



Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
Commissione Ricerca e Reattori Innovativi
Area Nucleare

Seminario

**“La sostenibilità energetica delle tecnologie per la IA, una
ulteriore motivazione per rilanciare l’energia elettronucleare in
Italia”**

A cura degli Ingg.

Massimo Sepielli e Alessandra Di Pietro

Mercoledì, 28 maggio 2025

Indice degli argomenti

1. La domanda crescente di energia a livello mondiale per la transizione digitale: l'esigenza di coniugare efficienza e sostenibilità ambientale;
2. Concetti base dei reattori nucleari e dell'ingegneria nucleare;
3. Reattori nucleari di potenza “Large scale” e reattori “SMR”;
4. Panoramica sui reattori SMR oggi in commercio e in via di sviluppo;
5. Applicazioni tipiche per reattori SMR (propulsione, calore industriale, dissalazione, produzione termoelettrica per reti locali);
6. Applicazione degli SMR dedicata ad utenze concentrate energivore: i Data Center per l'IA;
7. Le necessità energetiche dei Data Center per l'IA oggi in operazione e gli attuali sistemi energetici che li sostengono;
8. L'impatto dei Data Center sulla richiesta di energia in rete;
9. Fattibilità teorico-pratica, normativa e sociale dell'impiego di SMR ed esempi internazionali.





1. La domanda crescente di energia a livello mondiale per la transizione digitale: l'esigenza di coniugare efficienza e sostenibilità ambientale

Ingg. Massimo Sepielli e Alessandra Di Pietro

Seminario - La sostenibilità energetica delle tecnologie per la IA, una ulteriore motivazione per rilanciare l'energia elettronucleare in Italia

1. L'obiettivo della transizione tecnologica, energetica ed ecologica: *decarbonizzazione e trasformazione digitale*

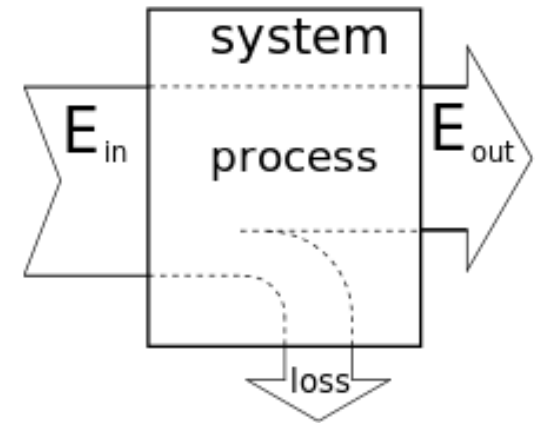


Una **realità digitalizzata** in ogni settore, implicherà una **trasformazione della società e dell'economia** che dovrà coniugare il **fabbisogno crescente di energia (che dovrà essere costantemente disponibile)**, l'**efficienza energetica**, una **realità tecnologica avanzata** e la **sostenibilità ambientale**.

L'edilizia, l'industria, il terziario, i servizi digitali e i trasporti, impattando in modo considerevole, in diversa misura, sui **consumi energetici e sull'immissione di inquinanti in atmosfera**, assumono un ruolo fondamentale in questa fase di transizione.

1. Il concetto di efficienza energetica della tecnologia preposta alla produzione di energia

Una tecnologia energetica risulta realmente efficiente quando **l'energia primaria**, a fronte della trasformazione, **garantisce una energia finale massima con il minimo impiego di combustibile e con perdite il più possibile contenute** e quando il suo funzionamento sia **in sinergia con la potenzialità del territorio e della rete di distribuzione dell'energia**.



Fonte: wikipedia.org/wiki/efficienza_energetica

Il bilancio costi-benefici di una fonte energetica e della tecnologia preposta per il suo utilizzo deve trovare sempre un giusto compromesso tra fattori tecnologici e socio-economici. Tra questi:

- **Sicurezza**
- **Basso rischio per l'ambiente**
- **Efficienza e disponibilità costante**
- Semplicità di gestione del sistema energia nel suo complesso
- **Durevolezza**
- Costi economici accettabili e ritorno dell'investimento nel lungo termine
- **Indipendenza di approvvigionamento delle materie prime**
- Crescita economica e sviluppo tecnologico

1. Il mix energetico italiano: richiesta e consumi di energia elettrica

L'energia elettrica totale richiesta in rete è pari a **318,6 TWh** (con perdite in rete di circa **21,2 TWh**), di cui l'**88%** è prodotto internamente e il restante **12%** importato dall'estero. L'importazione di elettricità è di circa **44 TWh annui**.

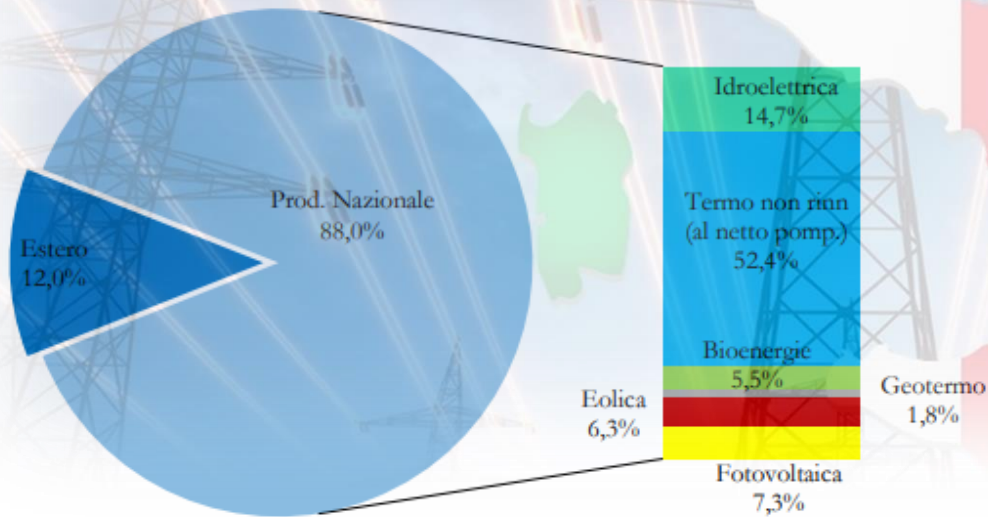
I **44 TWh annui** di elettricità importati dall'estero sono prodotti da energia nucleare:

- 15,2 TWh provengono dalla Francia (il 5% circa);
- 28,2 TWh provengono dalla Svizzera (l'8,9% circa);
- 5,2 TWh provengono dalla Slovenia, 1,2 TWh dall'Austria.

Fonti: Ministero dello Sviluppo Economico - GSE - Eurostat

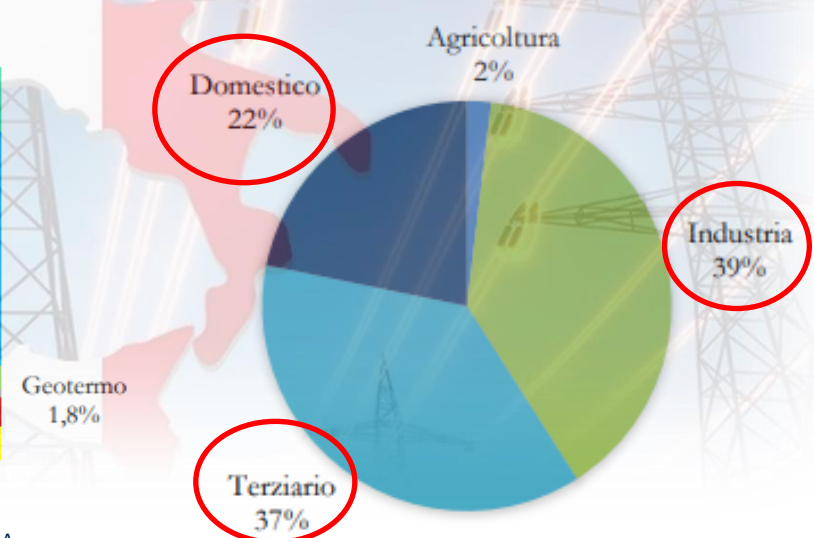
Dati aggiornati al 2019

Produzione energia elettrica per fonte - anno 2019

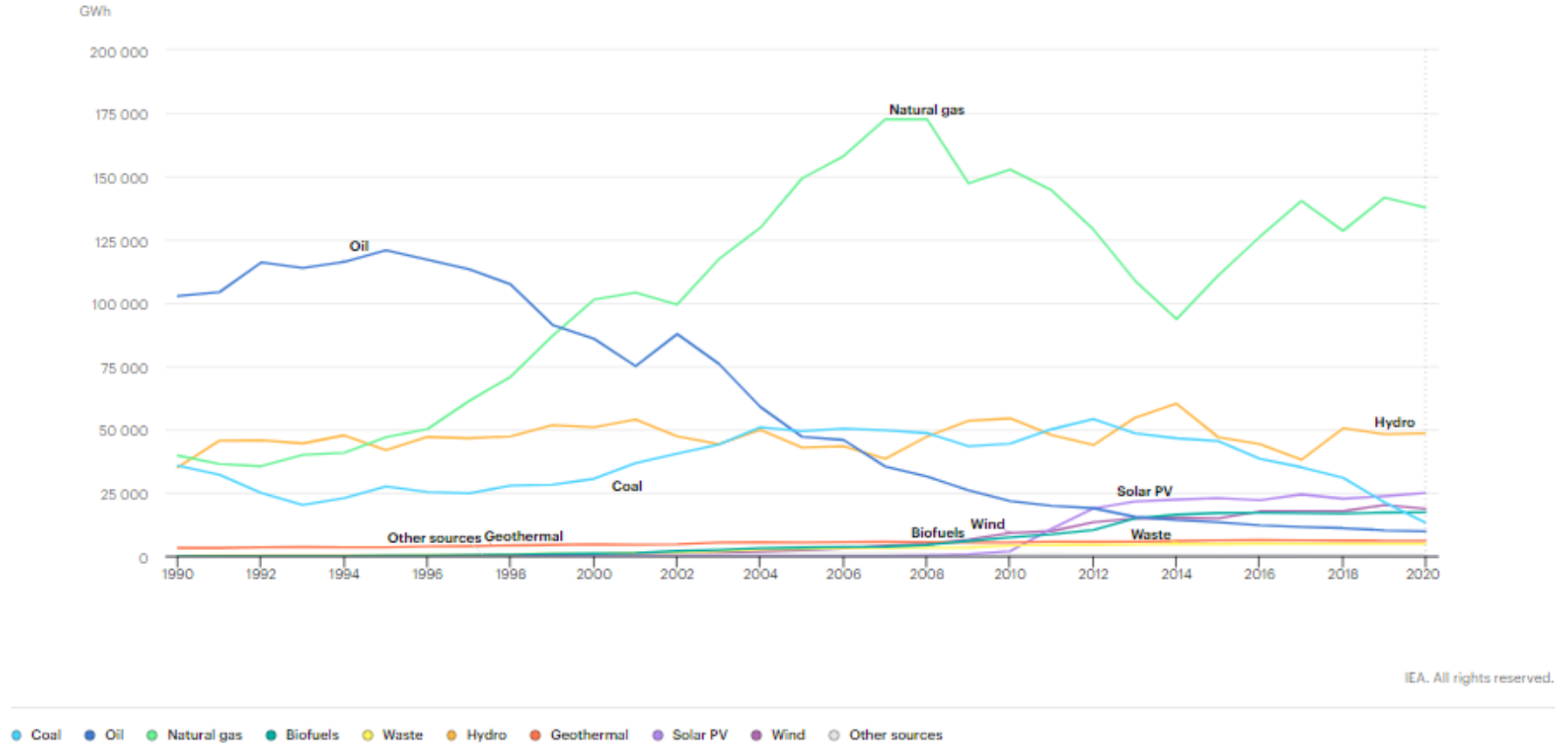


Fonte: Terna

Consumi elettrici per settore - anno 2019



1. Elettricità prodotta in Italia per fonte dal 1990 al 2020



L'utilizzo di **gas naturale** per la produzione di energia elettrica è **aumentato notevolmente** con un **picco massimo nel 2008**. In **calo netto** l'utilizzo del **petrolio**. Si attesta **costante** l'utilizzo dell'**idroelettrico** e si registra un **sensibile aumento delle rinnovabili** nell'ultimo decennio.

1. La potenza elettrica istantanea richiesta in rete in Italia

La potenza elettrica istantanea richiesta in rete è pari a circa **50.000 MW** da garantire nell'arco delle 24 ore (**15.000 MW nelle ore notturne**) e le centrali italiane esistenti sono in grado di erogare oltre 120 GW di potenza massima netta.

Fonte: Enel -Terna

La richiesta di energia elettrica è destinata a subire nel prossimo futuro un **aumento considerevole** in relazione a diversi fattori. Tra questi:

- la forte **spinta alla digitalizzazione** (servizi digitali, **Data Center**, **AI**, smart city, telecomunicazioni, etc.);
- **crescita demografica** (flussi migratori, etc.);
- **trasporto elettrico** (autovetture **elettriche**).

TABELLA MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO

Tabella 9: Consistenza parco veicolare elettrico e consumi di energia elettrica su strada

	2017	2018	2019*
Consistenza parco veicolare alimentato ad energia elettrica (**)	20.070	30.426	49.949
- di cui autovetture BEV (elettriche pure)	7.560	12.156	22.728
- di cui autovetture PHEV (ibride plug-in)	5.268	9.871	16.313
- di cui altri veicoli (motocicli, autocarri, filobus, autobus)	7.242	8.399	10.908
Energia elettrica complessiva consumata su strada - GWh	82,9	99,0	136,6
Energia elettrica rinnovabile consumata su strada - GWh (***)	27,8	33,7	46,6

(*) Stime preliminari

(**) Elaborazioni GSE su dati ACI, ANFIA, Aziende di Trasporto Pubblico Locale.

(***) In ciascun anno t, il dato è calcolato applicando ai consumi complessivi la quota FER nel settore elettrico dell'anno t-2.

Fonte: GSE



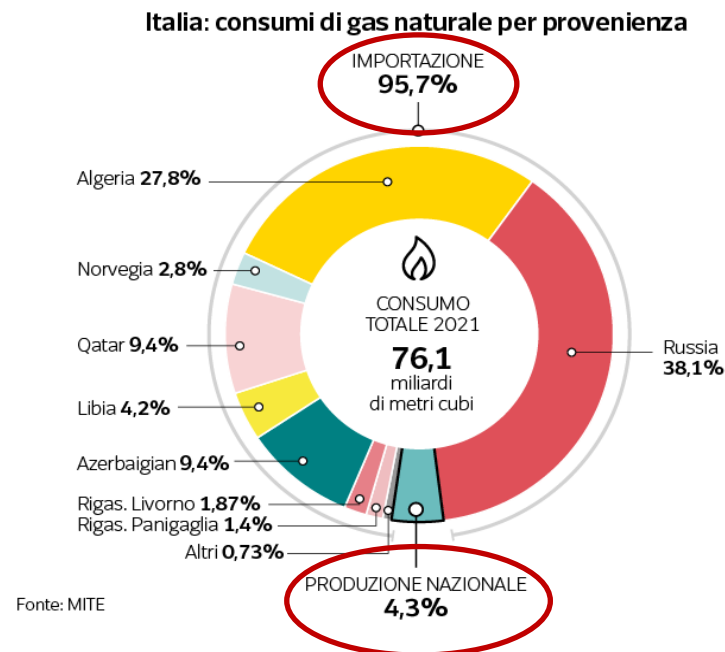
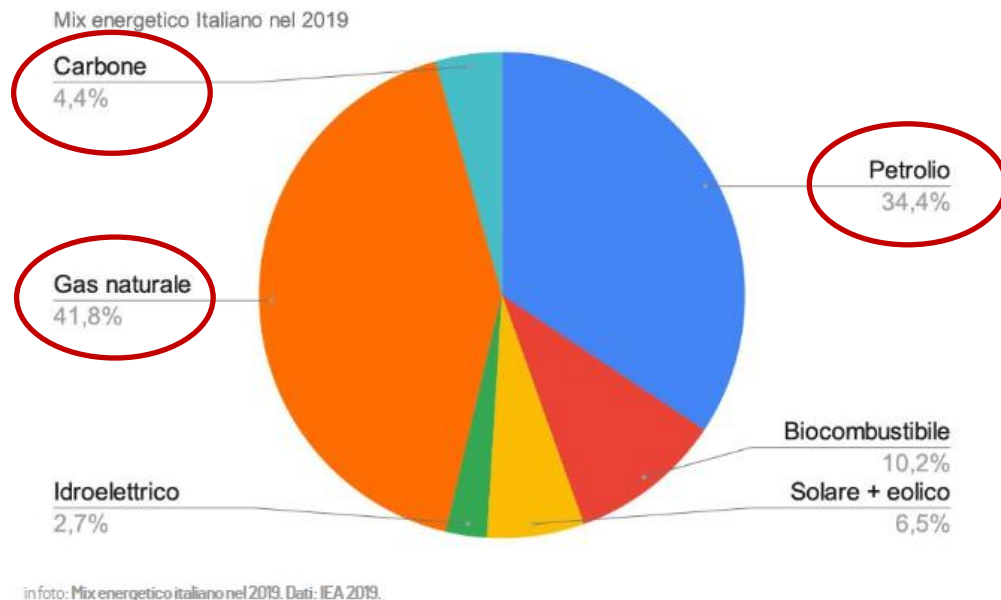
Fonte: qualenergia.it/articoli/mercato-globale-auto-elettriche

2035, stop graduale ai motori a combustione interna (MITE)

1. Il mix energetico italiano: le fonti impiegate

Le fonte primaria impiegata per produrre energia (elettrica e termica) è il **gas naturale (41,8%)** seguita dal **petrolio (34,4%)** per un totale di circa il **76% di utilizzo di fonti fossili**.

Sommando la percentuale di **carbone del 4,4%** arriviamo **all'80% di fonti fossili impiegate**.



I NUMERI DELLA DIPENDENZA ENERGETICA

La quasi totalità dei consumi energetici del nostro Paese dipendono per il **95,7% dal gas naturale**, dal **95% dal petrolio importati**, dal **12% dal nucleare estero**.

Nel 2019 la quota delle importazioni nette rispetto al fabbisogno energetico nazionale è stata del 74,7%.

1. Impatto ambientale delle fonti energetiche fossili (petrolio-gas-carbone)

GLI OBIETTIVI DA RISPETTARE A LIVELLO COMUNITARIO

- **Tassonomia europea**, ossia la classificazione degli investimenti ritenuti sostenibili per raggiungere la **neutralità climatica** nei prossimi 30 anni. Regolamento sulla Gazzetta Ufficiale UE 22/06/2020. **Apertura a gas naturale, biogas e nucleare.**
- **Stop graduale ai motori a combustione interna (MITE).**

Alcuni inquinanti derivanti dai processi di combustione dei fossili (petrolio-gas-carbone):

- Idrocarburi parzialmente ossidati (insaturi, aromatici, etc.);
- Idrocarburi ossigenati (alcoli, aldeidi, chetoni, acidi carbossilici);
- Monossido di carbonio CO;
- Ossidi di azoto (monossido di azoto NO e biossido NO₂);
- Oligoelementi (derivati) quali SO_x, P₂O₅, alogenati, etc.;
- Ceneri e polveri inorganiche;
- Particolato (PM_{xx}): la classe di composti presenti nei gas di scarico in fase condensata.

E' opportuno evidenziare anche la **cospicua immissione in ambiente di anidride carbonica da parte di queste fonti fossili e che il metano non combusto (perdite) è un potente gas serra**. Il suo effetto, in termini di riscaldamento dell'atmosfera, è circa 80 volte superiore a quello della CO₂ nei primi 20 anni dopo l'emissione.

1. Bilancio energia; richiesta di energia elettrica in Italia nell'anno 2022

Bilancio Energia

[GWh]	Dicembre 2022	Dicembre 2021	%22/21	Gen-Dic 22	Gen-Dic 21	%22/21
Idrico Rinnovabile	2.299	2.824	-18,6%	27.959	44.878	-37,7%
Pompaggio in produzione ⁽²⁾	122	228	-46,6%	1.773	2.041	-13,1%
Termica	17.066	18.167	-6,1%	193.287	182.234	6,1%
di cui Biomasse	1.412	1.474	-4,2%	17.120	17.496	-2,1%
di cui Carbone	2.161	1.509	43,2%	20.768	12.868	61,4%
Geotermica	460	469	-1,9%	5.444	5.535	-1,6%
Eolica	1.720	2.836	-39,4%	20.358	20.724	-1,8%
Fotovoltaica	818	988	-17,2%	27.552	24.633	11,8%
Totale produzione netta	22.485	25.512	-11,9%	276.373	280.045	-1,3%
Energia destinata ai pompaggi	174	326	-46,6%	2.533	2.916	-13,1%
Totale produzione netta al consumo	22.311	25.186	-11,4%	273.840	277.129	-1,2%
di cui FER ⁽³⁾	6.709	8.591	-21,9%	98.433	113.266	-13,1%
di cui non FER	15.602	16.595	-6,0%	175.407	163.863	7,0%
Importazione	3.323	2.877	15,5%	47.391	46.572	1,8%
Esportazione	661	603	9,6%	4.404	3.782	16,4%
Saldo estero	2.662	2.274	17,1%	42.987	42.790	0,5%
Richiesta di Energia elettrica (1)	24.973	27.460	-9,1%	316.827	319.919	-1,0%

(1) Richiesta di Energia Elettrica = Totale produzione netta al consumo + Saldo estero, dove Totale produzione netta al consumo = Totale produzione netta – energia destinata ai pompaggi
(2) Quota di produzione per apporto da Pompaggio, calcolata con il rendimento medio teorico dal pompaggio in assorbimento
(3) Produzione da FER = Idrico Rinnovabile + Biomasse + Geotermico + Eolico + Fotovoltaico

Fonte: Terna

I 38,8 GWe di tecnologie rinnovabili ad oggi installate in Italia (escluso l'idroelettrico) equivalgono ad una produzione teorica annuale di circa 339888 GWh (38,8x365x24).

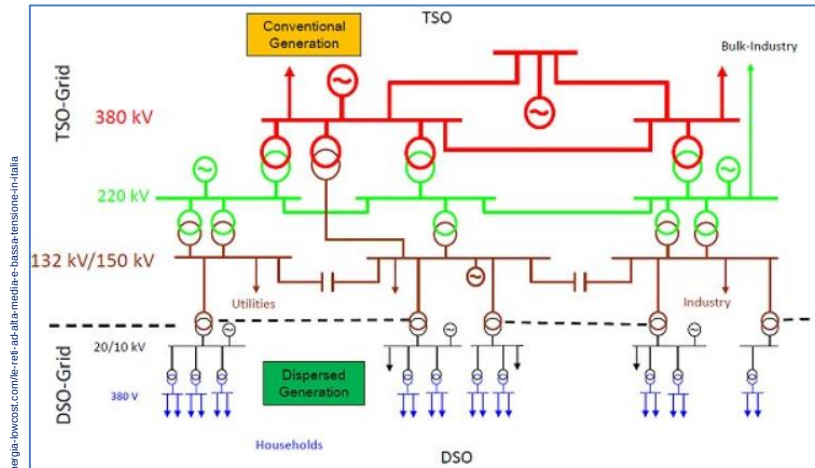
Dalla tabella Bilancio Energia anno 2022 si evince, tuttavia, che i 38,8 GWe corrispondono, tenendo conto dei parametri di funzionamento caratteristici delle FER (escluso l'idroelettrico), ad una produzione netta di energia di circa 70474 (98433-27959) GWh, ossia circa il 20% della suddetta produzione teorica annuale.

1. La potenzialità della rete elettrica nazionale: la gestione delle sottoreti in un sistema complesso e integrato

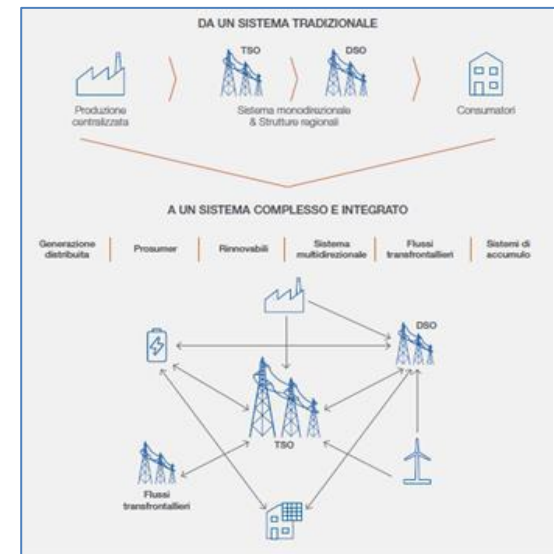
La rete deve garantire, istante per istante, che l'energia richiesta dai consumatori (famiglie, aziende, industrie, etc.) sia sempre in equilibrio con l'energia prodotta.

L'incremento delle reti e delle sottoreti derivanti dall'utilizzo delle fonti rinnovabili (solare-fotovoltaico, eolico, cogenerazione) su larga e piccola scala **comporterà la conseguente esigenza di far fronte contemporaneamente a svariate problematiche** quali, ad esempio:

- la gestione complessa della produzione di energia elettrica e degli accumuli anche **in relazione alla variazione di potenza da fonti rinnovabili non programmabili, quali fotovoltaico ed eolico**;
- l'adeguamento della rete di distribuzione (unidirezionale) dell'energia elettrica;
- l'inquinamento elettromagnetico dovuto agli apparati elettronici di controllo;
- la messa in sicurezza della rete di distribuzione dai **cyber-attacchi**;
- i costi diretti e indiretti di adeguamento del sistema in toto e di manutenzione.



Schema della rete elettrica italiana: rete di trasmissione ad altissima e alta tensione (bidirezionale) in alto e di distribuzione (unidirezionale) a tensioni più basse in basso.



Fonte: Terna

1. La stabilità della rete elettrica nazionale

Un aumento di FER e della relativa elettronica di potenza richiederà una attenta valutazione del loro impatto in termini di stabilità della frequenza di rete dovuta ad una progressiva **riduzione dell'inerzia rotante (motori e turboalternatori) al diminuire di impianti di generazione termica**.

Si dovranno, inoltre, adottare soluzioni specifiche in grado di garantire la stabilità della frequenza di rete a seguito di eventi perturbativi poiché la rete elettrica non può offrire lo stesso livello di stabilità se il contributo delle FER aumenta oltre un certo livello (fattore di carico). Questa evidenza prescinde dalla funzionalità e dalla qualità della rete elettrica nazionale che deve essere considerata una infrastruttura solida, resiliente e ad alta intensità di potenza.

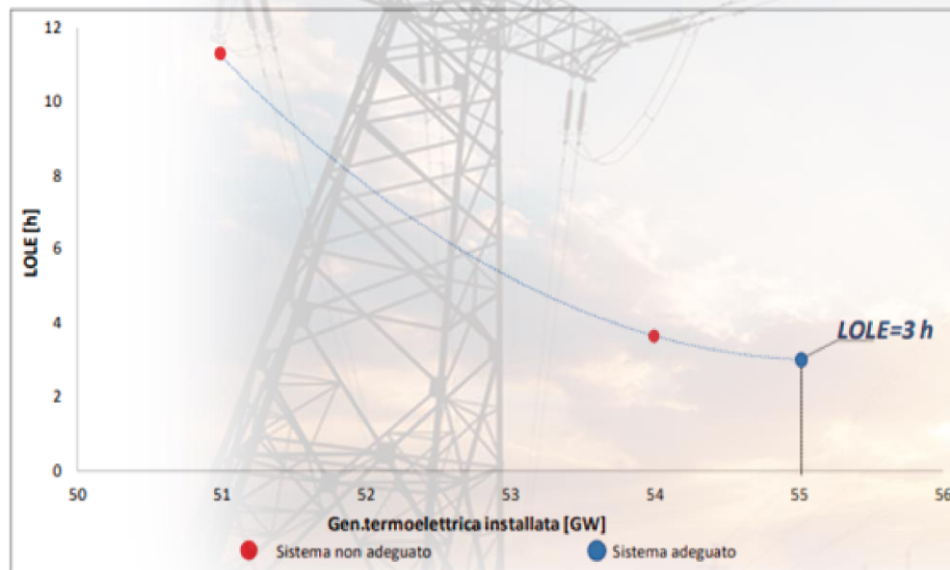


Figura 19 - RAPPORTO ADEGUATEZZA ITALIA 2019 - Fonte: TERNA

L'indicatore di adeguatezza denominato «**aspettativa di perdita di carico - Loss of Load Expectation - LOLE**» ovvero la media matematica (attesa) del numero di ore in cui si verifica un distacco di carico, **è fissato a 3 ore per anno (DM del 28/06/2019 MISE)**.

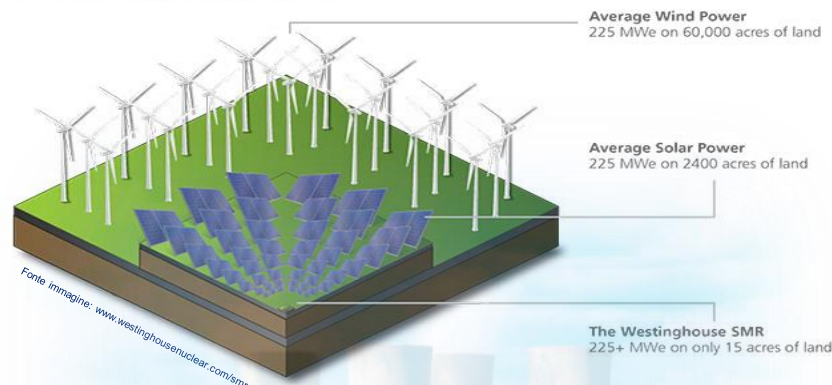
La capacità di generazione termoelettrica necessaria per garantire un sistema adeguato risulta pari a 55 GWe.

Per un utile confronto si riportano le aspettative del Piano Nazionale Integrato Energia Clima - PNIEC 2030:

- Rinnovabili non programmabili circa **69 GWe**.
- 6 GWe di capacità di accumulo.
- Domanda complessiva pari a 330TWh.
- Uscita totale dal carbone.

1. Potenze elettriche da FER (fotovoltaico, eolico e biomassa) e da nucleare a confronto in termini di erosione del territorio e resa energetica

Clean Energy Comparison



In un progetto energetico è importante mettere in relazione anche la disponibilità di territorio in termini di superficie con la scelta delle tecnologie in grado di produrla.

L'indipendenza energetica non deve eludere quella derivante dagli altri utilizzi del territorio; ad esempio l'utilizzo delle zone destinate a verde (agricoltura, allevamento, etc.).

- ❑ Una centrale nucleare da 1000 MWe come ordine di grandezza occupa qualche **decina di ettari di terreno**.

Il fattore di capacità è di circa il 90% e non è legato alle condizioni climatiche e geomorfologiche del territorio.

- ❑ Un campo fotovoltaico da 1000 MWe come ordine di grandezza occupa **migliaia di ettari di terreno**.

Il fattore di capacità è di circa il 13%.

- ❑ Un campo eolico da 1000 MWe come ordine di grandezza occupa **migliaia di ettari di terreno** in misura superiore al fotovoltaico con un ingente consumo di acciaio e calcestruzzo (*centinaia di tonnellate di acciaio e migliaia di tonnellate di calcestruzzo per generatore eolico*).

Il fattore di capacità è di circa il 22%.

- ❑ Un impianto di cogenerazione a biomassa per produrre 1000 MWe ha bisogno di bruciare il raccolto di **migliaia ettari di terreno**.

1. Il mix energetico ottimale in Italia

Dalle valutazioni ambientali e strategiche preliminari condotte basate **sull'analisi del territorio, sulla stima delle materie prime e sul fabbisogno energetico in termini di TWh** scaturisce la seguente proposta progettuale di mix energetico da attuarsi in step progressivi nel medio e lungo termine in cui tutte le fonti sono adeguatamente utilizzate e l'intermittenza delle FER bilanciata (dal Quaderno Io Roma N. 4S/2023)

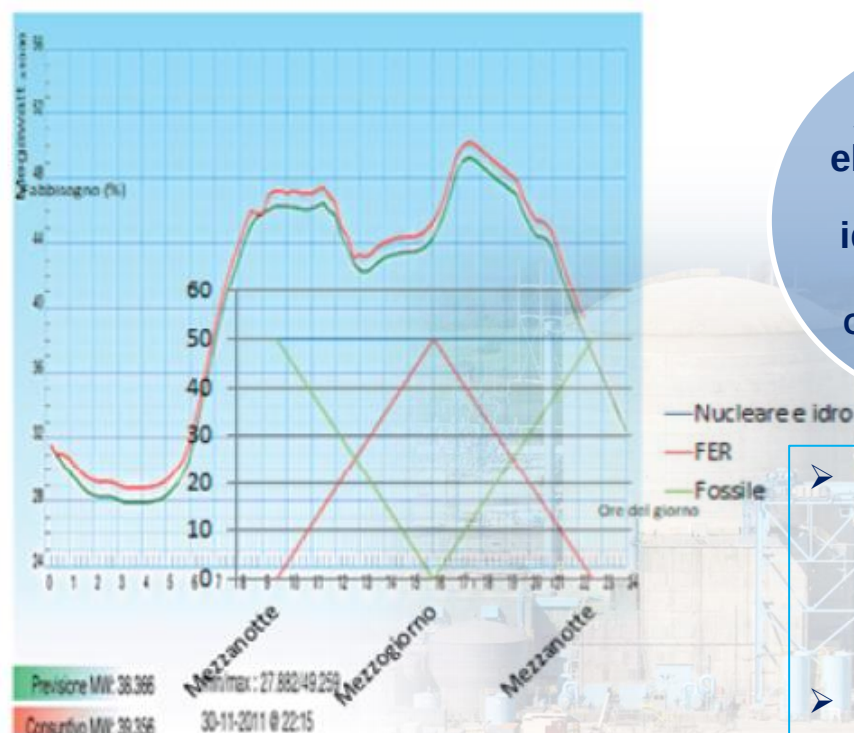


Figura 18 - Mix ottimale ingegneristico della produzione elettrica in Italia - Fonte: Ing. Massimo Sepielli - Commissione Ricerca e Reattori Innovativi - Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma

**50% Energia
elettronucleare
da fissione e
idroelettrico =
25 GWe**

CARICO DI BASE

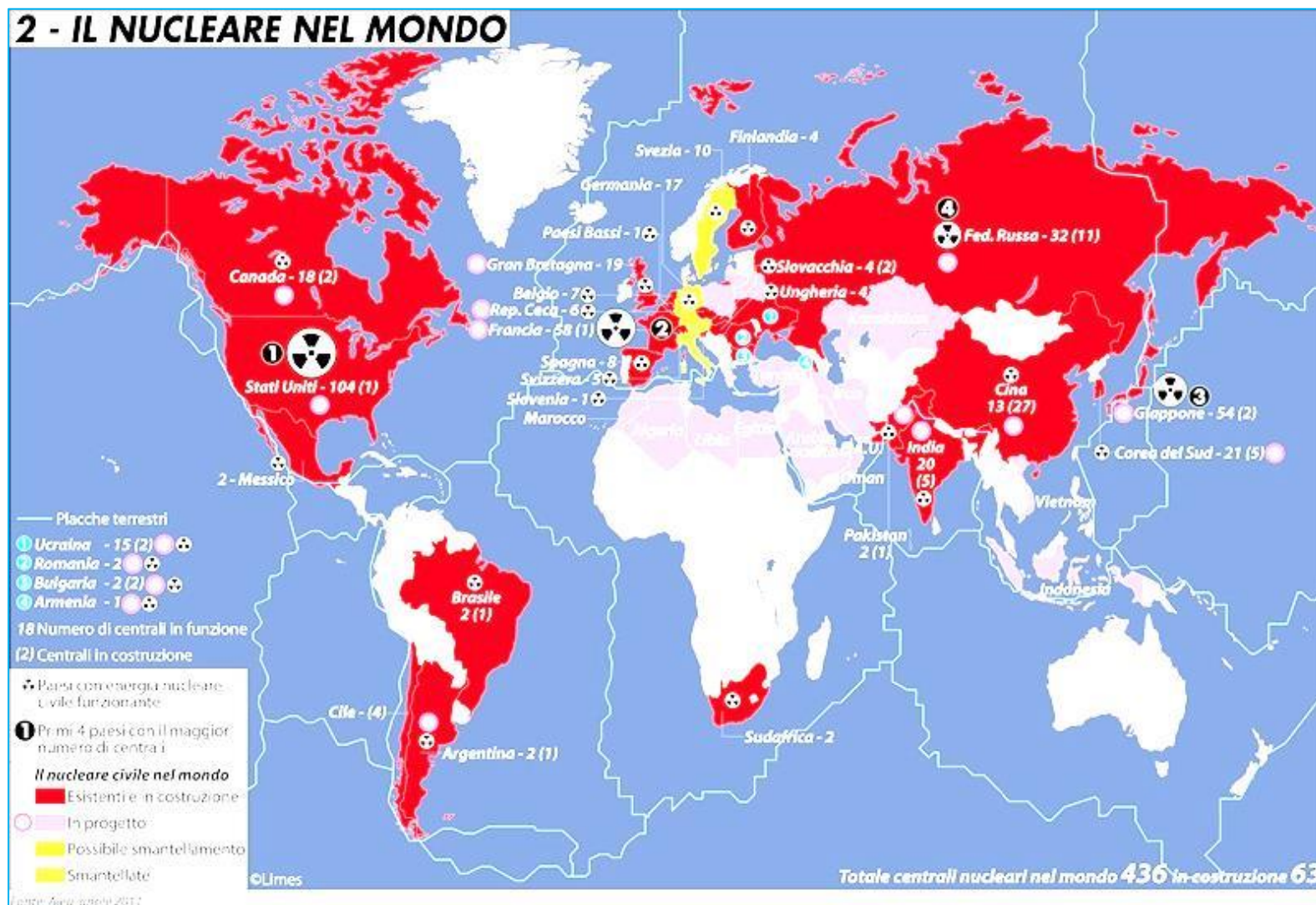
50 GWe

**Picco potenza
massima
giornaliera
richiesta**

**50% Energia da
fonti rinnovabili
(solare fotovoltaico,
geotermia, eolico,
biogas) e fonti fossili
(gas naturale,
petrolio, carbone, in
% minima e made in
Italy)
= 25 GWe**

- La **linea celeste orizzontale** rappresenta il **carico di base** delle fonti primarie: **energia elettronucleare e idroelettrica**. Entrambe energie prontamente disponibili, decarbonizzate e a bassa immissione di inquinanti in atmosfera.
- La **linea viola** con punto di massima alle ore 12.00 a.m. ovvero **la parte variabile non programmabile rappresenta l'energia prodotta dalle FER.**
- La **linea verde** con punto di minimo alle ore 12,00 a.m. rappresenta **l'energia prodotta dalle altre fonti fossili.**

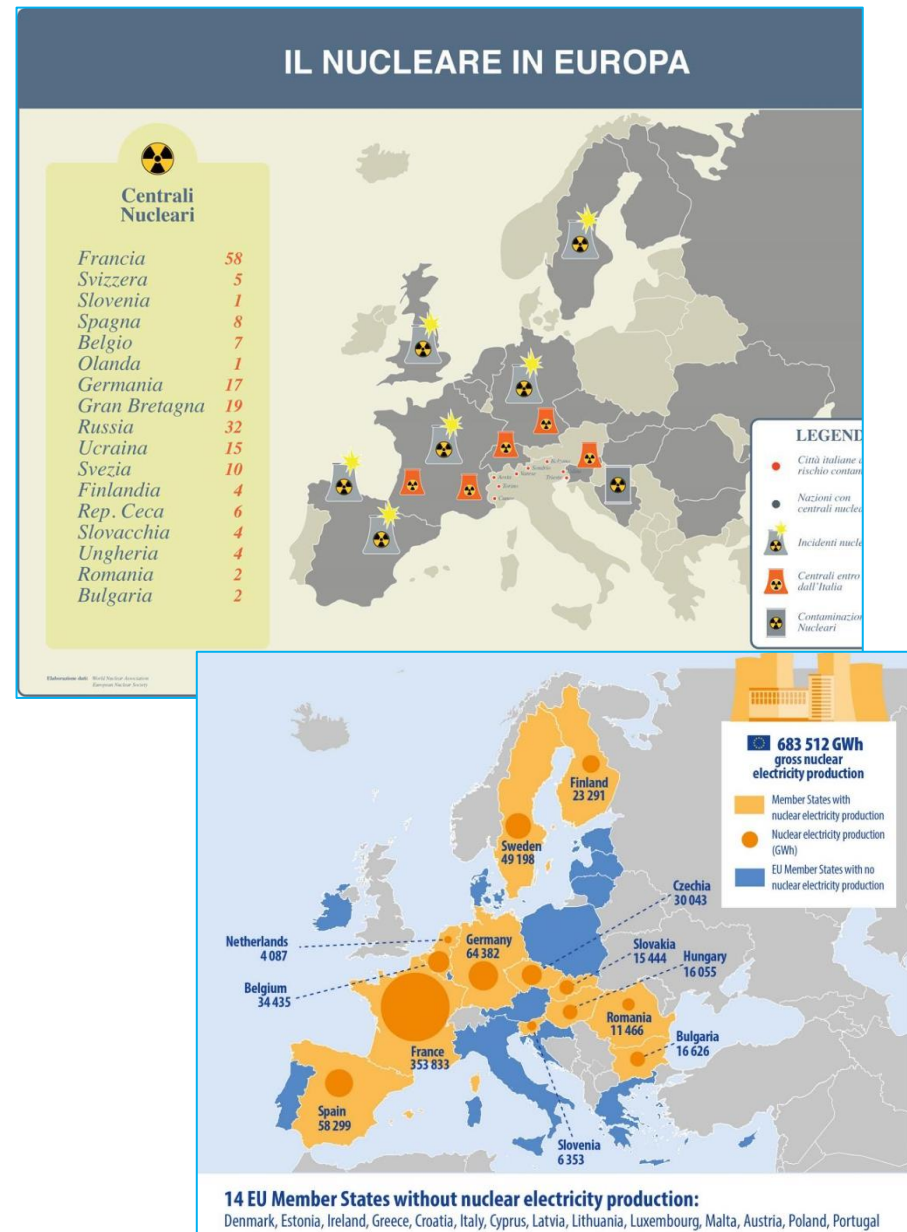
1. L'energia nucleare da fissione nel mondo



1. Il nucleare in Europa

Energia nucleare in Europa

- 106 Centrali elettronucleari
- Circa 100 GWe
- Francia 80%
- Svezia 50%





2. Concetti base dei reattori nucleari e dell'ingegneria nucleare

Ingg. Massimo Sepielli e Alessandra Di Pietro

Seminario - La sostenibilità energetica delle tecnologie per la IA, una ulteriore motivazione per rilanciare l'energia elettronucleare in Italia

2. Gli isotopi dell'uranio e la reazione nucleare di fissione

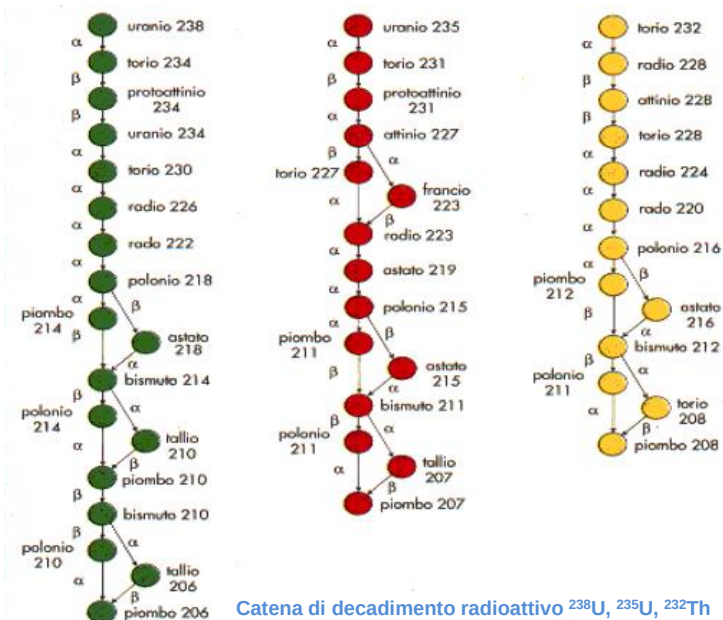
La reazione nucleare di fissione, alla base del funzionamento del reattore nucleare a fissione, consiste nella **scissione di un nucleo sotto «bombardamento» neutronico**.

Tutti i nuclei di elementi pesanti, se colpiti da neutroni di energia elevata, possono essere fissionati, ossia «divisi».

Gli elementi definiti **fissili**, invece, **possono essere fissionati da neutroni di tutte le energie**.

L'unico elemento fissile presente in natura è l'**Uranio (U)**, costituito da una miscela di isotopi: ^{238}U , ^{235}U , ^{234}U tutti con numero atomico (numero di protoni) pari a 92.

Di questi tre isotopi, solo l' ^{235}U è fissile (fissionabile con neutroni di tutte le energie), mentre l' ^{238}U (presente in natura per circa il 99,28%) **subisce fissione soltanto con neutroni veloci**. Altri isotopi **fissili** possono essere creati **artificialmente**, come il **Plutonio**, nelle due forme isotopiche ^{239}Pu , ^{241}Pu per conversione dell' ^{238}U a seguito di cattura neutronica, o l' ^{233}U per conversione del Torio ^{232}Th .



Un isotopo è un **atomo di uno stesso elemento chimico avente lo stesso numero atomico Z (protoni) e differente numero di massa (somma dei protoni e dei neutroni che costituiscono il nucleo)**.

Gli atomi di uno stesso elemento possono avere un diverso numero di neutroni, dando origine a diversi isotopi dello stesso elemento. Se l'isotopo è radioattivo (non è stabile), si parla di radioisotopo o anche di radionuclide.

2. La reazione di fissione a catena

Questa reazione può essere considerata **una successione di reazioni di fissione di nuclei**. **Si realizza** se esistono le condizioni «favorevoli», affinché il processo a catena riesca ad autosostenersi, ossia se **uno dei neutroni generati da una fissione sarà in grado di fissionare un ulteriore nucleo di ^{235}U** .

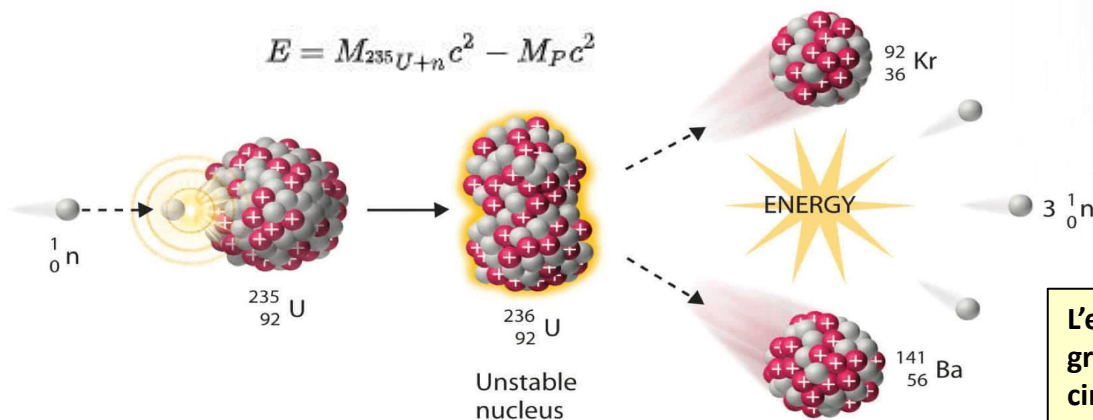
Ad esempio, **un nucleo di ^{235}U , «colpito» da un neutrone, si spezza in 2 nuclei più leggeri**, aventi masse diverse ma simili (chiamati **frammenti di fissione**), che a loro volta emetteranno per decadimento altre **radiazioni (beta, gamma, etc.)**, dando origine ai **prodotti di fissione**.

Verranno emessi anche 2 o più neutroni (in media, circa 2,5).

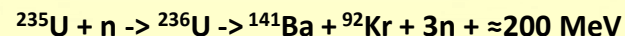
Dalla reazione si libera una notevole energia.

Per ogni fissione sono rilasciati circa 200 MeV di energia (pari a $3,2\text{E-}^{11}$ Joule).

Esempio di reazione nucleare di fissione



~ 178 MeV: frammenti di fissione;
~7 MeV: radiazioni β ;
~6 MeV: radiazioni γ ;
~10 MeV: neutroni ed altre radiazioni.



L'energia «generata» per ogni fissione sarà rilasciata in gran parte istantaneamente, soprattutto come energia cinetica, in parte sarà «immagazzinata» come energia potenziale, per i decadimenti successivi.

2. Il fattore di moltiplicazione e il controllo della reazione nucleare di fissione

Il **processo di fissione si genera** nel reattore nucleare (in inglese vessel), più precisamente al suo interno, **nel nocciolo** (in inglese core) **dove è alloggiato il combustibile** nucleare (parte in rosso in figura).

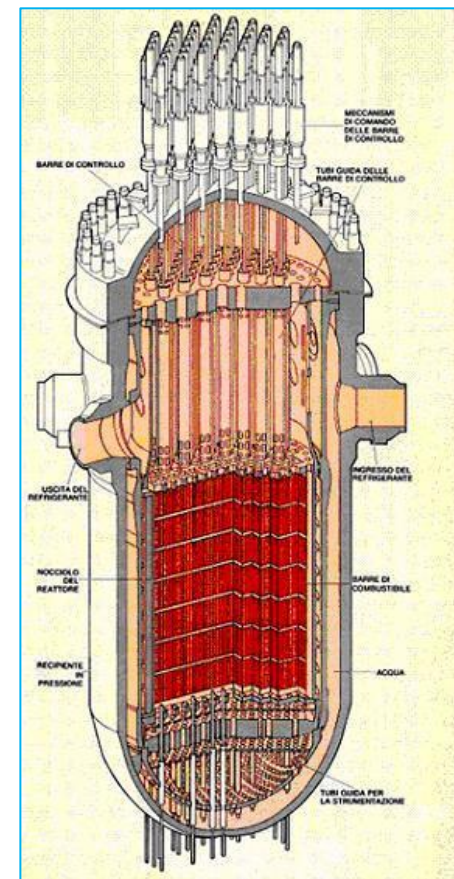
Un ruolo fondamentale viene svolto dai neutroni che, oltre a consentire la reazione a catena, hanno il ruolo di **autosostenerla**. Se si riesce a tenere il numero dei neutroni presenti in una generazione uguale a quello dei neutroni della generazione precedente, il processo di fissione risulta stabile.

- **La stabilità del sistema** si verifica quando la **quantità di materiale fissile, la geometria e i materiali di tutti i componenti del reattore, consentono, in sicurezza, la massima efficienza nello sfruttare i neutroni generati e di raggiungere la massa critica**, in corrispondenza della quale la reazione riesce ad autosostenersi.

- **K è il fattore di moltiplicazione ed è il fattore di controllo della reazione di fissione.**

Espresso come il **rapporto tra i neutroni presenti in una generazione e i neutroni presenti nella generazione precedente**.

Il suo valore **deve essere circa pari a 1 affinché ci sia il controllo della reazione a catena e dunque della potenza del reattore.**



Schema reattore nucleare

$k < 1$ la reazione si ferma
 $k = 1$ la reazione è stazionaria
 $k > 1$ la reazione è divergente

2. Gli elementi essenziali del reattore nucleare

Il reattore nucleare a fissione, come accennato, è **un sistema tecnologico** facente parte di un impianto nucleare a fissione (centrale nucleare), **dove si innesca, alimenta e controlla la reazione nucleare di fissione a catena**.

Il rilevante quantitativo di energia e quindi di calore generato al suo interno viene utilizzato, ai fini civili, per la produzione, nell'impianto nucleare, di energia elettrica e/o energia termica.

ELEMENTI DEL REATTORE NUCLEARE (a titolo esemplificativo ed in generale)

- ❑ **Combustibile;** Il combustibile nucleare è costituito da elementi fissili ^{235}U , ^{233}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu ed elementi fertili che possono trasformarsi in fissili in seguito a reazioni nucleari all'interno del reattore, ad esempio ^{238}U (fertile). In genere si trova nella forma di barre, comprendente il materiale fissile in cui si generano i neutroni atti a innescare e a mantenere la reazione di fissione.
- ❑ **Moderatore;** preposto al rallentamento dei neutroni (se si usa materiale fissile).
- ❑ **Refrigerante;** preposto alla rimozione del calore generato (un liquido, un vapore, una miscela bifase liquido-vapore o un gas).
- ❑ **Riflettore;** preposto, soprattutto nel caso dei reattori veloci (a neutroni veloci) a reindirizzare all'interno del nocciolo i neutroni che tendono a sfuggire.
- ❑ **Barre di controllo;** preposte al controllo della reattività ovvero della potenza (contengono materiale che assorbe i neutroni) e nella configurazione classica del reattore (ad esempio il reattore ad acqua pressurizzata - PWR) poste nella parte superiore del reattore.
- ❑ **Materiale strutturale;** garantisce la integrità fisica del reattore.

L'equilibrio di tutti gli elementi presenti nel reattore (vessel e core), il loro controllo e la loro regolazione, permettono il mantenimento e il controllo del processo di fissione.

2. La classificazione dei principali reattori nucleari

I reattori nucleari a fissione possono classificarsi in relazione all'energia dei neutroni che provocano la fissione.

REATTORI TERMICI

Utilizzano **neutroni lenti** ovvero «termici», **uranio naturale** o **arricchito** come combustibile ed un **moderatore**; appartengono a questa tipologia la maggior parte dei reattori.

Tra i reattori termici si distinguono:

- Reattori **refrigerati e moderati ad acqua leggera** **PWR** (Pressurized Light-Water Reactor) e **BWR** (Boiling Water Reactor) con recipiente in pressione;
- Reattori tipo **CANDU** (*Canadian Deuterium Uranium*): reattori nucleari **ad acqua pesante (deuterio)** pressurizzata e uranio naturale o **RBMK** (Reattore di grande potenza a canali) con tubi in pressione (ogni gruppo di barre di combustibile è dotato di un circuito di refrigerazione indipendente ad acqua leggera o pesante);
- Reattori **refrigerati a gas**, in cui il refrigerante è un gas inerte (elio, azoto, CO_2), il moderatore **grafite**.

REATTORI VELOCI

Utilizzano **neutroni veloci**, ovvero ad **alta energia**, per sostenere la reazione a catena, **combustibile arricchito** e possono essere concepiti in modo da risultare autofertilizzanti ossia in grado di produrre più materiale fissile di quello che consumano con evidente vantaggio in termini di economia del combustibile. Per questi reattori, che non hanno moderatore, non si può usare l'acqua come refrigerante per le sue elevate capacità di moderazione dei neutroni; **si utilizzano sostanze come i metalli liquidi ad elevato numero atomico che garantiscono un elevato scambio termico.**

2. I reattori nucleari termici ad acqua e il ruolo del moderatore

I reattori termici presentano il vantaggio di una maggiore flessibilità di progetto dovuta alla configurazione di **reattore eterogeneo** ovvero costituito da una più ampia scelta di materiali: **combustibile, moderatore, refrigerante**.

TIPOLOGIA E CARATTERISTICHE DEL MODERATORE E DEL REFRIGERANTE

Nei reattori termici ad acqua viene utilizzato come refrigerante e moderatore acqua.

Nella fattispecie:

- **Acqua leggera** se viene utilizzato come **combustibile uranio arricchito**;
 - il motivo è legato alla esigenza di mantenere l'economia neutronica. Infatti l'acqua leggera **possiede ottime capacità di moderazione dovuta ai nuclei di H, ma è anche in grado di assorbire neutroni sottraendoli alla reazione a catena** di fissione ovvero ha un'elevata sezione di cattura neutronica. **Utilizzando uranio arricchito si ovvia a questo problema poiché si aumenta la produzione di neutroni per unità di massa.**
- **Acqua pesante (deuterio)** se viene utilizzato come **combustibile uranio naturale**;
 - il motivo è legato al fatto che **il deuterio (D_2O) ha una minore sezione di assorbimento rispetto all'idrogeno.**

Questi reattori bruciano in situ una quantità di materiale fertile convertito quasi pari alla quantità di materiale fissile di partenza e lasciano nel combustibile scaricato una quantità di materiale fissile pari all'80% di quello contenuto nel combustibile fresco. Questa economia neutronica nell'uso del combustibile iniziale, insieme all'assenza di arricchimento isotopico, fa sì che l'incidenza dell'uranio naturale sul costo dell'energia risulti veramente minima.

2. I reattori nucleari ad acqua leggera – *Light Water Reactor*

I reattori ad acqua leggera sono reattori eterogenei, **raffreddati e moderati ad acqua** (H_2O). Si dividono in due tipologie: **reattori pressurizzati ad acqua** – Pressurized Water Reactor (**PWR**) e **reattori bollenti ad acqua** – Boiling Water Reactor (**BWR**). Le differenze principale tra i due reattori consiste nello stato fisico in cui si trova l'acqua all'interno del nocciolo.

Reattore PWR

La **pressione dell'acqua** è tenuta al di sopra della tensione di vapore **a circa 150 bar** in modo che non cambi di fase.

L'acqua **viene fatta circolare ad alta pressione all'interno del nocciolo** del reattore.

La pressione elevata e un maggior grado di sotto raffreddamento all'ingresso del nocciolo permettono **all'acqua di rimanere allo stato liquido**.

Il circuito primario è connesso, pertanto, ad un **pressurizzatore** e all'uscita del nocciolo l'acqua viene inviata ad un **generatore di vapore** dove il calore viene trasferito all'acqua del circuito secondario ad una pressione più bassa e si genera vapore da inviare in turbina.

Reattore BWR

La **pressione dell'acqua** è a **circa 70 bar**.

L'acqua cambia di fase all'interno del reattore ovvero comincia a bollire prima di completare il percorso all'interno del nocciolo.

Per tale motivo si definisce il core di questo reattore «**core bollente**».

Il vapore si genera direttamente nel core del reattore.

Non ci sono sia il pressurizzatore sia il generatore.

2. Reattore nucleare PWR – struttura e funzionamento

Il **reattore PWR**, in generale, come accennato, è schematicamente costituito da un **contenitore in acciaio a pressione (vessel)** di forma cilindrica con estremità emisferiche e con testa flangiata rimovibile per le operazioni di ricarica del combustibile.

Al suo interno si trova il **nocciolo (core)** ove avvengono il **processo di fissione nucleare** e la **generazione di potenza termica**.

Il **nocciolo** è costituito essenzialmente da **elementi di combustibile di Uranio** (^{238}U arricchito in ^{235}U mediamente circa al 3 - 5% nella formulazione di ossido di uranio per favorire maggiormente il processo di fissione), in generale parti modulari identiche ovvero barrette dell'ordine delle centinaia e può avere un **diametro dell'ordine dei metri**, all'incirca uguale all'altezza.

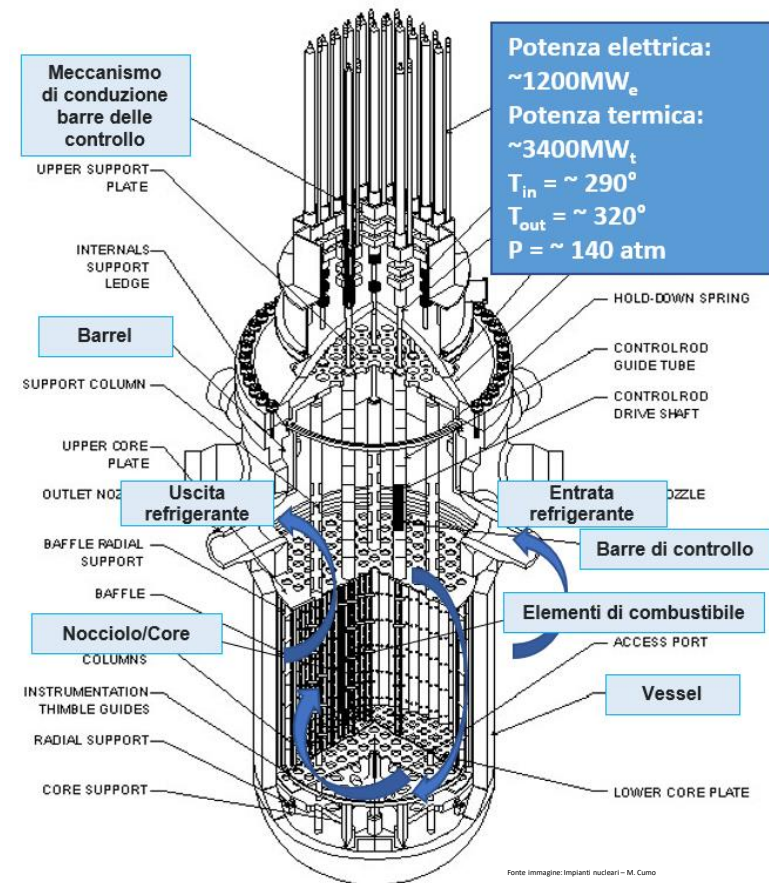
Al numero di elementi di combustibile è proporzionale la potenza termica ed elettrica del reattore

Il **nocciolo** è sommerso in maniera distribuita dal **fluido refrigerante** (in questo caso, acqua) **che può fungere anche da moderatore**.

Uno **schermo termico**, tra il core e il vessel, attenua i **raggi gamma** e il **flusso neutronico veloce di fuga dal nocciolo** e protegge il vessel dallo **stress termico** e dagli effetti delle **radiazioni**.

Il **fluido refrigerante del circuito primario entra dai bocchelli di ingresso in flusso discendente** tra il vessel e il barrel, si raccoglie nel plenum inferiore del reattore e **attraversa il nocciolo**, quindi gli elementi di combustibile, **in flusso ascendente fino ad arrivare alla parte superiore** dove esce dai bocchelli di uscita **asportando il calore generato dalla fissione** per andare nel circuito secondario.

Le barre di controllo, contenendo materiale che assorbe i neutroni, svolgono l'azione di **regolazione della potenza del reattore** ossia della sua **reattività** e sono, in questo caso, regolate da un meccanismo posto nella parte superiore del vessel.



Schema di un reattore ad acqua pressurizzata PWR. Questa tipologia di reattore rappresenta la più diffusa nella progettazione nucleare

2. Reattore nucleare BWR – struttura e funzionamento

Il **reattore BWR**, in generale, è schematicamente costituito da un **contenitore in acciaio a pressione (vessel)** di forma cilindrica con testa rimovibile per le operazioni di ricarica del combustibile.

Al suo interno si trova il **nocciolo (core)** ove avvengono il **processo di fissione nucleare**, la **generazione di potenza termica e l'ebollizione dell'acqua**.

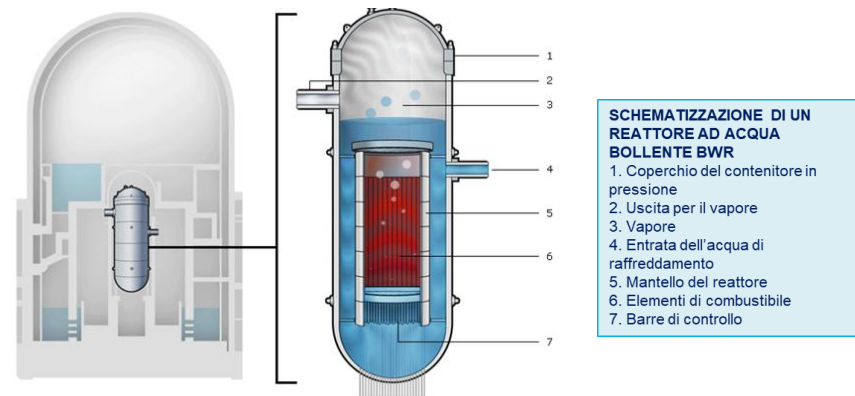
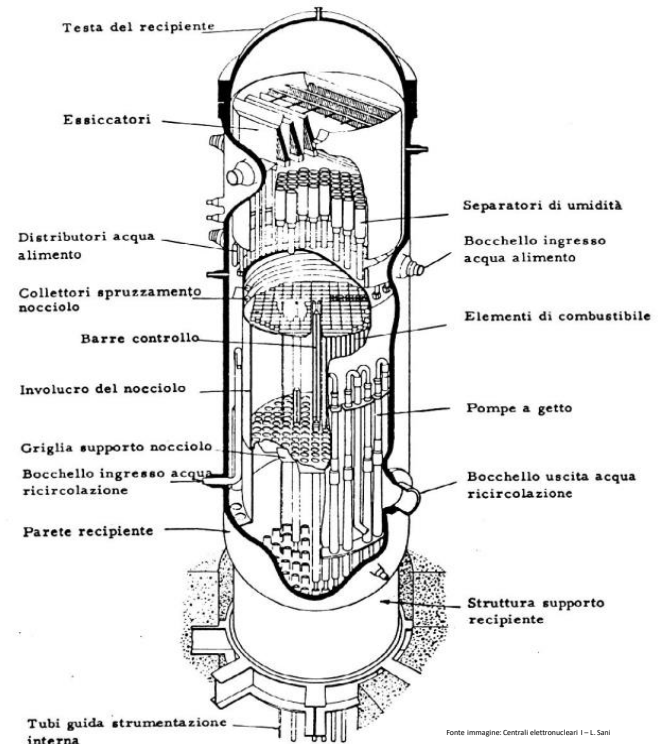
La **miscela acqua-vapore** prodotta all'interno del nocciolo passa attraverso i **separatori di umidità** e **gli essiccatori**, posti nella parte superiore del vessel, **per abbassare la componente di umidità prima di uscire dal bocchello per andare direttamente in turbina**.

Il **nocciolo** è costituito essenzialmente da **elementi di combustibile ovvero barrette di Uranio (^{238}U arricchito in ^{235}U nella formulazione di ossido di uranio per favorire maggiormente il processo di fissione)**. A parità di potenza ad esempio 1000 MWe il **volume del nocciolo di un BWR occupa un volume maggiore**.

Al numero di elementi di combustibile è proporzionale la potenza termica ed elettrica del reattore

Il **nocciolo** è **sommerso** in maniera distribuita dal **fluido refrigerante** (in questo caso, acqua) **che può fungere anche da moderatore**.

Le barre di controllo, contenendo materiale che assorbe i neutroni, svolgono l'azione di **regolazione della potenza del reattore** ossia della sua **reattività** e sono, in questo caso, regolate da un meccanismo posto nella parte inferiore del vessel. Le barre di controllo entrano dal fondo del recipiente a pressione e sono azionate da un meccanismo idraulico.



2. Reattore nucleare CANDU – struttura e funzionamento

Il reattore CANDU, (CANadian Deuterium Uranium), è un reattore nucleare **ad acqua pesante pressurizzata (PHWR)** e **uranio naturale**. Una filiera di reattori ampiamente diffusa in Canada. **Il combustibile è principalmente ossido di uranio naturale UO_2** , uranio naturale con una concentrazione di ^{235}U di circa lo 0,7%, pari a quella presente nell'uranio estratto in natura. Può essere utilizzato anche il diossido di torio e il diossido di plutonio e miscele di ossidi di uranio ed isotopi di plutonio di varia composizione, note come MOX.

Il moderatore dei neutroni è acqua pesante (ossido di deuterio D_2O).

Questo reattore è concettualmente simile alla maggior parte dei tipi di reattore nucleare ad acqua leggera.

L'acqua pesante del circuito primario in pressione è contenuta in tubi orizzontali più piccoli, di diametro pari a circa 10 cm, che contengono le barre di combustibile (tubi di forza).

I tubi di forza sono coassialmente contenuti all'interno di altri tubi (tubi di calandria), saldati ad un serbatoio a bassa pressione (calandria), molto grande, che contiene la maggior parte del moderatore (acqua pesante).

L'acqua pesante calda generata nel circuito di raffreddamento primario passa dentro un generatore di vapore che riscalda l'acqua leggera del circuito di raffreddamento secondario a pressione più bassa. Il vapore che si genera va ad azionare una turbina connessa ad un generatore di corrente alternata.

Il sistema principale di controllo della reattività è costituito da barre di arresto/controllo, che attraversano verticalmente la calandria penetrando nel nocciolo.

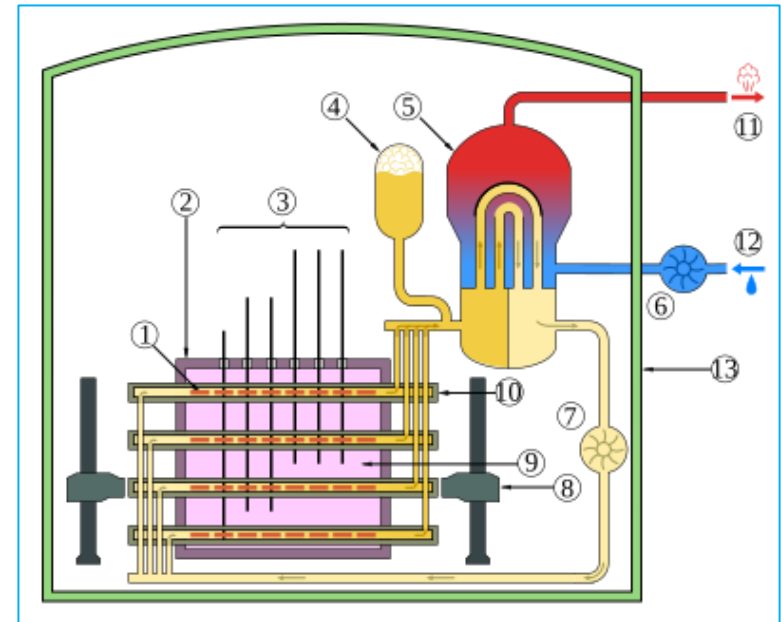


DIAGRAMMA SCHEMATICO DI UN REATTORE CANDU

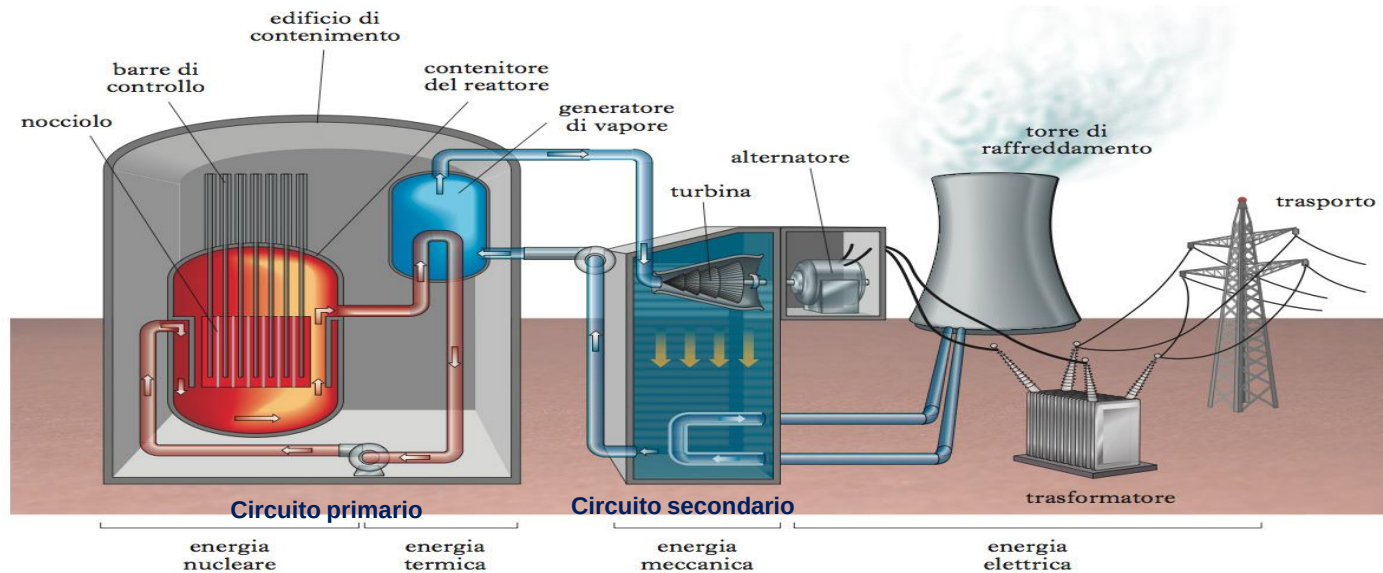
Il circuito del raffreddamento primario è di colore giallo ed arancione, il secondario è blu e rosso. L'acqua pesante contenuta nella calandria è di colore rosa; sopra la calandria e all'interno ci sono le barre di controllo (assorbitori di neutroni) parzialmente inseriti in tubi all'interno del fascio stesso.

2. Layout di una centrale nucleare di potenza ad acqua pressurizzata PWR

L'impianto nucleare di un reattore PWR (reattore ad acqua pressurizzata), come accennato, è schematicamente composto da **due sistemi principali**:

- ❑ **Circuito idraulico primario**: la parte dell'impianto **dove si trova il reattore** (contenitore in pressione dove è contenuto il **nocciolo**) e il **circuito di raffreddamento primario**, composto da **pressurizzatore**, **pompe di ricircolo** e **generatori di vapore**;
- ❑ **Circuito idraulico secondario**: la parte dell'impianto dove il **vapore** generato viene portato in turbina per generare energia elettrica per poi essere condensato nel condensatore. Il condensatore viene raffreddato dalle torri di raffreddamento.

Il reattore e il circuito primario sono contenuti nell'**edificio reattore**, un edificio appositamente progettato per resistere qualsiasi eventualità, anche lo schianto di un aereo o il sisma di progetto più severo.

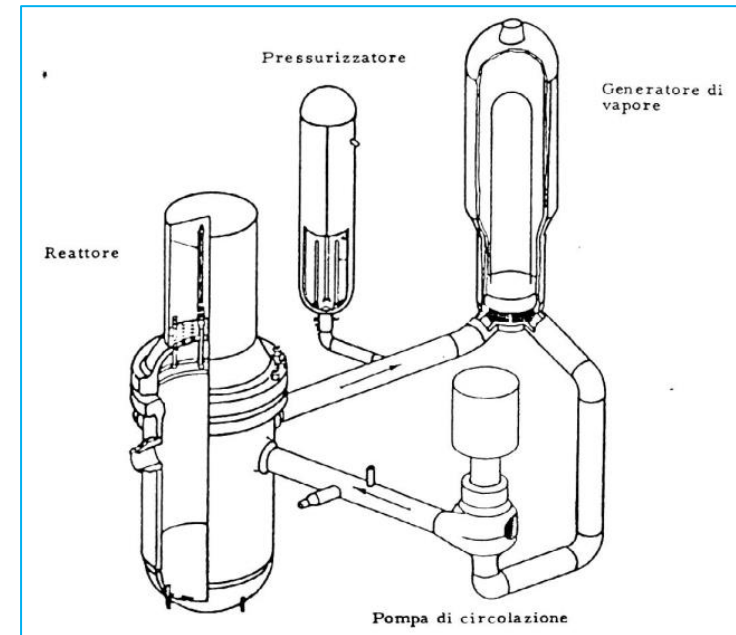
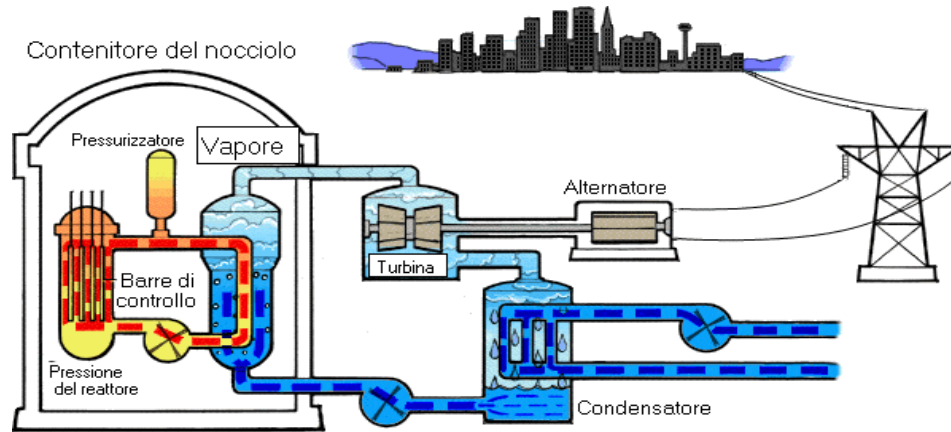


2. Il circuito primario di un impianto nucleare di potenza con reattore ad acqua pressurizzata PWR

Il fluido refrigerante (acqua in questo caso) che scorre nel circuito primario si trova alla **pressione** di circa **140-160 bar**, in modo da poter **mantenere l'acqua liquida** anche alla temperatura di lavoro di **circa 320°C** che è la temperatura in uscita dal vessel. La temperatura in entrata al vessel è di **circa 290°C**.

Ci sono **4 penetrazioni principali** (fino ad 8) con quattro **pompe di ricircolo**. Sono posizionate al di sopra del livello del core in modo tale che se uno dei tubi si rompesse **il nocciolo rimarrebbe comunque sommerso**. Tale geometria del progetto termoidraulico del reattore garantisce **una inerzia termica costante e i massimi livelli di sicurezza**.

Oltre alle pompe c'è un **pressurizzatore**, che ha il ruolo di mantenere costante la pressione all'interno del circuito e di regolare eventuali transitori di pressione.



Fonte immagine: Centrali elettronucleari I - L. Sani

2. Aspetti ingegneristici e di sicurezza nella progettazione del reattore nucleare a fissione

Il reattore nucleare deve essere dimensionato in base alla sua potenza ovvero all'energia che si genera dalla reazione di fissione. La potenza termica prodotta deve essere rigorosamente bilanciata da quella asportata dal refrigerante.

Devono essere dimensionati, in un rapporto di equilibrio e compensazione, **il combustibile nucleare** (nocciolo) sorgente dei neutroni, **il refrigerante preposto all'asportazione del calore generato**, **il moderatore** (quando necessario) preposto al rallentamento dei neutroni, **i sistemi di controllo della reattività** e **il materiale strutturale**.

Dato il forte rapporto di interdipendenza e di equilibrio richiesto tra gli elementi costituenti il reattore nucleare, **la tecnica adottata per i calcoli del progetto nucleare è quella della separabilità e sovrapposizione degli effetti. Il risultato viene, poi, sempre implementato da fattori di sicurezza.**

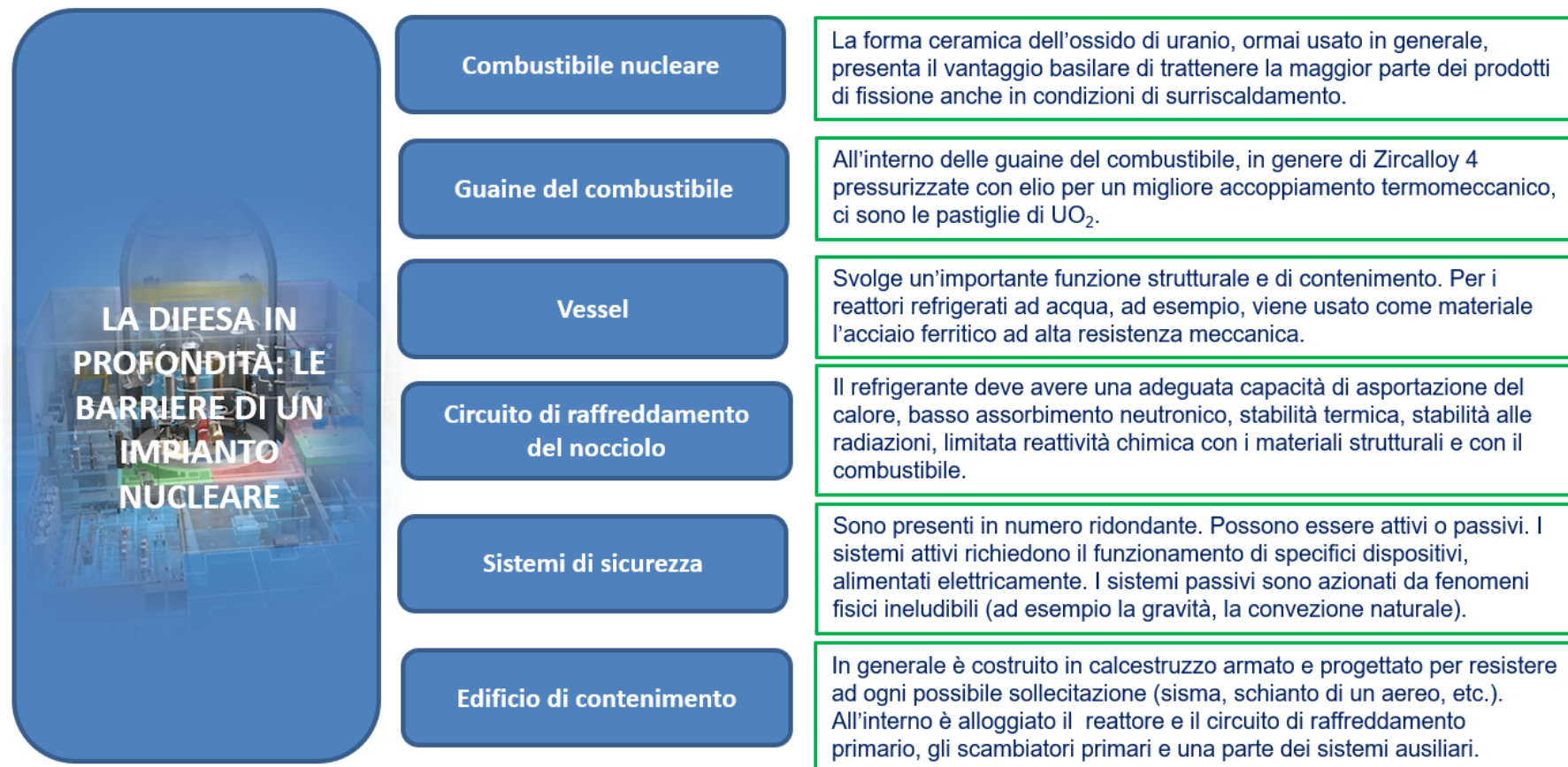
- ❑ **Mantenimento della reazione a catena** nel processo di fissione (controllo dei neutroni liberati durante il processo di fissione).
- ❑ **Calcolo e controllo della concentrazione isotopica** all'interno del reattore (prodotti di fissione e materiale fissile).
- ❑ **Calcolo e controllo del flusso neutronico** generato in relazione al volume di combustibile e quindi della **potenza termica**.
- ❑ **Controllo della reattività** (attraverso il calcolo del fattore di moltiplicazione K , che esprime il rapporto tra il numero di neutroni presenti in una generazione e quello della generazione precedente);
- ❑ **Feedback di reattività**.
- ❑ **Scelta dei materiali** e loro **dimensionamento** per lo **scambio termico**: combustibile, refrigerante, moderatore, etc..
- ❑ **Scelta dei materiali** per gli **elementi strutturali** del reattore (vessel) in grado di resistere a elevati stress termici e alla esposizione alla radioattività.

2. La sicurezza negli impianti nucleari: la difesa in profondità

Numerose barriere, almeno quattro, **ed un certo numero di sistemi che si frappongono tra il reattore e il circuito primario e l'esterno**. Il concetto di sicurezza di difesa in profondità è insito in tutte le tipologie di reattore.

Scopo della sicurezza nucleare, è quello di preservare, attraverso l'applicazione di normative riconosciute al livello internazionale, da eventi, anche estremi, sia l'interno che l'esterno dell'impianto nucleare.

Le strutture e i sistemi rilevanti sono realizzati in modo da mantenere integra la loro funzione anche dopo il peggior terremoto prevedibile assunto come «terremoto di progetto».



2. Aspetti di rilevante importanza di un impianto nucleare per la produzione di energia elettrica nel contesto energetico

I **numerosi vantaggi**, caratteristici della tecnologia nucleare preposta alla produzione di energia elettrica, comuni a tutte le tipologie di impianti nucleari, rendono questa tecnologia **ampiamente utilizzata nel mondo** con positive ripercussioni dal punto di vista sociale ed economico.

ASPETTI TECNICI ED ECONOMICI DI UN IMPIANTO NUCLEARE

Elevati standard di sicurezza

Sono garantiti dall'elevato livello di qualità che contraddistingue la progettazione e la costruzione di questi impianti e da attente valutazioni di impatto ambientale e da valutazioni ambientali strategiche.

Immissioni dirette di inquinanti in atmosfera pressoché nulle

Nel quadro generale della sicurezza nucleare si colloca la radioprotezione, il cui obiettivo è quello di assicurare, in ogni caso, attraverso un insieme di misure adeguate, la protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori.

Fattore di capacità di circa il 90%

Massima resa in termini energetici con il minor impiego di combustibile. Il fattore di capacità di un impianto nucleare, non è legato alle condizioni climatiche e geomorfologiche del territorio.

Ridotto impiego di superficie

Come ordine di grandezza, una centrale nucleare occupa qualche decina di ettari di terreno e lavora in sinergia con la grande rete di distribuzione di energia elettrica.

Durevolezza della tecnologia e basso costo del kW/h

La vita media di questa tecnologia è di circa 40-60 anni con un costo del kW/h competitivo rispetto ad altre tecnologie.

Processo tecnologico pianificato

Ogni step che porta alla realizzazione di un impianto nucleare è pianificato in fase progettuale: dal ciclo combustibile, alla fase di esercizio e manutenzione, al deposito per i rifiuti radioattivi.

2. Requisiti per la localizzazione di una centrale nucleare

La localizzazione delle nuove centrali nucleari di potenza nell'ambito di un mix energetico integrato, si basa su requisiti minimi necessari al loro funzionamento. Inoltre, le aree del territorio nazionale, in base a criteri predefiniti e condivisi anche a livello internazionale, dovranno essere, in via esemplificativa:

- caratterizzate dal punto di vista geotecnico, sismico, idrologico, meteorologico;
- valutate dal punto di vista di impatto ambientale rispetto alle aree soggette a vincoli naturalistici.

La localizzazione delle centrali elettronucleari di potenza richiede un'analisi preventiva di criteri e requisiti tecnici e normativi, condivisi anche a livello internazionale, in base ai quali selezionare le aree idonee.

Requisiti minimi necessari a titolo esemplificativo e in generale:

- presenza di sufficiente acqua per il raffreddamento;
- allaccio alla rete elettrica nazionale;
- idonee vie di accesso;
- fattibilità dal punto di vista geologico, sismico e geotecnico;
- fattibilità dal punto di vista idrogeologico e meteorologico;
- esclusione delle aree all'interno delle quali siano presenti attività umane estranee all'impianto nucleare (industrie, manufatti);
- esclusione delle aree all'interno delle quali possono verificarsi fenomeni naturali estremi, diversi dal sisma, quali alluvioni, frane, maremoti, di intensità tali da compromettere la sicurezza di funzionamento delle centrali;

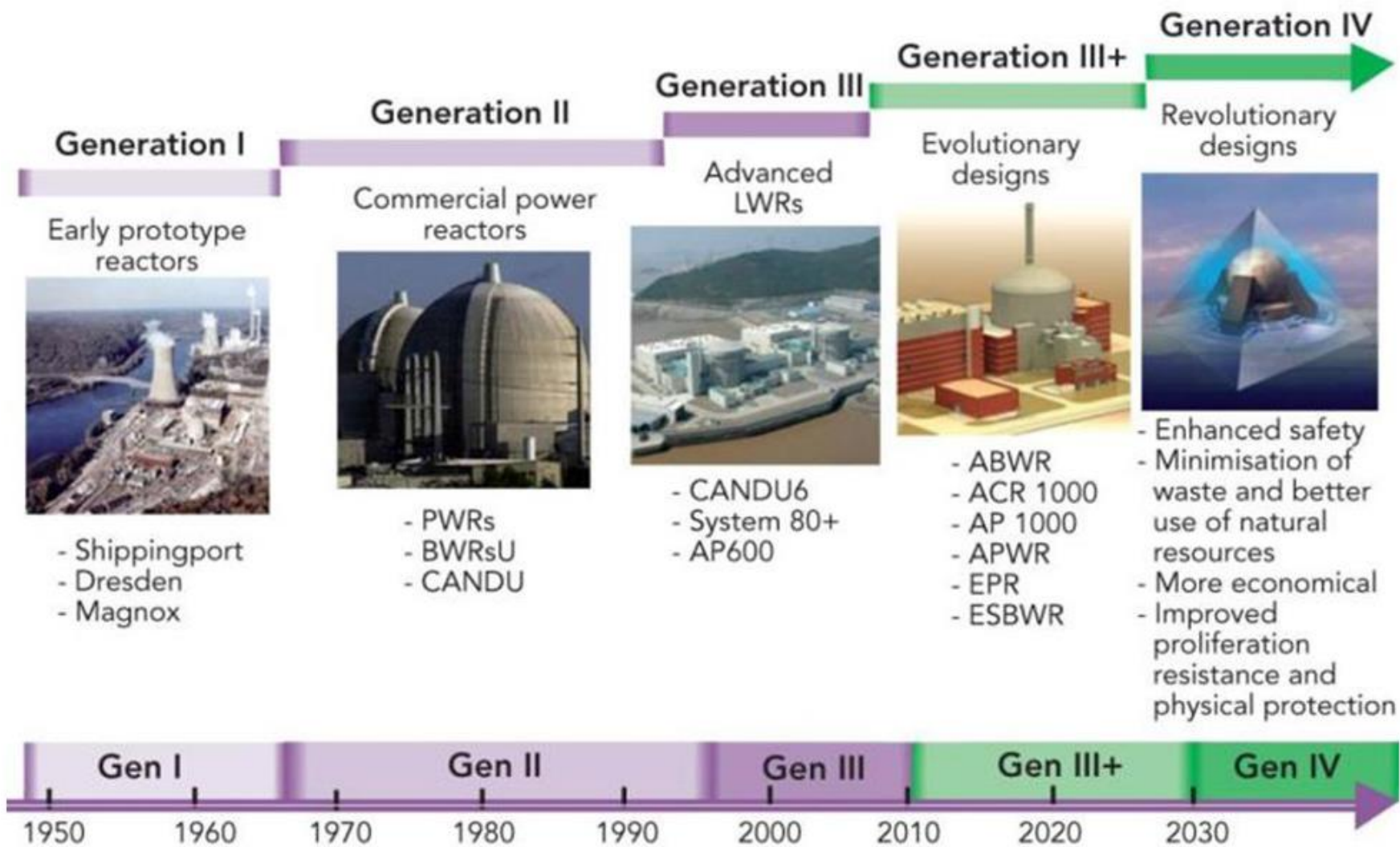


3. Reattori nucleari di potenza “Large scale” e reattori “SMR”

Ingg. Massimo Sepielli e Alessandra Di Pietro

Seminario - La sostenibilità energetica delle tecnologie per la IA, una ulteriore motivazione per rilanciare l'energia elettronucleare in Italia

3. Evoluzione dei reattori nucleari



Fonte NEA 2008

3. Tabella di alcuni reattori di potenza PWR in esercizio nel mondo

Reattore Progettista	Potenza elettrica netta/unità Tipo	Sistemi di sicurezza / design	Progetto approvato da:	Impianti attualmente in esercizio (Paese, anno di inizio costruzione, anno di collegamento alla rete elettrica)
EPR AREVA NP (EDF) FRAMATOME AN Francia 	da 1580 a 1650 MWe ad acqua leggera pressurizzata PWR	Sistemi di sicurezza attivi, edificio di contenimento a doppia parete e in grado di resistere all'impatto con un aereo	ASN, STUK, NRC, UKAEA, ONR ... Certificazione EUR (European Utility Requirements)	n.1 unità , Olkiluoto 3 (Finlandia, 2005, 2022) n.1 unità , Taishan 1 (Cina, 2010, 2018) n.1 unità , Taishan 2 (Cina, 2012, 2019)
EPR 2 o EPR 'New Model' AREVA NP (EDF) FRAMATOME AN Francia 	1650 MWe ad acqua leggera pressurizzata PWR	Sistemi di sicurezza attivi ad elevata ridondanza, edificio di contenimento a doppia parete e in grado di resistere all'impatto con un aereo	Progetto in corso di approvazione presso ASN	-
AP-1000 Westinghouse Nuclear USA 	da 1110 a 1170 MWe ad acqua leggera pressurizzata PWR	Sistemi di sicurezza passivi	NRC, ONR (?), Autorità per la sicurezza nucleare Cinese Certificazione EUR (European Utility Requirements)	n.1 unità , Sanmen 1 (Cina, 2009, 2018) n.1 unità , Sanmen 2 (Cina, 2009, 2018) n.1 unità , Haiyang 1 (Cina, 2009, 2018) n.1 unità , Haiyang 2 (Cina, 2010, 2018)
APR-1400 KHNP / KEPCO Corea del Sud 	da 1350 a 1400 MWe ad acqua leggera pressurizzata PWR	Sistemi di sicurezza attivi e passivi, edificio di contenimento a doppia parete e in grado di resistere all'impatto con un aereo	KINS, NSSC, NRC, FANR Certificazione EUR (European Utility Requirements)	n.1 unità , Saeul 1 (Corea del Sud, 2008, 2016) n.1 unità , Saeul 2 (Corea del Sud, 2009, 2019) n.1 unità , Barakah 1 (UAE, 2012, 2020) n.1 unità , Barakah 2 (UAE, 2013, 2021) n.1 unità , Barakah 3 (UAE, 2014, 2022) n.1 unità , Shin Hanul 1 (Corea del Sud, 2012, 2022)
ABWR GE-Hitachi USA / Giappone  	da 1300 a 1328 MWe ad acqua leggera bollente BWR	Sistemi di sicurezza attivi, edificio di contenimento in grado di resistere all'impatto con un aereo	NRA Japan, NRC 1997 - UKAE 2013	n.1 unità , Kashiwazaki-Kariwa 6 (Giappone, 1992, 1996) n.1 unità , Kashiwazaki-Kariwa 7 (Giappone, 1993, 1997) n.1 unità , Hamaoka 5 (Giappone, 2000, 2005)

Tabella 10.1 - Caratteristiche salienti dei principali reattori in esercizio e relativi siti

Fonte: Commissione Ricerca e Reattori Innovativi - Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma

3. Tabella di alcuni reattori di potenza PWR in esercizio nel mondo

Reattore Progettista	Potenza elettrica netta/unità Tipo	Sistemi di sicurezza / design	Progetto approvato da:	Impianti attualmente in esercizio (Paese, anno di inizio costruzione, anno di collegamento alla rete elettrica)
WWER-TOI (V-510)/ WWER-1300 OKB GIDROPRESS - ROSATOM Federazione Russa 	da 1255 a 1300 MWe ad acqua leggera pressurizzata * *WWER è l'acronimo con cui i russi designano i loro reattori ad acqua pressurizzata, concettualmente equivalenti ai PWR	Sistemi di sicurezza attivi e passivi, edificio di contenimento a doppia parete ed in grado di resistere all'impatto con un aereo	2012 inizio dell'iter di certificazione in UK (stato attuale dell'istanza è conosciuto) Certificazione EUR (European Utility Requirements)	-
WWER-1200 (AES- 2006) OKB GIDROPRESS - ROSATOM Federazione Russa 	da 1113 a 1198 MWe	Sistemi di sicurezza attivi e passivi, edificio di contenimento a doppia parete ed in grado di resistere all'impatto con un aereo	Autorità per la sicurezza nucleare, Russa, Bengalese, Turca, Bielorussia Certificazione EUR (European Utility Requirements)	n.1 unità, Novovoronezh II - 1 (Russia, 2008, 2016) n.1 unità, Novovoronezh II - 2 (Russia, 2009, 2019) n.1 unità, Leningrad II - 1 (Russia, 2008, 2018) n.1 unità, Leningrad II - 2 (Russia, 2010, 2020) n.1 unità, Belarusian 1 (Bielorussia, 2013, 2020)
WWER-1000 (V-392,V- 412, V-428, V-528) OKB GIDROPRESS - ROSATOM Federazione Russa 	da 917 MWe a 1060 MWe ad acqua leggera pressurizzata	Sistemi di sicurezza attivi e passivi, edificio di contenimento a doppia parete ed in grado di resistere all'impatto con un aereo	Atomic Energy Regulatory Board (AERB) of India, National Nuclear Safety Administration NNSA (Cina) Certificazione EUR (European Utility Requirements)	n.1 unità, Kudankulam 1 (India, 2002, 2013) n.1 unità, Kudankulam 2 (India, 2002, 2016) n.1 unità, Tianwan 1 (Cina, 1999, 2007) n.1 unità, Tianwan 2 (Cina, 2000, 2007) n.1 unità, Tianwan 3 (Cina, 2012, 2018) n.1 unità, Tianwan 4 (Cina, 2013, 2018)
ACP 1000 /ACPR 1000 HPR 1000 'Hualong One' CNNC & CGN Cina 	1090 MWe ad acqua leggera pressurizzata PWR	Sistemi di sicurezza attivi, edificio di contenimento in grado di resistere all'impatto con un aereo	National Nuclear Safety Administration NNSA (Cina), Pakistan Nuclear Regulatory Authority PNRA (Pakistan) Iter di certificazione EUR in corso	n.1 unità, Kanupp 2 (Pakistan, 2015, 2021) n.1 unità, Kanupp 3 (Pakistan, 2016, 2022) n.1 unità, Fuqing 5 (Cina, 2015, 2021) n.1 unità, Fuqing 6 (Cina, 2015, 2022) n.1 unità, Hongyanhe 5 (Cina, 2015, 2021) n.1 unità, Hongyanhe 6 (Cina, 2015, 2022) n.1 unità, Yangjiang 5 (Cina, 2013, 2018) n.1 unità, Yangjiang 6 (Cina, 2013, 2018)

Tabella 10.2 - Caratteristiche salienti dei principali reattori in esercizio e relativi siti

Fonte: Commissione Ricerca e Reattori Innovativi - Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma

3. Tabella di alcuni reattori di potenza PWR in costruzione nel mondo

Reattore Progettista	Impianti in costruzione (Paese, anno di inizio costruzione, anno previsto di entrata in servizio)	Impianti pianificati	Costo complessivo (in base al numero di unità contemporaneamente in costruzione sul medesimo sito) e costo unitario (costo in € per kWe installato)
EPR AREVA NP (EDF) FRAMATOME AN Francia 	n.1 unità, Flamanville 3 (Francia, 2007, 2023) n.2 unità, Hinkley Point C (UK, 2017, 2027)	n.2 unità, Sizewell C (UK)	Olkiluoto 3: 11 G€, 6875€/kWe Taishan 1 e 2: 6,8 G€, 2430€/kWe Hinkley point C (previsione): 18 G€, 5520€/kWe Flamanville 3 (consuntivo attuale): 12,7 G€, 7700€/kWe Sizewell C (previsione): 23,6 G€, 7240€/kWe
EPR 2 o EPR 'New Model' AREVA NP (EDF) FRAMATOME AN Francia 	-	n.2 unità EPR 2 in corso di valutazione per il sito di Penly (Francia) Altri Paesi interessati: Slovacchia (rif. http://www.jess.sk/en/)	EDF-Framatome stima una riduzione dei costi intorno al 30% rispetto all' EPR base
AP-1000 Westinghouse Nuclear USA 	n.1 Unità Vogtle 3 (USA, 2013, 2023) n.1 Unità Vogtle 4 (USA, 2013, 2023) n.1 unità, Haiyang 3 (Cina, 2022, 2030)* n.1 unità, Sanmen 3 (Cina, 2022, 2030)* * versione CAP-1000	n. 3 unità già pianificate per il sito di Lubiatowo-Kopalino, Polonia. Opzione per altre 3 o 6 unità in Polonia. La tecnologia Westinghouse AP1000 è in corso di valutazione, oltre che nel Regno Unito e negli USA anche da parte di alcuni Paesi dell'Europa centrale e orientale, tra cui l'Ucraina, nell' ambito di un programma che punta a schierare 9 unità.	Vogtle 3 e 4: 23,3 G€, 10370 €/kWe * il costo "overnight" (2019) a partire dalla decima unità realizzata dovrebbe attestarsi tra 2600€/kWe e 3600€/kWe ** * costi lievitati per i ritardi accumulati in seguito al fallimento della utility che originariamente aveva commissionato i reattori, alla pandemia Covid-19 e al fallimento della stessa Westinghouse nel 2018 (dal 2022 Westinghouse Electric Company è di proprietà di CAMECO e Brookfield Renewable Partners) ** Studio del MIT
APR-1400 KHNP / KEPCO Corea del Sud 	n.1 unità, Shin Hanul 2 (Corea del Sud, 2013, 2023) n.1 unità, Seoul 3 (Corea del Sud, 2017, 2025) n.1 unità, Seoul 4 (Corea del Sud, 2018, 2026) n.1 unità, Barakah 4 (UAE, 2015, 2023)	-	Shin Hanul 1: 5,3 G€, 3950€/kWe Barakah 1, 2, 3, e 4: 18,9 G€, 3540€/kWe
ABWR GE-Hitachi USA / Giappone  	n.1 unità, Ohma 1 (Giappone, 2010, -) n.1 unità, Shimane 3 (Giappone, 2006, -) n.1 unità, Lungmen 1 (Taiwan, 1999, costruzione sospesa) n.1 unità Lungmen 2 (Taiwan, 1999, costruzione sospesa)	4 unità valutate per il UK 2 unità inizialmente pianificate da TEPCO per il sito di Higashi-dori, sospese nel 2011	≈3600 €/kWe (costo stimato e attualizzato a fine 2022 per le unità ABWR in costruzione a Taiwan)

Tabella 11.1 - Principali reattori in costruzione e costi di installazione

Fonte: Commissione Ricerca e Reattori Innovativi - Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma

3. Tabella di alcuni reattori di potenza PWR in costruzione nel mondo

Reattore Progettista	Impianti in costruzione (Paese, anno di inizio costruzione, anno previsto di entrata in servizio)	Impianti pianificati	Costo complessivo (in base al numero di unità contemporaneamente in costruzione sul medesimo sito) e costo unitario (costo in € per kWe installato)
WWER-TOI (V-510)/ WWER-1300 OKB GIDROPRESS - ROSATOM Federazione Russa 	n.1 unità Kursk NPP-II-1 (Kursk, Russia, 2018-2023) n.1 unità Kursk NPP-II-2 (Kursk, Russia, 2019-2024)	Nizhny Novgorod 1,2 Central/Kostroma 1,2 Smolensk II 1,2,3,4 Kursk II 3,4 Tatar	Kursk NPP-II-1,2: 3,5 G€, 2790 €/kWe Kursk NPP-II-3: 3,8 G€, 3030 €/kWe
WWER-1200 (AES- 2006) OKB GIDROPRESS - ROSATOM Federazione Russa 	n.1 unità, Baltic 1 (Russia, 2012, 2023) n.1 unità, Belarusian 2 (Bielorussia, 2014, 2023) n.1 unità, Rooppur 1 (Bangladesh, 2017, 2027) n.1 unità, Rooppur 2 (Bangladesh, 2018, 2028) n.1 unità, Akkuyu 1 (Turchia, 2018, 2028) n.1 unità, Akkuyu 2 (Turchia, 2020, 2030) n.1 unità, Akkuyu 3 (Turchia, 2021, 2031) n.1 unità, Akkuyu 4 (Turchia, 2022, 2032) n.1 unità, El Dabaa 1 (Egitto, 2022, Nd) n.1 unità, El Dabaa 2 (Egitto, 2022, Nd) n.1 unità, Tianwan 7 (Cina, 2021, 2030) n.1 unità, Tianwan 8 (Cina, 2022, 2030) n.1 unità, Xudobu 3 (Cina, 2021, 2030) n.1 unità, Xudobu 4 (Cina, 2022, 2030)	Hanhikivi (Finlandia): cancellato	ND
WWER-1000 (V-392,V- 412, V-428, V-528) OKB GIDROPRESS - ROSATOM Federazione Russa 	n.1 unità, Kudankulam 3 (India, 2017, 2026) n.1 unità, Kudankulam 4 (India, 2017, 2026) n.1 unità, Kudankulam 5 (India, 2021, 2030) n.1 unità, Kudankulam 6 (India, 2021, 2030) n.1 unità, Bushehr 2 (Iran, 2019, 2030)	Pianificate 2 unità per il sito di Belene (Bulgaria), successivamente cancellate	≈2000 €/kWe per Kudankulam 1 e 2 (consuntivo) 6,2 G€ di budget per Kudankulam 5 e 6, ≈ 3100 €/kWe
ACP 1000 / ACPR 1000 / HPR 1000 'Hualong One' CNNC & CGN Cina 	n.1 unità, Changjiang 3 (Cina, 2021, Nd) n.1 unità, Changjiang 4 (Cina, 2021, Nd) n.1 unità, Fangchenggang 3 (Cina, 2015, 2022) n.1 unità, Fangchenggang 4 (Cina, 2016, Nd) n.1 unità, Sanaocun 1 (Cina, 2022, Nd) n.1 unità, Sanaocun 2 (Cina, 2022, Nd) n.1 unità, Taipingling 1 (Cina, 2019, Nd) n.1 unità, Taipingling 2 (Cina, 2019, Nd) n.1 unità, Zhangzhou 1 (Cina, 2019, Nd) n.1 unità, Zhangzhou 2 (Cina, 2020, Nd)	ND	ND

Tabella 11.2 - Principali reattori in costruzione e costi di installazione

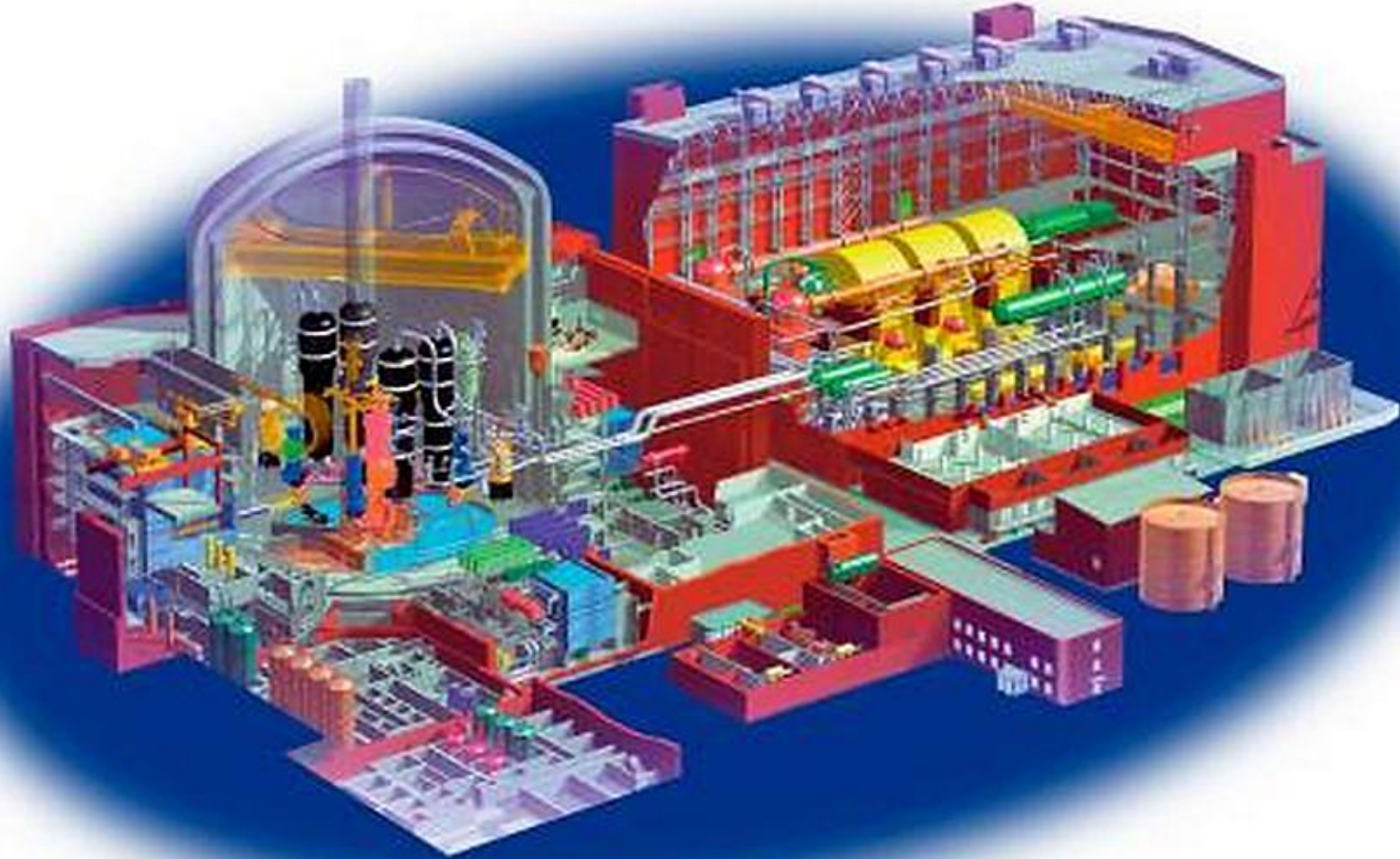
Fonte: Commissione Ricerca e Reattori Innovativi - Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma

3. Centrale nucleare in esercizio: reattore EPR - Olkiluoto (Finlandia)



Fonte immagine: <https://www.meteoweb.eu/2023/04/finlandia-nuova-centrale-nucleare-olkiluoto/1001228964/>

3. EPR - Reattore evolutivo Europeo



Ingg. Massimo Sepielli e Alessandra Di Pietro



Seminario - La sostenibilità energetica delle tecnologie per la IA, una ulteriore motivazione per rilanciare l'energia elettronucleare in Italia

28/05/2025

pag. 43

3. Centrale nucleare in esercizio: reattore AP 1000 - Haiyang (Cina)



Fonte immagine: Wikipedia

3. Centrale nucleare in costruzione: reattore APR 1400 - Barakah (Emirati Arabi)



Fonte immagine: <https://www.wam.ae/it/article/hszrhfw-barakah-one-company-completa-rifinanziamento-della>

3. I reattori nucleari SMR

I reattori nucleari di piccola e media potenza, gli **SMR** (*Small and Medium Modular Reactors*), rappresentano una tipologia di reattori interessanti, nell'ambito di un mix energetico diversificato e contestualizzato tecnologicamente e geograficamente, e **potranno contribuire, nel prossimo futuro, ad un piano di decarbonizzazione a basso impatto ambientale e ad uno sviluppo tecnologico e digitale sostenibile.**



Fonte immagine: altoadige.it/ambiente

*Le loro caratteristiche di **sicurezza intrinseca**, di **modularità**, di **flessibilità di installazione** e i **ridotti costi di costruzione**, li rendono una infrastruttura affidabile e dalle molteplici potenzialità: dalla **produzione di energia elettrica**, al **teleriscaldamento**, alla **dissalazione** e alla **produzione di idrogeno**.*

3. Aspetti tecnologici generali degli SMR

I reattori modulari di piccola e media taglia utilizzano il processo fisico-nucleare della fissione nucleare e la loro potenza arriva **fino a 700 MWe**.

❑ da 0 - 300 MWe (piccola taglia) da 300 - 700 MWe (media taglia).

Si basano su tutte le tecnologie di reattori nucleari (PWR, BWR, HTGR, LFR, SFR, MSR).

- Si definiscono **modulari** perché **ogni singolo modulo può essere raggruppato ad altri** per formare un impianto nucleare più potente in termini di produzione di energia.
La gestione e il controllo di tutti i moduli avviene da un'unica sala di comando e **in alcuni casi non è prevista l'area di rispetto (emergenza ed evacuazione) o è limitata rispetto ai reattori di potenza**.
- Sono progettati per la **sostituzione non frequente del combustibile** (alcuni modelli fino a 15-20 anni) grazie ad un arricchimento che raramente scende al di sotto del 5-6% con un evidente vantaggio nella gestione dei rifiuti e nella resistenza alla proliferazione.
- A fronte di una ridotta complessità di impianto presentano alcune innovazioni in termini di sicurezza: **la maggior parte degli SMR sono dotati di sistemi di sicurezza passivi**.
Introducono il concetto di **SAFETY BY DESIGN**.
- Hanno un **sistema di configurazione semplificato** e alcuni modelli **massimi rendimenti termodinamici**.
- La **standardizzazione del design dell'impianto**, che consente la sua **produzione in fabbrica**, rende possibile una drastica **riduzione dei tempi e dei costi di produzione**.
- La loro struttura modulare ne rende **facile il trasporto, la fase di cantierizzazione risulta notevolmente semplificata**.
- **Alcune tipologie sono in grado di produrre sia energia elettrica, sia calore per usi civili o industriali (teleriscaldamento, dissalazione marina, produzione di idrogeno)**.
- **Potrebbero compensare i problemi di discontinuità delle rinnovabili**.

3. Classificazione degli SMR

SMR Definition

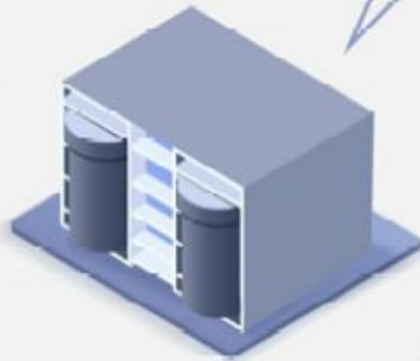
MICROREACTOR

1 MW – 10 MW



SMALL MODULAR REACTOR

20 MW – 300 MW



MEDIUM TO LARGE REACTOR

300 MW – 1,000+ MW



- Two important factors: **Size** and **Modularity**
- Nuclear power plants provide flexibility in terms of power
- SMRs provide electric power in the range of 20-300 MW(e)

Source: energy.gov/ne

3. Propulsione Navale: verso gli SMR e la Gen III+ / IV

- **Reattori Piccoli & Modulari (SMR)** utilizzati sin dagli albori dell'era nucleare per la propulsione navale militare
 - Sottomarino USS *"Nautilus"* [SSN-571] (1955)
 - Portaerei USS *"Enterprise"* [CVN-65] (1960)
- Impianto propulsivo basato su **Reattori ad Acqua Pressurizzata (PWR)** di piccola taglia
 - Potenza (termica) 80-150 MWth
 - Range di navigazione sommersa/emersa praticamente illimitato (refueling ogni 25-30 anni)
- Primo reattore USA per la produzione commerciale di energia elettrica derivato dal reattore del *"Nautilus"* **"Shippingport" NPP** (1958)
- Notevole esperienza accumulata, pari a quella del nucleare civile (ca. 15000 anni/reattore)
- **Nuovi reattori SMR russi**, per la produzione di energia elettrica, derivanti da reattori per navi rompighiaccio *"Academician Lomonosov"* (2x32 MWe), in costruzione



Shippingport NPP



Varo del "Lomonosov"

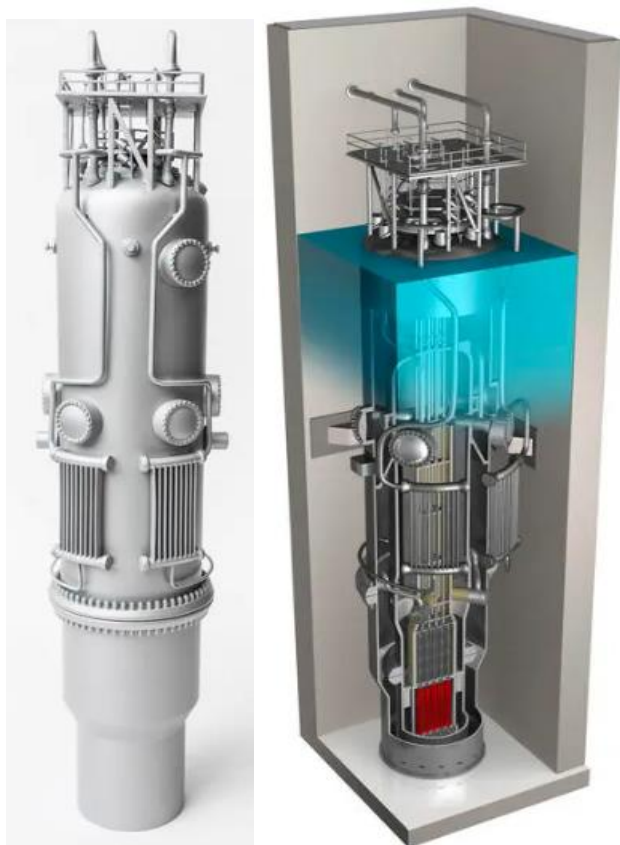
3. SMR refrigerati ad acqua leggera: principali caratteristiche tecnologiche

- ❑ Il **design integrale**, semplificato e caratterizzato da componenti di dimensioni ridotte, **elimina le conseguenze di una perdita importante di refrigerante dal circuito primario**, il *Large Break Loss of Cooling Accident (LBLOCA)* in quanto le **tubazioni** e i **componenti esterni sono in genere eliminati**. **SAFETY BY DESIGN**
- ❑ Vengono **ridotte le possibilità di perdita di acqua dalle pompe** ed **eliminato l'incidente relativo all'estrazione improvvisa delle barre di controllo** (preposte al controllo della reattività), poiché, il meccanismo di controllo delle barre, il **Control Rod Drive Mechanism (CRDM)**, è integrato nel vessel.
- ❑ Altra caratteristica è il **maggior livello di refrigerante primario** nel reattore e la **posizione di tutti i componenti primari ad una quota superiore al core che risulta sempre immerso nel refrigerante primario** anche in caso di incidente severo garantendo una **maggiore inerzia termica**. **SISTEMI DI SICUREZZA DI TIPO PASSIVO**
- ❑ Le dimensioni del **vessel, più stretto e più alto** di uno tradizionale, permettono un **miglior trasferimento del calore di decadimento in senso radiale**. Sebbene il vessel di un SMR di tipo PWR risulti di dimensioni maggiori rispetto ad un PWR tradizionale, l'ingombro complessivo del sistema di contenimento è notevolmente ridotto.

SMR refrigerati ad acqua leggera

I reattori SMR ad acqua leggera (LWR-Light water reactors) sono **moderati e raffreddati ad acqua leggera** e si basano su una tecnologia ampiamente collaudata nel tempo.

Il combustibile è arricchito con ^{235}U al 5% circa e il tempo di ricarica non supera i 6 anni.



Fonte immagine: energynews.us - Reattore NuScale

IL CONCETTO DI REATTORE INTEGRALE

La **struttura di tipo integrale** di un reattore SMR è particolarmente evidente nei reattori SMR refrigerati ad acqua pressurizzata, i **Pressurized Water Reactor (PWR)**.

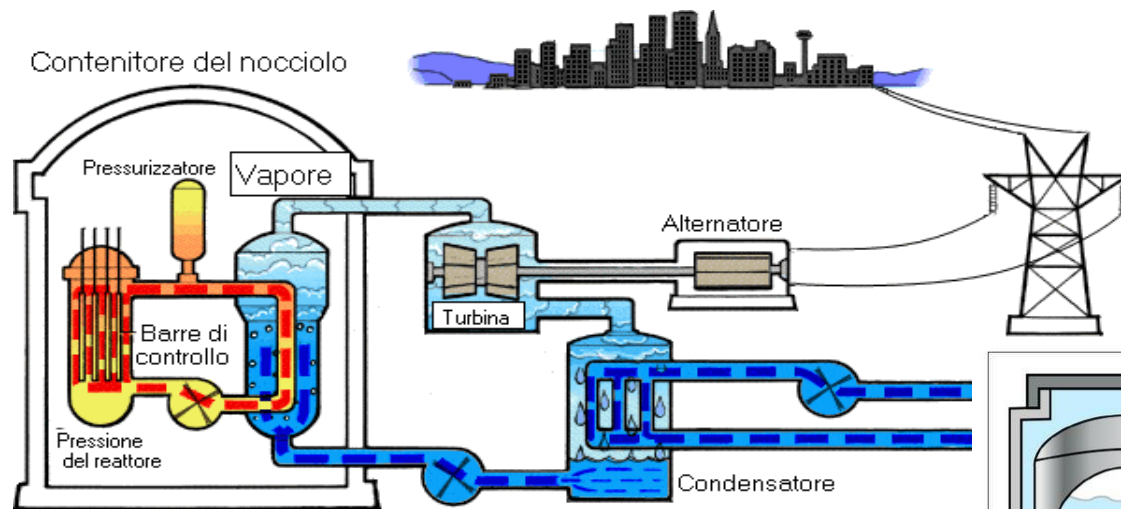
In generale adottano un **reattore** - *Reactor Pressure Vessel (RPV) integrale* in cui sono contenuti **tutti i componenti del sistema primario** (si veda figura):

- il core con il combustibile nucleare;
- le barre di controllo con i sistemi di comando;
- i principali componenti del circuito di raffreddamento primario:
 - ✓ il generatore di vapore;
 - ✓ il pressurizzatore;
 - ✓ le pompe di circolazione.

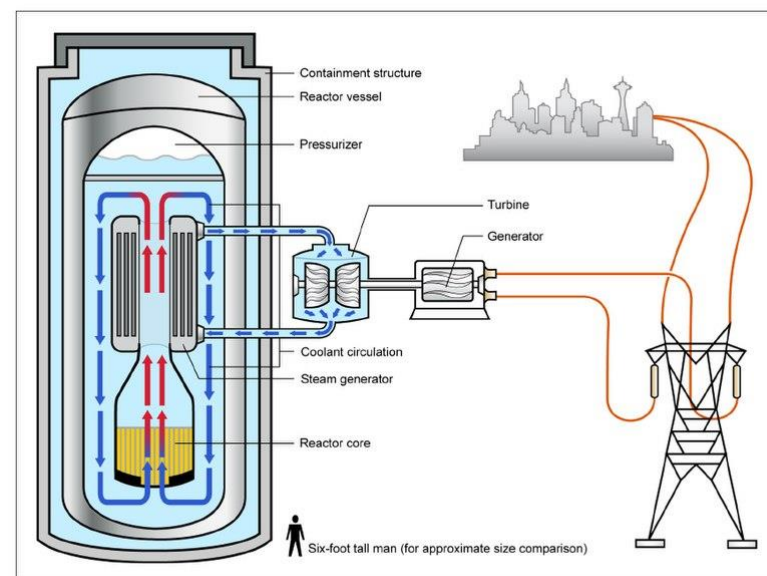
Il 60% circa dei reattori in funzione nel mondo sono PWR

Ingg. Massimo Sepielli e Alessandra Di Pietro

3. Confronto tra un reattore PWR tradizionale e un reattore SMR di tipo integrale PWR



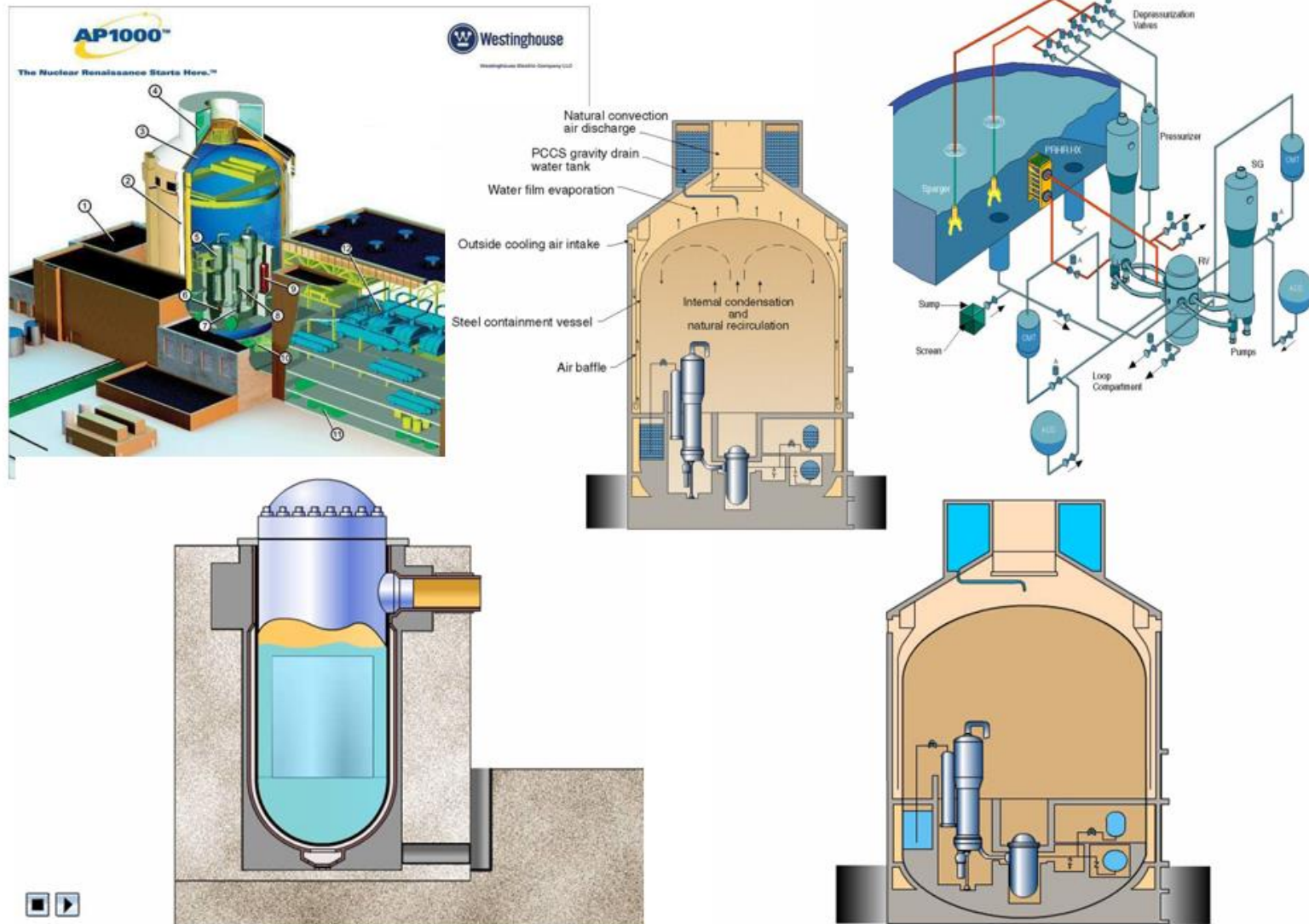
Schema di impianto con reattore PWR tradizionale



Source: GAO, based on Department of Energy documentation. | GAO-15-652

Schema di impianto con reattore SMR di tipo integrale PWR

3. Il reattore ad acqua pressurizzata a sicurezza passiva - L'AP1000



Ingg. Massimo Sepielli e Alessandra Di Pietro

Seminario - La sostenibilità energetica delle tecnologie per la IA, una ulteriore motivazione per rilanciare l'energia elettronucleare in Italia

28/05/2025

pag. 53

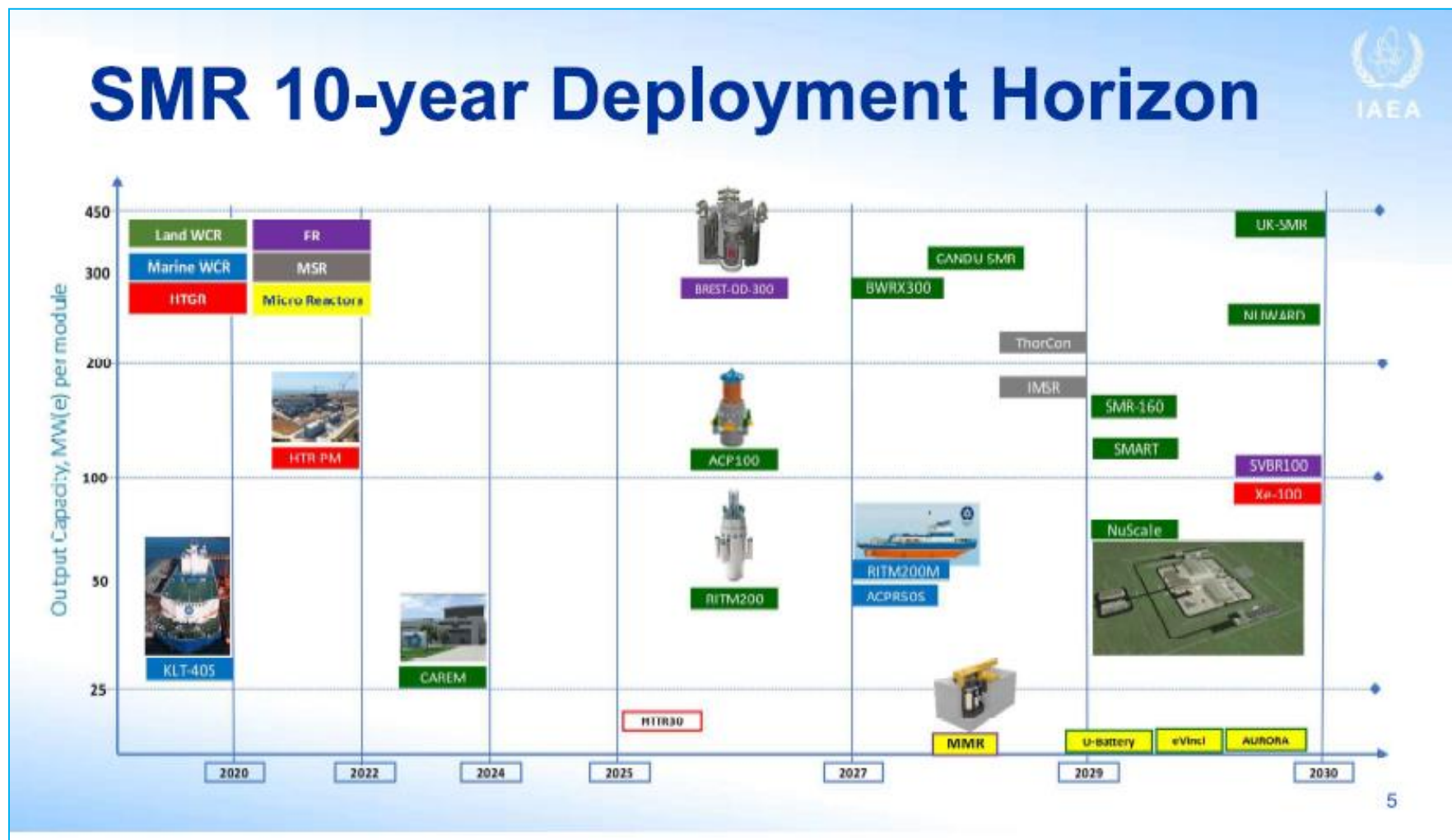
3. SMR: chi & quando

- IAEA (2020): **74 progetti di SMR** nel mondo
- **2 SMR già in funzione** (RUS, CHN), **1 in costruzione** (ARG)
- **Stadio avanzato** di sviluppo: CHN, RUS, USA, SKOR; EU: programma «aggressivo» FRA, ITA/ROU-ALFRED, Est-EU, interesse EC
- Fase di «entusiasmo»: molte **start-up** (da TerraPower-Bill Gate s a Newcleo-Stefano Buono)
- **Target:** deployment entro **2030**

Mass production & Supply Chain
Licensing
EU: Taxonomy



3. Cronoprogramma SMR al 2030



Fonte: IAEA

Ingg. Massimo Sepielli e Alessandra Di Pietro

Seminario - La sostenibilità energetica delle tecnologie per la IA, una ulteriore motivazione per rilanciare l'energia elettronucleare in Italia



4. Panoramica sui reattori SMR oggi in commercio e in via di sviluppo

Ingg. Massimo Sepielli e Alessandra Di Pietro

Seminario - La sostenibilità energetica delle tecnologie per la IA, una ulteriore motivazione per rilanciare l'energia elettronucleare in Italia

4. Reattore SMR NuScale

Il NuScale è un progetto di reattore PWR integrale americano, approvato dalla normativa nucleare americana ad agosto 2020. **Attualmente sotto revisione del regolatore.**

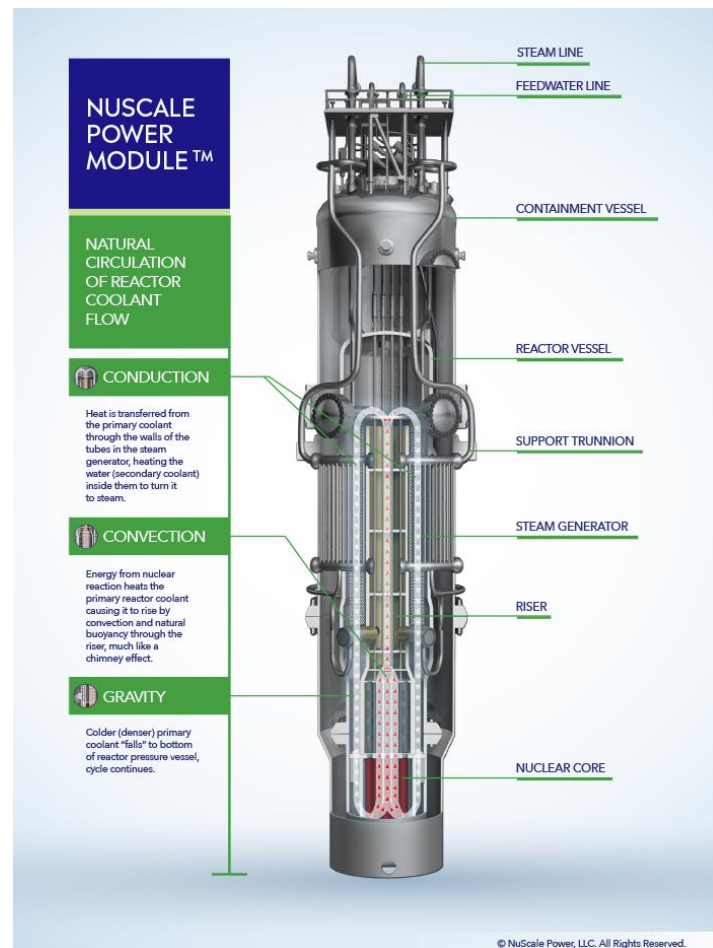
Questo reattore dalla **potenza elettrica di circa 60 MWe** è **implementabile fino a 12 moduli** per una potenza complessiva di circa 720 MWe.

Il **combustibile è UO_2 arricchito al 4,95% in ^{235}U** e la ricarica del combustibile è prevista ogni 2 anni.

E' **refrigerato e moderato ad acqua leggera.**

Il nocciolo posizionato in basso, al di sotto di tutti i componenti primari è **refrigerato interamente con circolazione naturale.**

- Lo **schema d'impianto** è progettato per mitigare una eventuale **perdita minima di liquido refrigerante** (SBLOCA, *Small Break Loss of Coolant Accident*) e per **rendere impossibile una grande perdita** (LBLOCA, *Large Break Loss of Coolant Accident*).
- In questa tipologia di reattore è **implementato particolarmente l'aspetto di sicurezza legato al design**, ovvero alla geometria (**safety by design**).



Schema reattore NuScale (nuscalepower.com)

4. Reattore NuScale: i sistemi di sicurezza

- I sistemi di sicurezza prevedono **2 sistemi di raffreddamento di emergenza del nocciolo del reattore** (*Emergency Core Cooling Systems - ECCS*) di tipo **passivo** e **il contenimento interrato immerso in piscina**, con pressione di progetto, pari a 34 bar, maggiore della pressione di uno *Small Break Loss of Cooling Accident (SBLOCA)*.
- La **piscina interrata in cui è immerso il reattore** è costruita in calcestruzzo armato e rivestita da un liner di acciaio inossidabile; **può smaltire il calore di decadimento per 3 giorni garantendo una temperatura di parete del fluido pari a 93°C**.
- Il collocamento interrato offre una maggiore **protezione contro eventi esterni**.



Fonte immagine: energy.gov/advanced-small-modular-reactors-smr

Il sistema a circolazione naturale è progettato per essere sufficientemente robusto da poter essere utilizzato come **sistema di base per il raffreddamento del nocciolo nel caso di funzionamento a piena potenza**, eliminando così completamente la necessità di pompe.

4. Dati principali del progetto NuScale

Potenza termica	160 MWt
Potenza elettrica	45 MWe
Dimensioni del vessel	2,7 (D) x 13,7 (H) m (maggiore inerzia termica)
Pressione del primario	127 bar
Portata di refrigerante	0,6 m ³ /s
Pressione del vapore	31 bar
Portata di vapore	70 kg/s
T _{in} acqua di alimento	150 °C
Cluster	17 x 17 fuel pin array
Arricchimento in U ₂₃₅	4,95 %
Pompe di alimento primario	Assenti (circolazione naturale) (safety by design)
ECCS (DHRS e CHRS)	2 sistemi passivi a circolazione naturale (safety by design)
Refuelling	Ogni 2 anni
Contenimento secondario	Sotterraneo immerso in piscina (protezione contro eventi esterni)

4. Reattore SMR CAREM

Il CAREM è un progetto di reattore PWR integrale, sviluppato dalla *Comisión Nacional de Energía Atómica* (CNEA), Argentina. **Attualmente in fase di costruzione.**

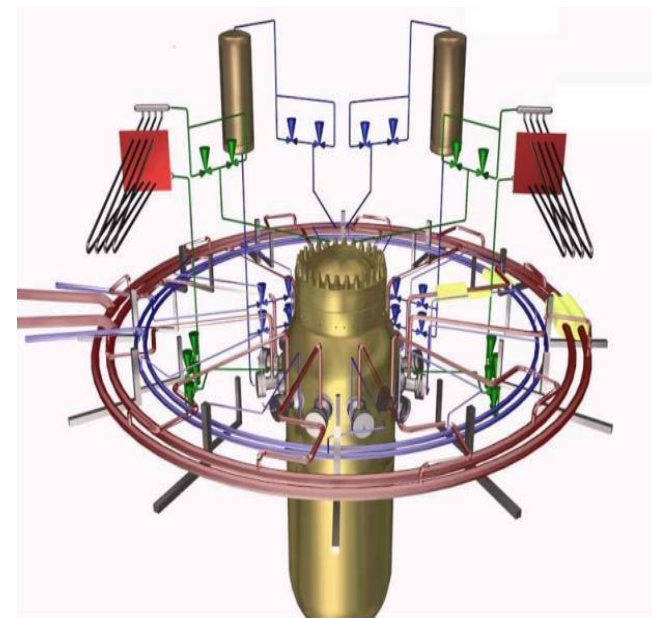
Ha una **potenza di circa 30 MWe** ed è stato concepito sia per la **produzione di energia elettrica** sia per l'**utilizzo del vapore** (configurazione di cogenerazione) **per usi civili** e per la **dissalazione dell'acqua di mare**.

Il **combustibile è UO_2 arricchito al 3,4% in ^{235}U** con **ricarica del combustibile ogni 14 mesi**.

E' **refrigerato e moderato ad acqua leggera**.

Il pressurizzatore è assente: l'impianto lavora alla pressione di saturazione corrispondente alla temperatura di uscita del refrigerante dal nocciolo.

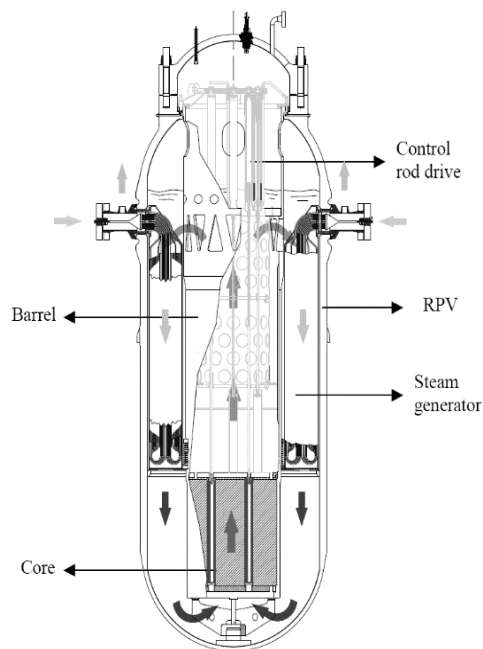
- **Il sistema primario è auto-pressurizzato con il refrigerante primario in circolazione naturale.**
- Una **perdita importante di refrigerante (LBLOCA) è drasticamente ridotta o eliminata** per le caratteristiche intrinseche di sicurezza.
- **Sistemi di sicurezza passivi ridondanti e diversificati.**
- **Il contenimento secondario è in calcestruzzo armato** con liner di acciaio inossidabile interno con sistemi di soppressione del vapore e riduzione della pressione.



Fonte immagine: Enea - Report RdS/2010/133

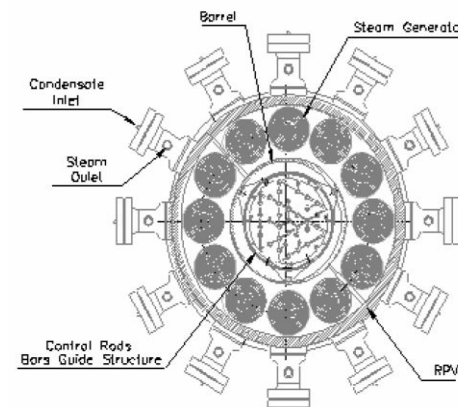
Layout reattore CAREM e principali sistemi ausiliari

4. Reattore CAREM - ulteriori caratteristiche di sicurezza



Reattore CAREM
Tipologia di reattore integrale

- Il meccanismo idraulico delle barre di controllo (CRDM) interno al *Reactor Pressure Vessel* RPV (barre movimentate con **meccanismo step-by-step**) evita incidenti di reattività;
- **Sistema di iniezione dell'acqua borata di tipo passivo**: quando la pressione supera una soglia fissata o in caso di LOCA, le valvole che collegano 2 serbatoi posti nel secondario con il RPV si aprono e **il liquido cade per gravità**;
- **Sistema di rimozione del calore residuo (*Residual Heat Removal System* – RHRS) di tipo passivo**;
- **Sistema di raffreddamento di emergenza del nocciolo del reattore (ECCS) di tipo passivo**;
- Il RPV è dotato di **3 valvole di sfioro di sicurezza** che intervengono **in caso di sovrappressioni**, ciascuna con capacità pari al 100 %.



Sezione orizzontale reattore CAREM

4. Dati principali del progetto CAREM

Potenza termica	100 MWt
Potenza elettrica	27 MWe
Dimensioni del vessel	3,2 (D) x 11 (H) m
Pressione del primario	122,5 bar
T _{in} core	248 °C
T _{out} core	326 °C
Portata di refrigerante	0,41 m ³ / s
Pressione del vapore	47 bar
Surriscaldamento	30 °C
T _{in} acqua di alimento	200 °C
T _{out} vapore	290 °C
Arricchimento in U ₂₃₅	3,4 %
Controllo della reattività	25 CR di cui 6 con funzioni di sicurezza
Pompe di alimento primario	Assenti
ECCS	Passivo a circolazione naturale (safety by design)
refuelling	Ogni 14 mesi
Generatore di vapore	12 Once - through con vapore lato tubi
Contenimento secondario	Calcestruzzo armato con liner di acciaio inossidabile interno (protezione contro eventi esterni)

4. Reattore SMR KLT-40S

Il KLT-40S è un progetto di reattore SMR modulare di tipo PWR sviluppato in Russia basato sul modello e l'esperienza dei rompighiaccio a propulsione nucleare. Può produrre energia elettrica per usi civili in zone poco abitate, per la desalinizzazione dell'acqua e per il teleriscaldamento.

In esercizio dal maggio 2018.

Ha una **potenza di 35 MWe/150 MWth** e un **design compatto**.

Il combustibile è **biossido di uranio UO_2** con un arricchimento $<20\%$ che permette tempi di refuelling di 3-4 anni e una resistenza alla proliferazione.

E' refrigerato e moderato ad acqua leggera.

- **Il sistema primario è a quattro loop a circolazione forzata e naturale.**
 - ✓ **I generatori di vapore sono** del tipo once through **collegati** attraverso bocchelli **direttamente al vessel** a formare una struttura compatta: **si eliminano le tubazioni del primario** e la necessità di sistemi di arresto e rimozione del calore di emergenza.
- **I sistemi di sicurezza sono di tipo passivo.**
- **L'impianto è costruito interamente in fabbrica e trasportato direttamente sul sito di destinazione.**



Fonte immagine: scenarieconomici.it

4. Reattori nucleare refrigerati a gas: principali caratteristiche tecnologiche

I reattori termici di tipo Small modular Reactor (SMR) ad alta temperatura refrigerati a gas, *High Temperature Gas Reactors* (HTGR), utilizzano come refrigerante elio, anidride carbonica o azoto e come moderatore grafite. Appartengono a questa tipologia di reattore, in prevalenza, progetti ancora in fase di ricerca.

Solo alcuni HTGR sono già operativi, ad esempio l'HTR-PM in Cina.

Utilizzano combustibili a base di Torio (Th), Uranio (U) ad alto o basso arricchimento e/o Plutonio (Pu).

- Hanno un **coefficiente di reattività alla temperatura negativo**: la reazione di fissione rallenta all'aumentare della temperatura (feedback di reattività).
- **Non è necessario un edificio di contenimento** poiché i prodotti di fissione rimangono all'interno delle particelle di combustibile.
- La loro **costruzione** è prevista **interrata**.
- Possono raggiungere **elevate temperature** (dell'ordine di **1000°C**) con una **efficienza termica di circa il 50%** e sono definiti ad alto rendimento termodinamico.
- **Il calore prodotto può essere usato per varie applicazioni civili e industriali**:
 - ✓ **produzione convenzionale di vapore** (tramite un generatore di vapore);
 - ✓ **produzione di energia elettro-nucleare** (ciclo di Brayton a gas) con circa il 50% di efficienza termica;
 - ✓ **dissalazione acqua di mare**;
 - ✓ **produzione di idrogeno** a basso impatto ambientale (con un rendimento del 36% attraverso il processo dell'elettrolisi).

Fonte immagine: associazioneitalianucleare.it

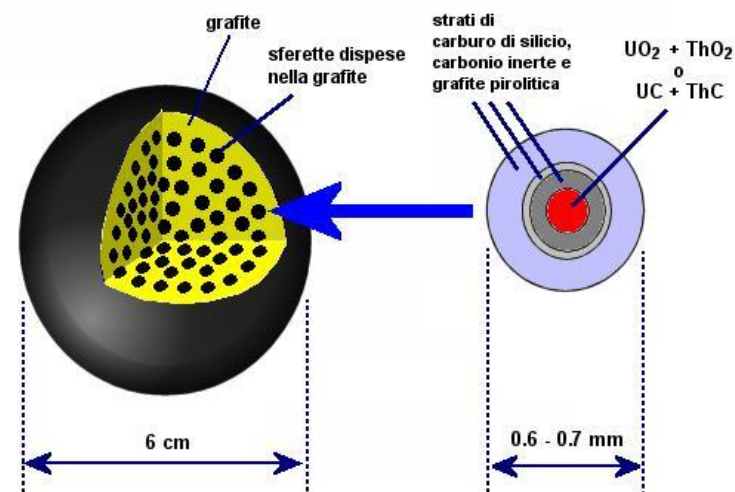
4. Reattore nucleare SMR a gas HTR-PM (pebble bed)

Il reattore SMR a gas HTR-PM è un reattore termico ad alto rendimento termodinamico refrigerato ad elio e dalla caratteristica configurazione a letto di sfere (pebble bed). Nel 2022 in Cina, a Shidaowan, due di questi reattori da 250 MWth che alimentano un turboalternatore da 210 MWe sono stati collegati alla rete di distribuzione di energia elettrica. In questa configurazione di impianto è possibile accorpare più moduli.

❑ Il combustibile è costituito da sfere di circa 60 mm di diametro con all'interno particelle di TRISO (*TRI-structural-ISotropic particle fuel*).

- Ogni particella è costituita da un nucleo di combustibile di circa **0,5 mm di diametro**: ossi-carburo di uranio o biossido di uranio (circa 9 gr) con uranio arricchito fino al **8,5% in ^{235}U** . Le particelle sono rivestite da **strati di carbonio pirolitico e carburo di silicio** e di **grafite**.
- Il rivestimento confina i prodotti di fissione ed è stabile fino a temperature superiori a 1600°C .
- Le sfere di combustibile vengono calate dall'alto ed estratte attraverso un apposito condotto.

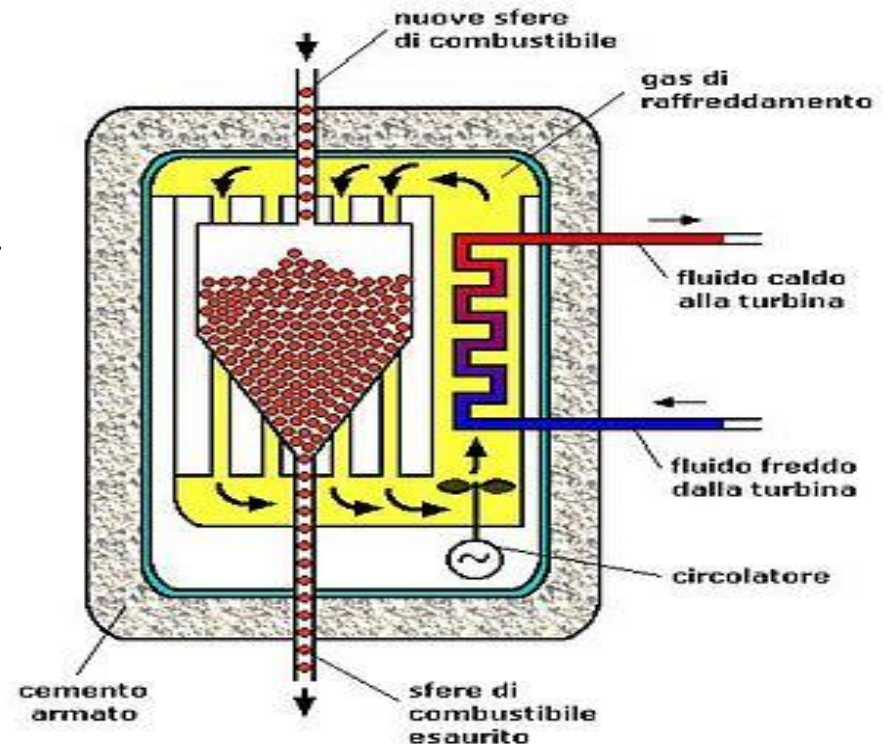
STRUTTURA DELLE SFERE DEL "PEBBLE BED"



4. Reattore SMR a gas HTR-PM (pebble bed): caratteristiche di sicurezza

- ❑ La rimozione del calore di decadimento avviene per conduzione del calore attraverso la grafite contenuta in uno degli strati di rivestimento delle particelle di combustibile:
 - Il rilascio di calore avviene in tempi maggiori grazie alla grande capacità termica della grafite consentendo ai sistemi passivi un ampio margine di intervento.
- ❑ la densità volumetrica di potenza è relativamente bassa e la potenza è distribuita in più moduli. Ogni modulo ha il suo sistema di emergenza.
- ❑ Il rendimento di questo reattore è di circa il 40%.
- ❑ L'elio viene riscaldato da 250°C a 750°C e la sua pressione di lavoro è di circa 70 atmosfere. Il vapore inviato in turbina ha una pressione di circa 230 atmosfere e una temperatura di 567°C.

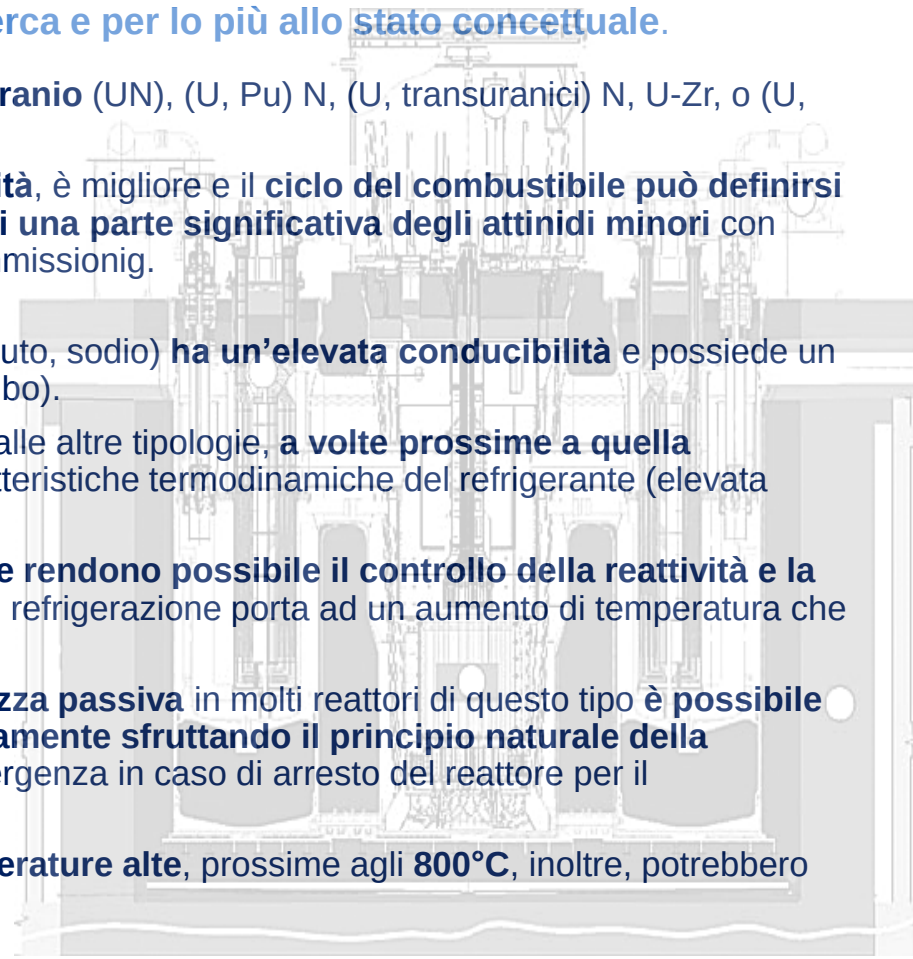
schema di reattore "pebble bed"



4. Reattori SMR a metalli liquidi: principali caratteristiche tecnologiche

I reattori SMR veloci refrigerati a metalli liquidi, i Lead-cooled Fast Reactor (LFR), lavorano ad alte temperature, hanno alti rendimenti termodinamici e tempi di rifornimento del combustibile nucleare molto lunghi (fino a 20 anni). **Sono ancora in fase di ricerca e per lo più allo stato concettuale.**

- Il **combustibile** è costituito per lo più da **nitrato di uranio** (UN), (U, Pu) N, (U, transuranici) N, U-Zr, o (U, Pu) Zr, **arricchito fino al 15-20%**.
- L'utilizzo del **combustibile**, che **ha un'elevata densità**, è migliore e il **ciclo del combustibile può definirsi pressoché «chiuso»** poiché c'è la **trasmutazione di una parte significativa degli attinidi minori** con evidente vantaggio in fase di smaltimento e di decommissioning.
Non hanno moderatore.
- Il **refrigerante** (metallo liquido: piombo, piombo-bismuto, sodio) **ha un'elevata conducibilità** e possiede un **alto punto di ebollizione** (1749°C nel caso del piombo).
- Questi reattori **lavorano a pressioni basse** rispetto alle altre tipologie, **a volte prossime a quella atmosferica** e ciò è reso possibile proprio dalle caratteristiche termodinamiche del refrigerante (elevata conducibilità e alto punto di ebollizione).
- **Le caratteristiche termodinamiche del refrigerante rendono possibile il controllo della reattività e la regolazione automatica della potenza:** la perdita di refrigerazione porta ad un aumento di temperatura che rallenta la reazione (feedback di reattività).
- **Grazie a questa caratteristica intrinseca di sicurezza passiva** in molti reattori di questo tipo è **possibile far circolare il refrigerante (metallo liquido) direttamente sfruttando il principio naturale della convezione**. La presenza di generatori diesel di emergenza in caso di arresto del reattore per il raffreddamento del nocciolo non è necessaria.
- I reattori veloci a metallo liquido che operano a **temperature alte**, prossime agli **800°C**, inoltre, potrebbero rendere possibile la **produzione di idrogeno**.



4. Reattori SMR a sali fusi: principali caratteristiche tecnologiche

I reattori SMR refrigerati a sali fusi, Melted Salts Reactor (MSR) hanno in generale la caratteristica di avere il combustibile disciolto nel refrigerante primario.

Appartengono a questa tipologia di reattori diversi **progetti di ricerca ancora in fase concettuale**.

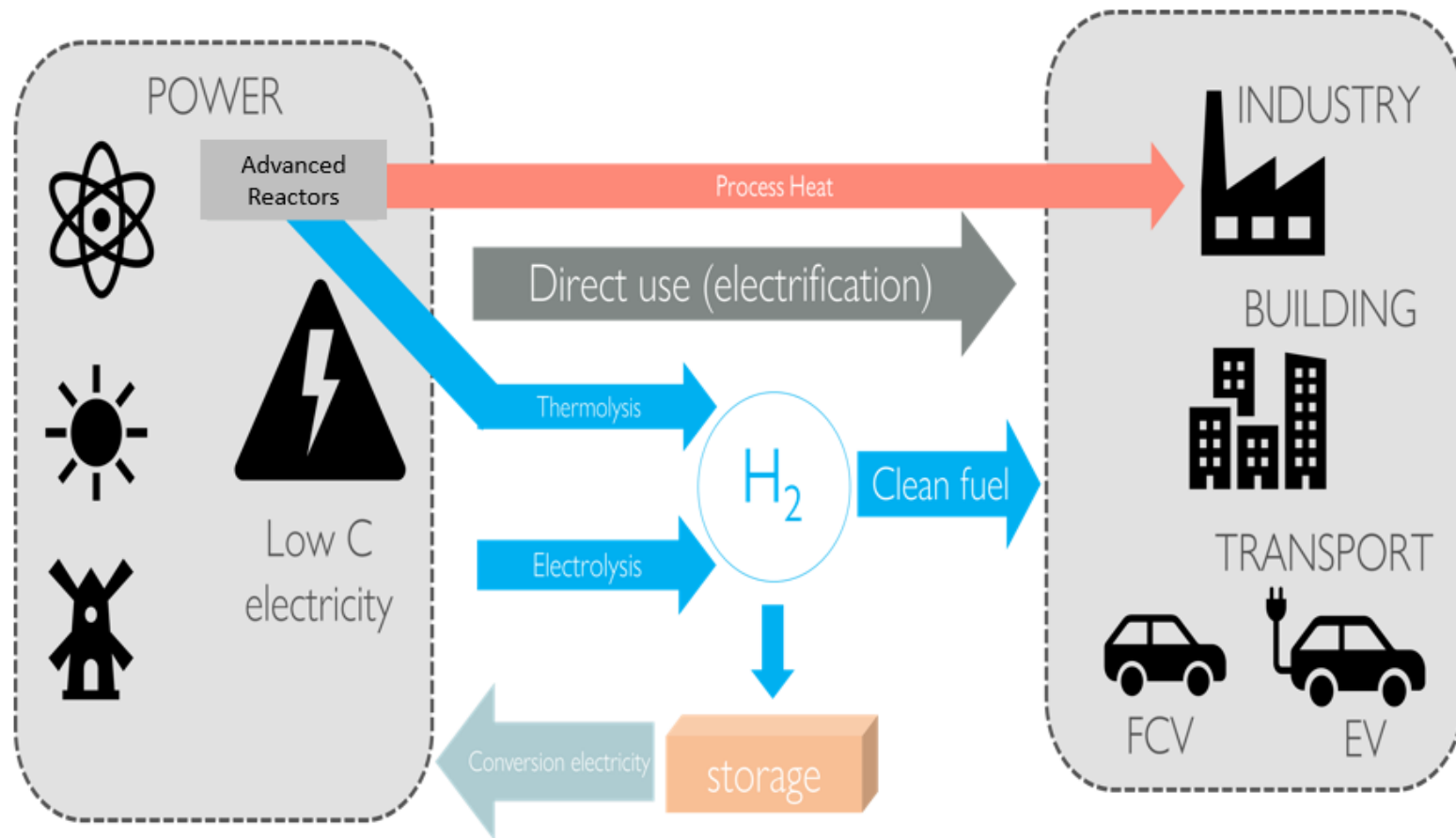
- Il combustibile è una **miscela di sali fusi di fluoruro di berillio e litio in cui è disciolto uranio arricchito, torio o fluoruro di ^{233}U** .
Il moderatore è grafite.
- Il rapporto grafite-combustibile è regolato per avere un bilancio neutronico ottimale e uno spettro neutronico epitermico. **Lavorano a pressioni molto basse.**
- Questi reattori **utilizzando combustibile liquido** operano in condizioni stazionarie poiché **la reattività non varia particolarmente in funzione del tempo** e non c'è bisogno di caricare combustibile in eccesso allo start-up. Concetto di sicurezza intrinseca.
- **Il coefficiente di temperatura è negativo**: all'aumentare della temperatura la densità del refrigerante diminuisce e il combustibile nel refrigerante fuoriesce dal core assicurando lo spegnimento sicuro del reattore (feedback di reattività).
- **I sistemi di emergenza per il raffreddamento del core sono di tipo passivo**; in caso di surriscaldamento del sale le valvole di raffreddamento lo fanno confluire in serbatoi di stoccaggio. Il primario è posto in una hot-box sigillata ed isolata che evita il formarsi di zone fredde e il rischio di solidificazione del sale.



5. Applicazioni tipiche per reattori SMR (propulsione, calore industriale, dissalazione, produzione termoelettrica per reti locali)

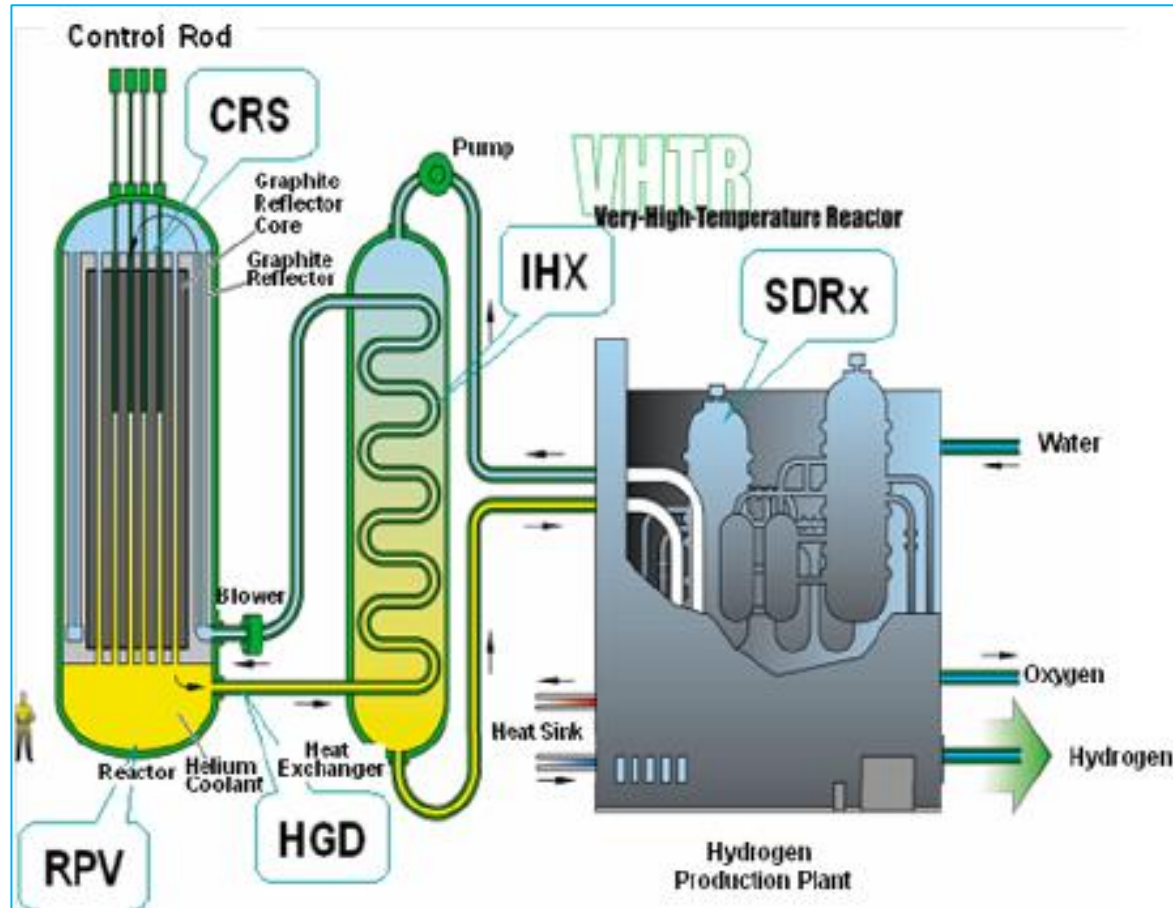
5. Cogenerazione, elettricità, calore e idrogeno

NPPs: large Gen III reactors + Advanced reactors (incl. SMRs)



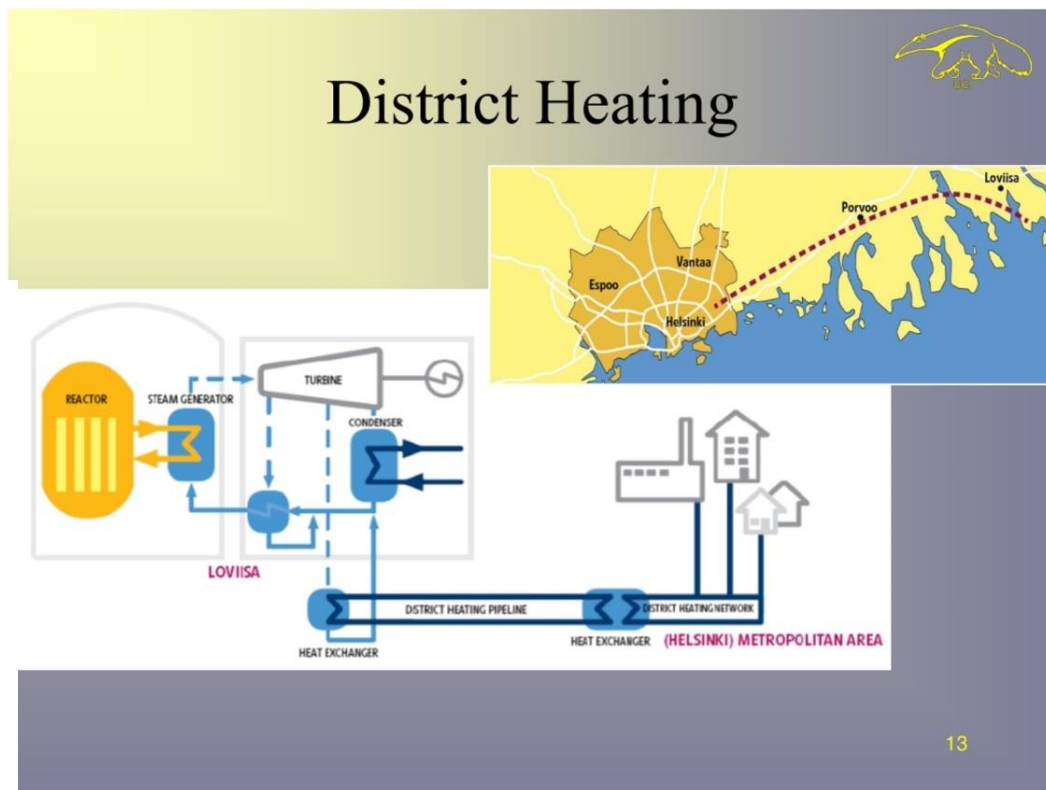
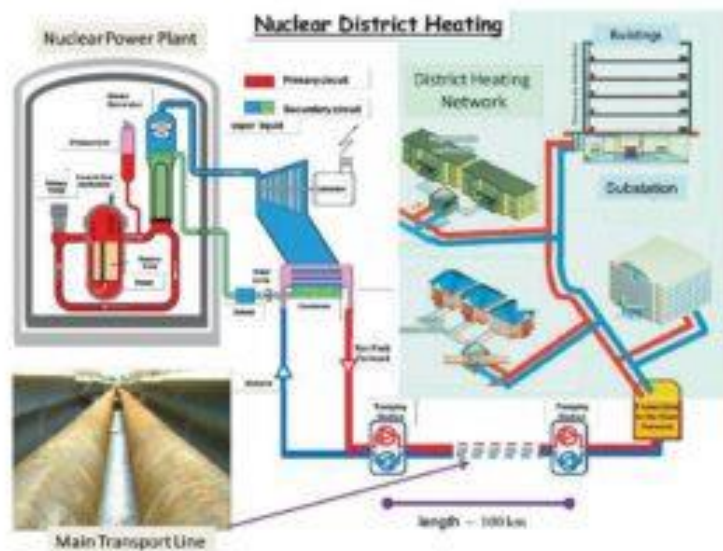
3 low-carbon energy vectors: electricity, heat, hydrogen

5. Reattori cogenerativi per H2



- Scissione termochimica
- No elettrolisi
- Rendimento di Ton H₂/ KWh superiori del 300%

5. Teleriscaldamento



3. Gli SMR tra presente e futuro

IRIS: il primo industriale

FLEX BLUE: il reattore sommerso

NUSCALE: il favorito

CAREM: l'argentino

KLT-40S: il galleggiante

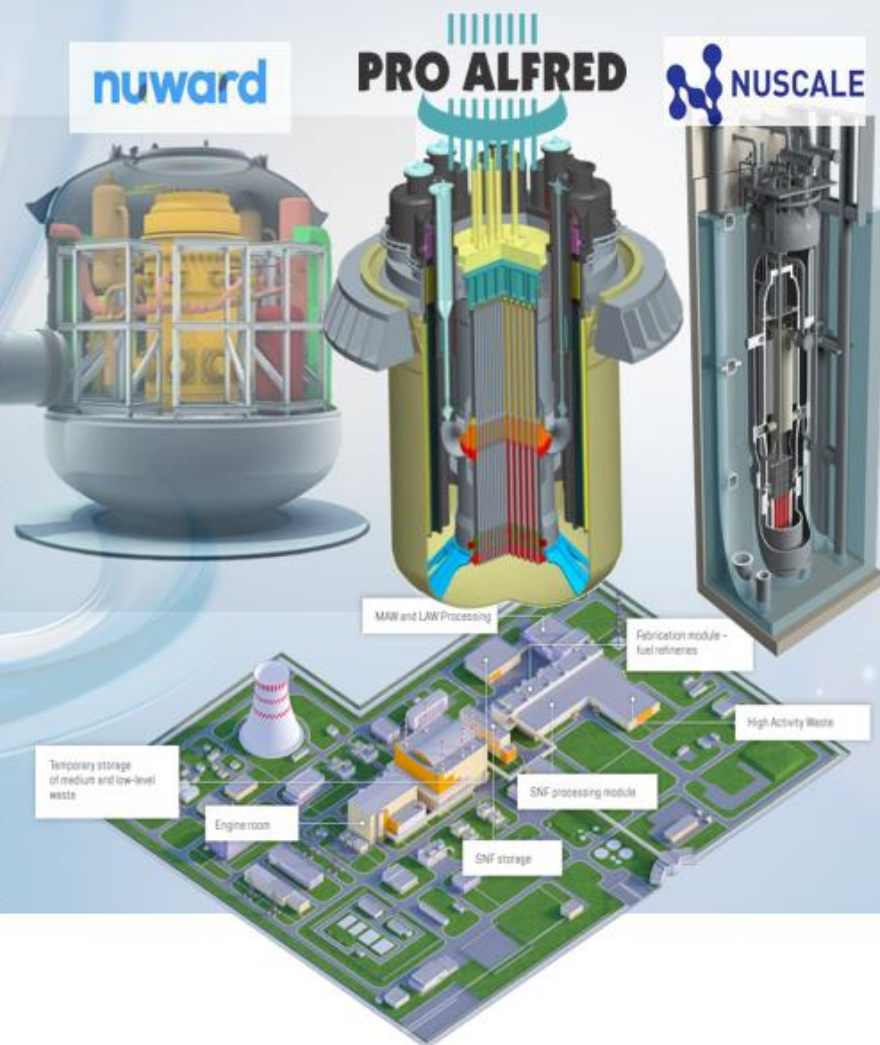
ALFRED: il IV generazione

HTGR: SMR per fare idrogeno

NATRIUM: Bill Gates

FUJI: Torio e Sali fusi

U-Battery: Il micro-reattore



- 
6. Applicazione degli SMR dedicata ad utenze concentrate energivore: i Data Center per l'IA
7. Le necessità energetiche dei Data Center per l'IA oggi in operazione e gli attuali sistemi energetici che li sostengono
8. L'impatto dei Data Center sulla richiesta di energia in rete
9. Fattibilità teorico-pratica, normativa e sociale dell'impiego di SMR ed esempi internazionali

Energia nucleare e Data Center (AI) - *Elementi di contesto e iniziative*



Consumi elettrici concentrati e necessità di refrigerazione spinta per Data Center AI



Necessità di sostenibilità, continuità e stabilità/affidabilità della produzione energetica (termica ed elettrica)



Utilizzo rete elettrica nazionale capiente, affidabile, sostenibile (con componente nucleare da reattori large scale – taglia 1000 MWe)



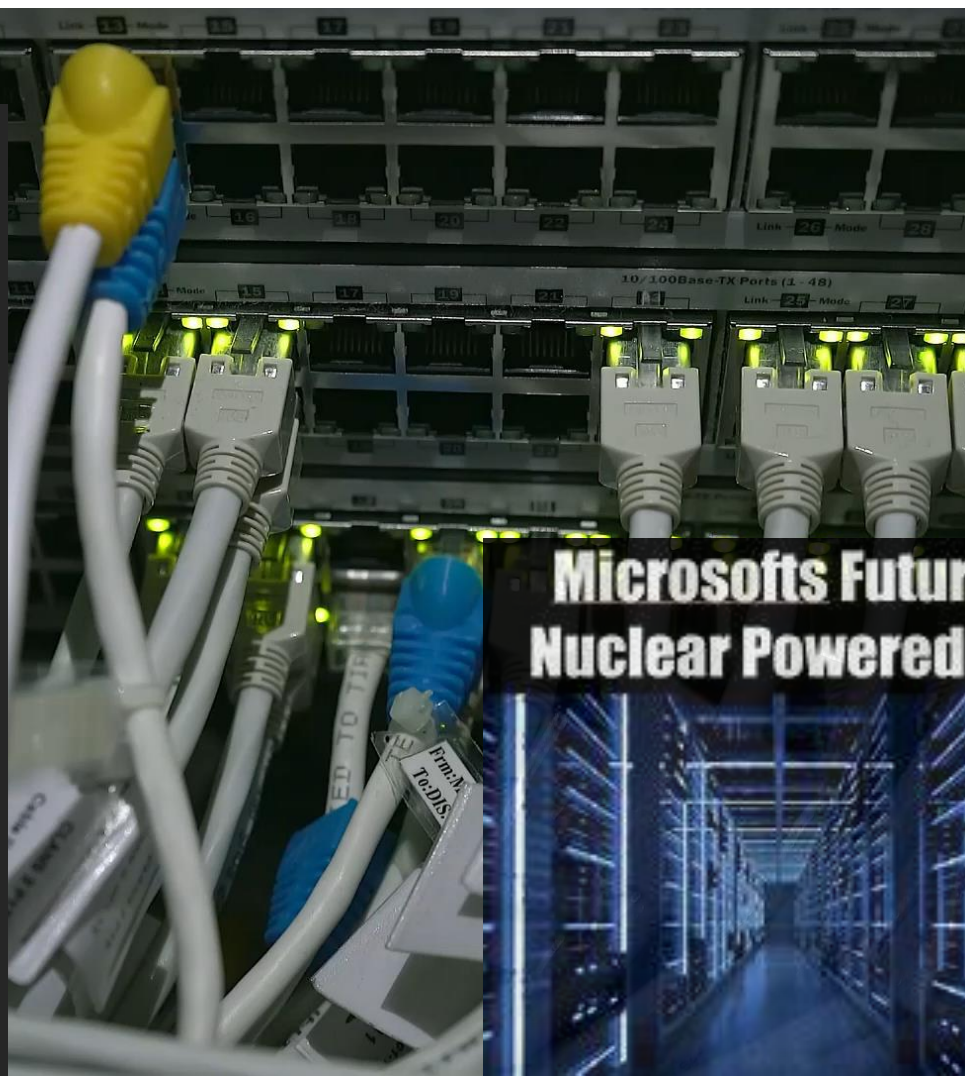
Utilizzo di reattori nucleari dedicati ai DC – AI (SMR – taglie fino a 300 MWe)



Accordi e progetti industriali delle Big Tech e nel mondo per AI e supercomputing

Iniziative industriali su SMR

- ❖ USA
 - ✓ Amazon
 - ✓ MICROSOFT
 - ✓ Silicon Valley
- ❖ Cina e Asia
- ❖ Paesi Arabi
- ❖ Federazione Russa
- ❖ Alleanze Europee
- ❖ Alleanze Italiane



RECENTI INIZIATIVE

- DEEP ATOMIC SMR for DC
- TVA US BWRX-300



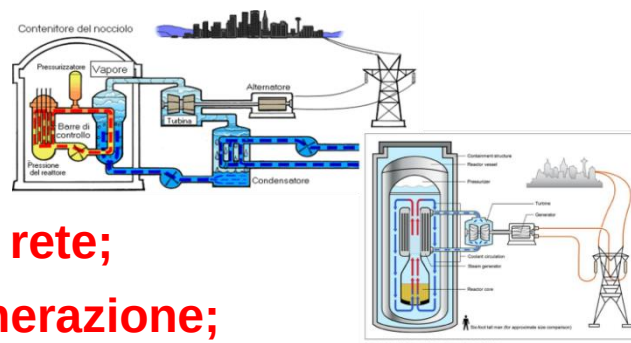
Reattori large scale vs SMR per le esigenze energetiche dei data center - AI

1. PRO REATTORI LARGE SCALE

- ✓ Potenzialità di alimentazione elettrica (>SMR);
- ✓ Flessibilità di alimentazione elettrica;
- ✓ Soluzione energetica generale e non specifica di approvvigionamento;
- ✓ Localizzazione indipendente dal Data Center;
- ✓ Criteri /requisiti disaccoppiati.

2. PRO SMR

- ✓ SMR dedicato svincola da black-out della rete;
- ✓ Alimentazione e termica (freddo) in cogenerazione;
- ✓ Area complessiva di sicurezza (isola);
- ✓ Applicazione SMR in area industriale eventualmente senza area di rispetto (EPZ);
- ✓ Costruzione più rapida?



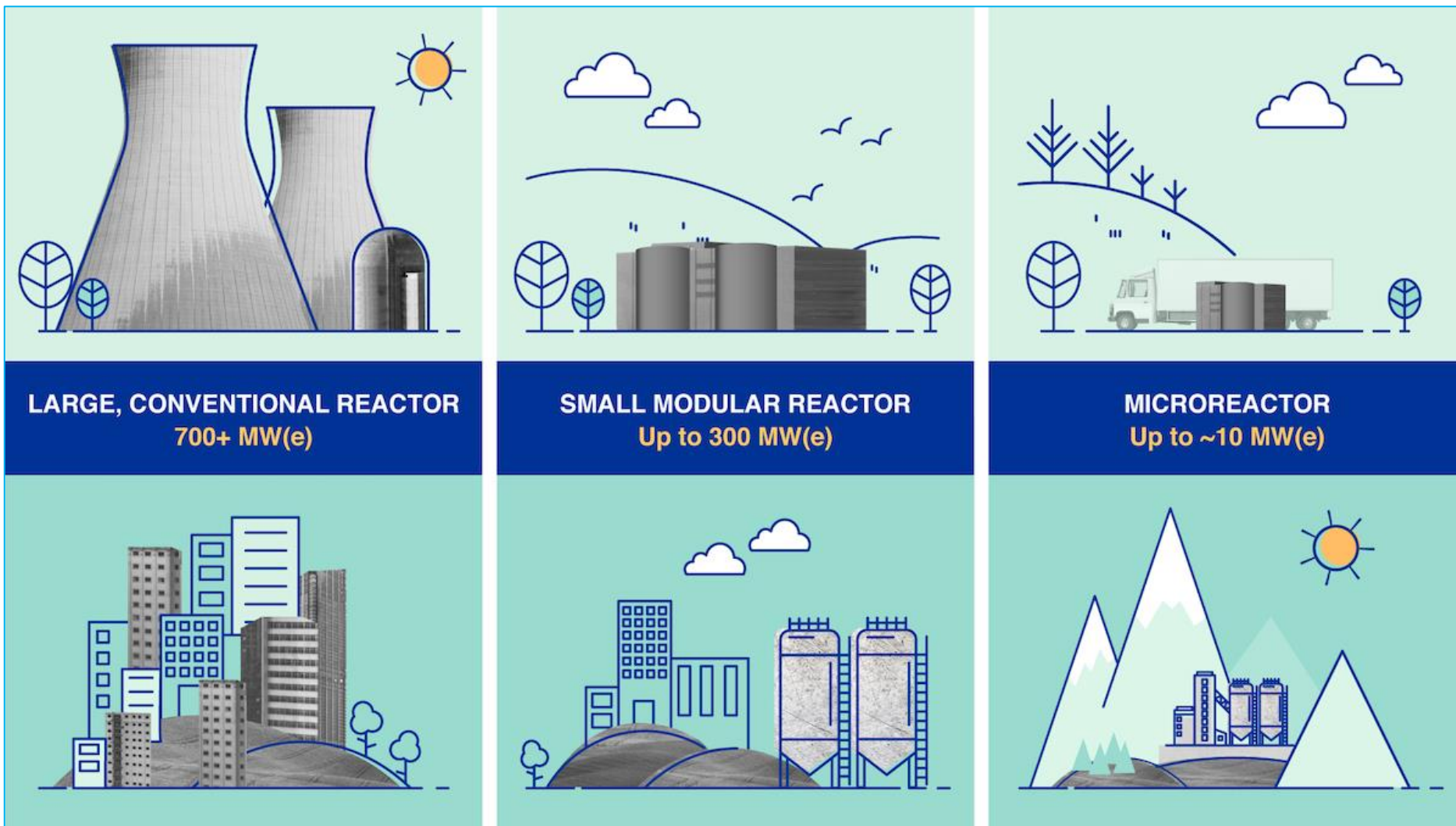
Criteri generali per la localizzazione impianto elettronucleare

1. Disponibilità di acqua di raffreddamento;
2. Orografia (valutazione);
3. Sismicità (valutazione);
4. Falda (valutazione);
5. Safety (incidente, impatto esterno);
6. Security (attacco malevolo);
7. Accettazione sociale;
8. Rete elettrica AT;
9. Consumo elettrico;
10. Attività industriali (DC);
11. Popolazione (EPZ).



Alla base bisognerà operare una analisi atta a verificare la compatibilità in termini di requisiti necessari e di normativa per collocare i Data Center e la tecnologia nucleare SMR in una zona comune.

SMR e Data Center

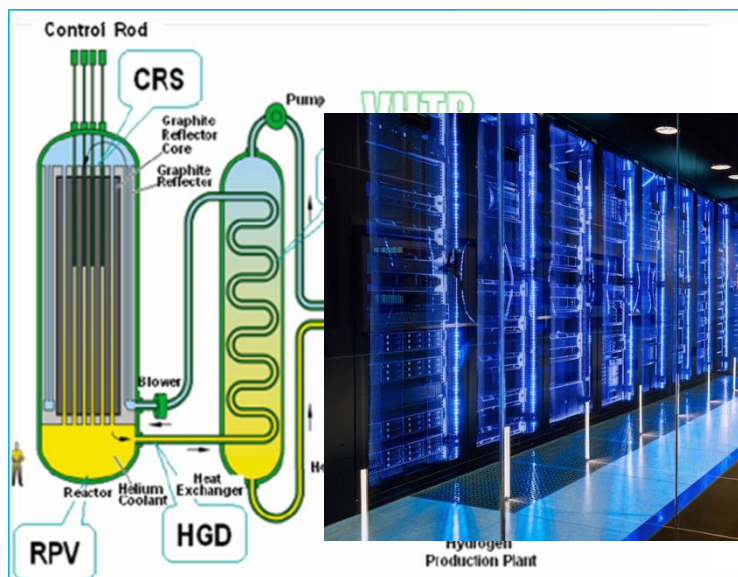
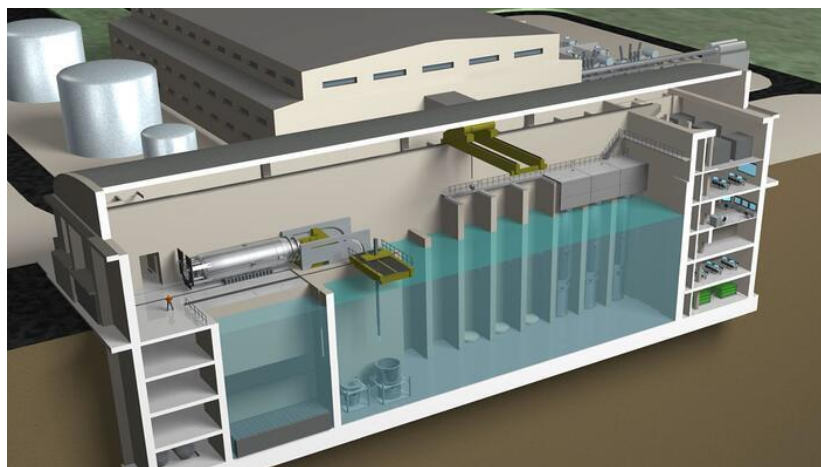


Ingg. Massimo Sepielli e Alessandra Di Pietro

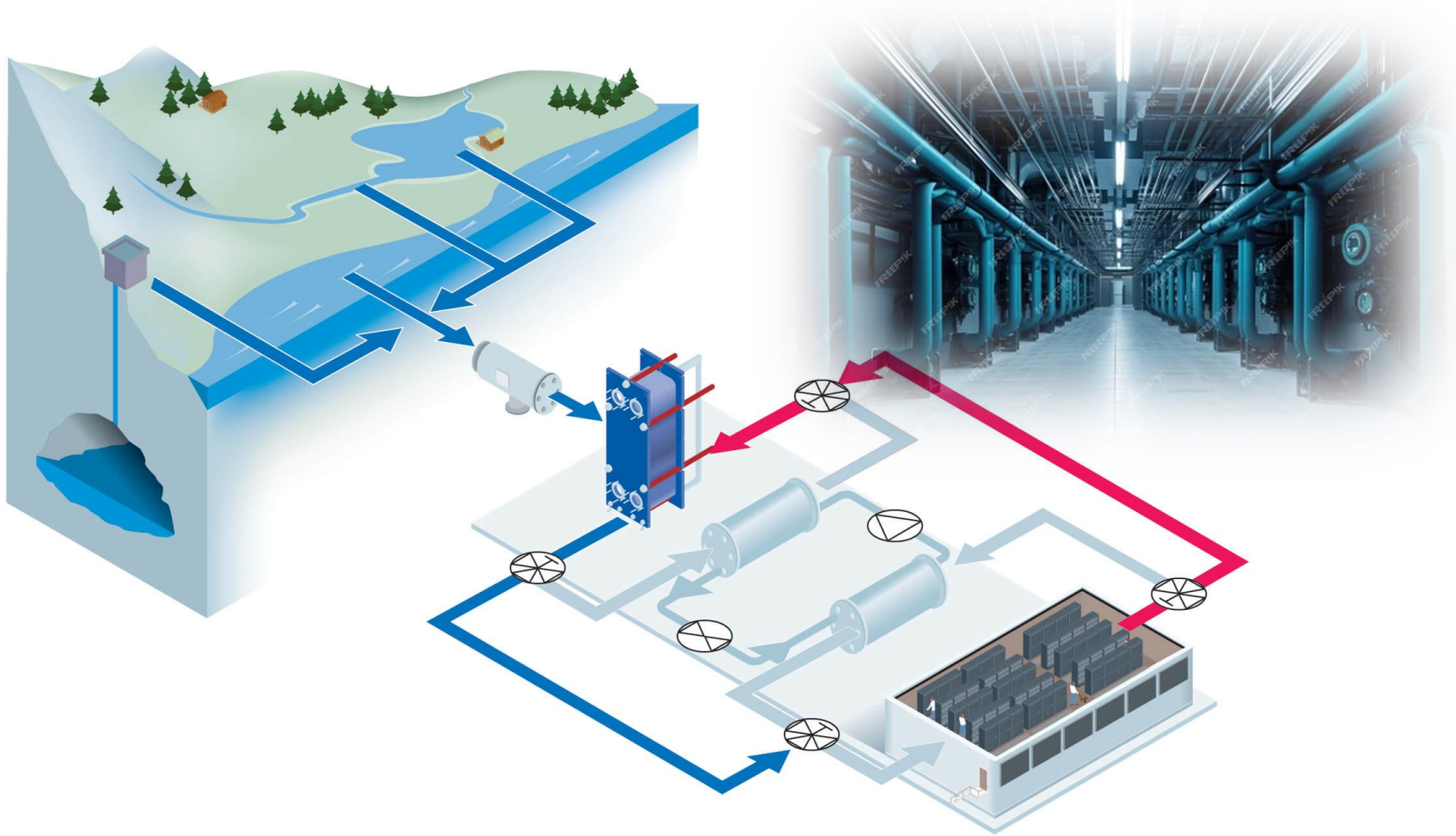
Seminario - La sostenibilità energetica delle tecnologie per la IA, una ulteriore motivazione per rilanciare l'energia elettronucleare in Italia

Interfaccia SMR / Data Center

1. **Alimentazione elettrica per liquid cooling:** SMR genera output elettrico che va su trasformatori M/T e alimenta tutto il data center e in particolare i compressori per il liquid cooling.
2. **Alimentazione termica cogenerativa:** il calore generato nel secondario viene scambiato con un terzo circuito che va a costituire la sorgente calda di un circuito di una macchina frigorifera ad assorbimento.



Free cooling

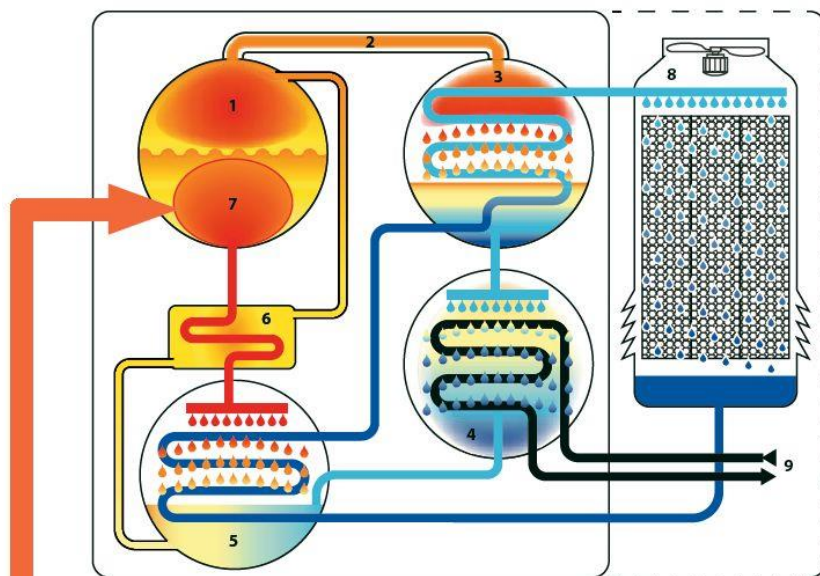


Raffreddamento ad aria e basse potenze funzione T esterna

Ingg. Massimo Sepielli e Alessandra Di Pietro

Seminario - La sostenibilità energetica delle tecnologie per la IA, una ulteriore motivazione per rilanciare l'energia elettronucleare in Italia

Macchine ad assorbimento



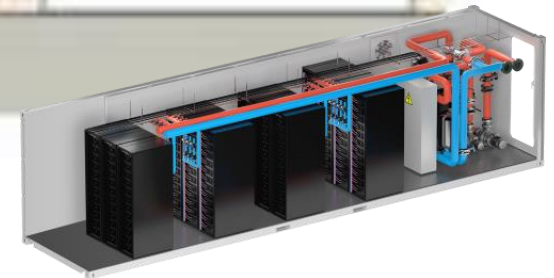
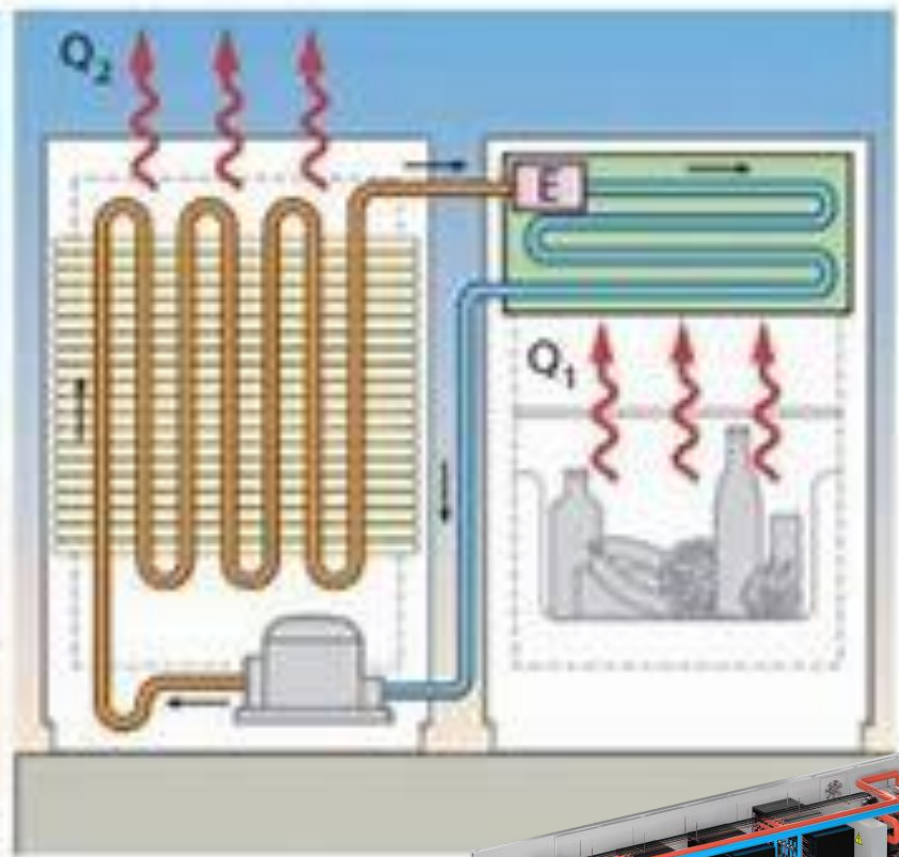
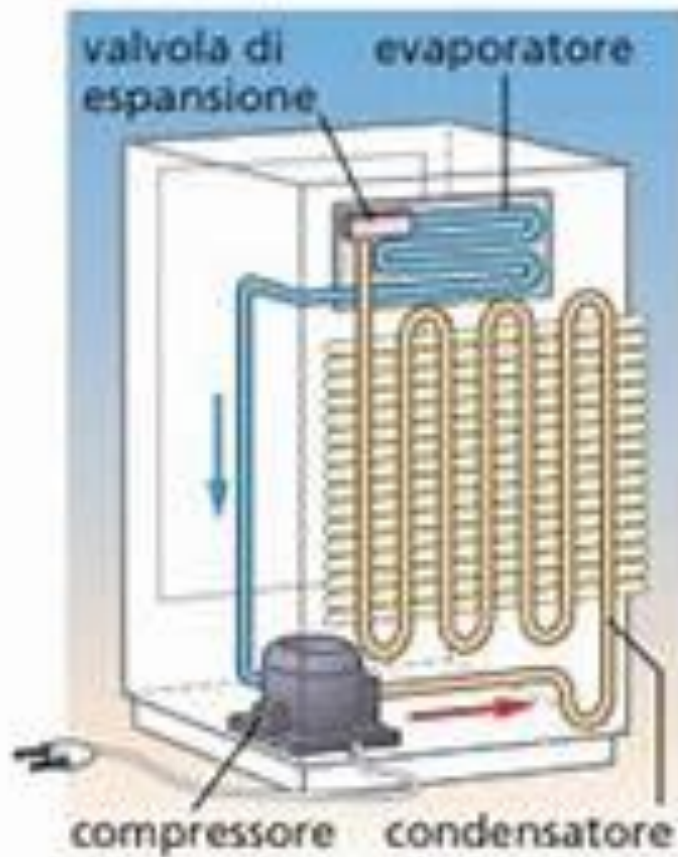
TIPO ALIMENTAZIONE



Aria/liquido e potenze limitate funzione DT



Macchine frigorifere



A compressione per potenze elevate

Energia nucleare e Data Center



Ingg. Massimo Sepielli e Alessandra Di Pietro



Seminario - La sostenibilità energetica delle tecnologie per la IA, una ulteriore motivazione per rilanciare l'energia elettronucleare in Italia

28/05/2025

pag. 85

Questioni

-  Progettazione integrata: isole DC e SMR
-  Adeguamento rete nazionale con contributo decarbonizzato della generazione elettronucleare
-  Tecnologie pronto impiego o customizzate
-  Ciclo combustibile (tipo GNEP/IFNEF?)
-  Security isola SMR/DC
-  Aggiornamento normativa nucleare per le specifiche applicazioni
-  Accettazione energia nucleare uso civile



Normativa nucleare



1. **D.Lgs. 101/2020 e s.m.i. che ha sostituito il D.Lgs. 230/95.**
2. **International Commission on Radiological Protection (ICRP)**
3. **Direttive Euratom sulla Sicurezza dei Reattori nucleari e recepimento nazionale.**
4. **Raccomandazioni WENRA e ENSREG.**
5. **Safety standards e salvaguardie di IAEA.**
6. **Norme UNI – EN.**
7. **Normative nazionali per la licenza di reattori nucleari nei Paesi produttori.**
8. **Guide tecniche ISIN.**
9. **Testo UNICO ambientale (VIA/VAS).**
10. **SMR è comunque un impianto nucleare Capo VII e quindi è soggetto a vincoli, e prescrizioni di legge.**

Conclusioni



Data Center per AI richiedono sempre maggiore raffreddamento dei processori e apparati, continuo, intenso, affidabile, sostenibile



SMR possono essere dedicati per cooling medie alte potenze 10-300 MWe



SMR per fornitura elettrica (cooling liquido con ciclo frigo a compressione) e calore (ciclo frigo ad assorbimento)



Isole integrate e protette *safety / security* SMR-Data Center



Data Center AI per SMR: sistemi di monitoraggio, controllo, supervisione e supporto operatore (decision making)

Bibliografia essenziale

- Impianti Nucleari - Autore: Maurizio Cumo.
- Centrali Elettronucleari I - Autore: Luciano Sani.
- Quaderno Io Roma N.1/2019 - Tecnologie nucleari innovative: i reattori SMR: prospettive di utilizzo - Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma.
- Quaderno Io Roma N. 4S/2023 – Commissione Ricerca e Reattori Innovativi - Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma.
- Aspetti ingegneristici della fissione nucleare – Autore: Alessandra Di Pietro – Seminario «La Ricerca di frontiera per l'energia nucleare sostenibile. Le tecnologie più innovative per la produzione di energia decarbonizzata» Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma.
- La fisica del reattore nucleare. Principi di sicurezza e funzionamento - Autore: Alessandra Di Pietro Convegno «L'Energia per l'idrogeno. L'utilizzo dell'energia nucleare e non nucleare per la sua produzione. Rendimenti a confronto e ambiti di utilizzo» Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma.

Iconografia

Le immagini sono prese da Internet (Wikipedia, siti, pubblicazioni) e dai Quaderni Io Roma in bibliografia e si intendono qui utilizzate per puri fini personali e non commerciali.



Grazie per l'attenzione

Contatti

Ing. Massimo Sepielli

Cell. 320.9224157

Massimo.sepielli@enea.it

Ing. Alessandra Di Pietro

Cell. 347.9926381

alessandra.dipietro@hotmail.it

info@geovaldi.com

