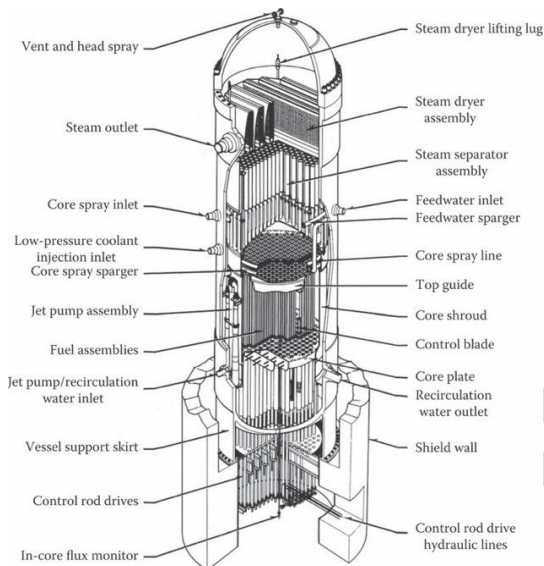
- nel nocciolo del reattore si produce energia termica a seguito delle fissioni;
- l'acqua di alimentazione alla temperatura di circa 250°C viene immessa nel nocciolo dal basso verso l'alto ad una pressione di circa 7 Mpa, assorbe il calore prodotto e si riscalda fino a raggiungere, ad una certa altezza, la temperatura di saturazione di circa 280°C formando da quel punto in poi una miscela acqua-vapore con un titolo medio del 15%.
- la miscela acqua-vapore entra in un separatore/essiccatore dove la parte liquida è rimossa prima che il vapore entri nella linea del vapore;



- il vapore viene inviato alla turbina, dove si espande producendo energia meccanica. Alla turbina è accoppiato un alternatore che produce energia elettrica;
- all'uscita della turbina il vapore passa in un condensatore, collegato a delle torri di raffreddamento, torna in fase liquida che viene nuovamente pompata nel nocciolo mescolandosi all'acqua di ricircolo del nocciolo stesso.

Il livello di potenza del nocciolo è regolabile modificando la portata di ricircolo attraverso il nocciolo senza cambiare la posizione delle barre di controllo. Il BWR è l'unico reattore ad acqua leggera che impiega barre di controllo che entrano nel nocciolo dal fondo del vessel. Questa caratteristica si dimostra estremamente vantaggiosa nel caso del cosiddetto "refueling", vale a dire nel ricambio degli elementi di combustibile esauriti con quelli freschi, in quanto può avvenire dall'alto previa rimozione della calotta superiore, senza interferire con i componenti interni.

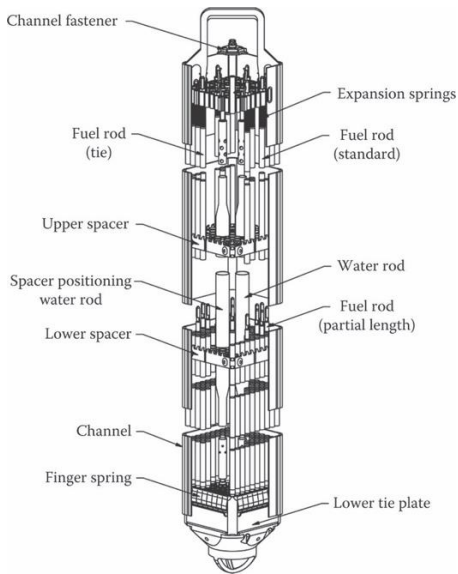
Caratteristiche costruttive e di funzionamento tipiche di un BWR



Pressione di esercizio, MPa	7
Potenza termica, MWth	3500
Potenza elettrica, MWe	1200
Efficienza termica, %	34
Diametro/altezza del nocciolo, m	~ 4,9/4,3
Diametro/altezza/spessore del vessel, m	~ 7,5/20/0,16
Materiale del vessel	Acciaio al carbonio
Rivestimento/Internals del vessel	Acciaio inox
Numero di elementi di combustibile	748
Numero barre di controllo	177
Temperature ingresso/uscita refrigerante, °C	~ 275/295
Portata d'acqua di refrigerazione, kg/s	~ 1800
Portata di vapore, kg/s	~ 1800
Temperatura del vapore, °C	~ 295

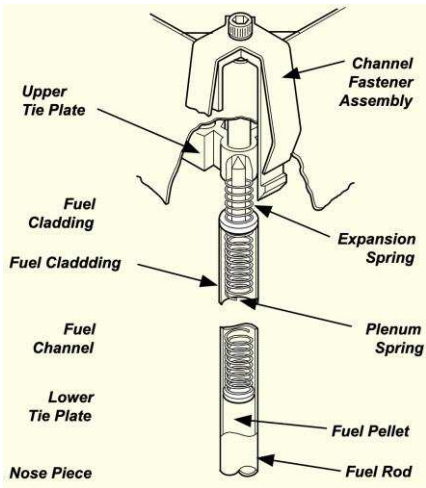
Caratteristiche di un elemento di combustibile BWR

Arricchimento medio pellet UO ₂ , %	2 – 5%
Diametro esterno pellets UO ₂ , mm	10,22
Diametro esterno della barretta, mm	12,3
Spessore incamiciatura, mm	0,81
Passo medio tra barrette in un elemento, mm	14,27
Altezza totale della barretta, m	4,070
Altezza attiva del combustibile in una barretta, mm	3800
Numero barrette per elemento 10x10	100
Peso approssimativo di un elemento, kg	280
Materiali	
Combustibile: pastiglie sinterizzate di UO ₂	
Incamiciatura barrette: Zircaloy-2	
Incamiciatura elemento di combustibile: Zircaloy-4	
Strutture di supporto: acciaio inox	
Barre di controllo	B ₄ C carburo di boro
Incamiciatura delle barre di controllo	Piastre di acciaio inox a forma di croce

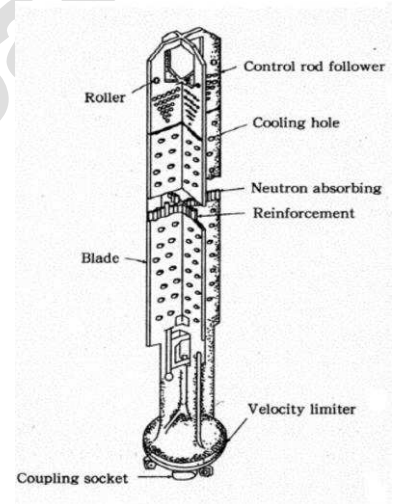


Barretta di combustibile

Barra di controllo



Pellet di UO_2



Impianto BWR di Caorso (Pc)



Impianto BWR di Garigliano. Sessa Aurunca (Na)