



Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
Commissione Ricerca e Reattori Innovativi
Area Nucleare
In collaborazione con Sogin

Visita Tecnica con Seminario

**“La Centrale Nucleare di Latina e il suo contesto ambientale.
Criteri metodologici per l’inserimento territoriale
di un impianto nucleare”**



La centrale nucleare di Latina in costruzione - Visita di Enrico Mattei alla centrale



La centrale nucleare di Barakah - Emirati Arabi

A cura degli Ingg.

Massimo Sepielli e Alessandra Di Pietro

Pubblicazioni della Commissione Ricerca e Reattori Innovativi



Nell'anno 2017, l'Ordine pubblica una Raccolta dell'Area Nucleare dedicata alla **progettualità e professionalità nel settore nucleare** nella quale vengono divulgate le numerose attività nucleari nelle quali i componenti dell'Area, a vario titolo, sono stati e sono impegnati.

L'Ordine degli Ingegneri di Roma è l'unica associazione professionale italiana che si occupa in forma diretta di materia nucleare, attraverso tre Commissioni specialistiche istituite al proprio interno (Gestione Impianti, Radioprotezione ed Emergenze, Ricerca), che operano in modo coordinato in una specifica Area Tematica.

Quest'area, AREA NUCLEARE, raccoglie iscritti che a vario titolo sono o sono stati coinvolti in attività nucleari.

Questa unicità discende dalla circostanza per la quale una considerevole parte dei professionisti, attualmente e/o in passato coinvolti in attività aventi finalità "nucleari", hanno operato in Istituzioni, Enti e Società aventi l'unità dedicata con naturale sede localizzata a Roma, per assicurare la centralità delle linee di decisione operativa (iniziative legislative, scelte strategiche, confronti internazionali, ecc.).

Pubblicazioni della Commissione Ricerca e Reattori Innovativi



La **Commissione Ricerca e Reattori Innovativi** pubblica sulla Raccolta uno studio sulla fusione nucleare con particolare riferimento alla progettazione dei reattori sperimentali.

ELEMENTI DI FISICA E DI INGEGNERIA DEL REATTORE A FUSIONE

Confronto parametrico con reattore a fissione

Introduzione

di Ing. A. Taglioni, Ing. E. Vocaturo

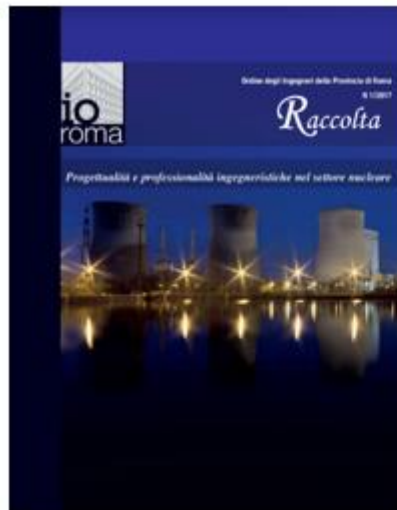
L'Ordine degli Ingegneri di Roma è l'unico Ordine Professionale italiano ad aver istituito al proprio interno delle Commissioni Tematiche che si occupano di materia nucleare e, conseguentemente, di tutte le tematiche ingegneristiche negli aspetti ad essa connessi; queste sono le Commissioni

a cura di
Ing. P. Allievi
Ing. A. De Biasis
Ing. A. Compagno
Ing. G. Chiocchia
Ing. M. Sepielli
Ing. A. Tonti

commissione
Ricerca e Reattori Innovativi

visto da:
Ing. A. Taglioni
Ing. E. Vocaturo

Pubblicazioni della Commissione Ricerca e Reattori Innovativi



MODELLI MATEMATICI PER L'INGEGNERIA NUCLEARE

a cura di
Ing. A. De Biasis
commissione
Ingegneria nucleare

visto da
Ing. A. Tagliori
Ing. G. De Simone

tratto dal
Quaderno 4/2014

Introduzione

Nel presente lavoro sono studiati due rilevanti problemi che pone l'ingegneria nucleare: lo smaltimento delle scorie radioattive e lo studio dei campi termici in regime transitorio qualunque. Riguardo lo smaltimento delle scorie si fissa l'attenzione sulla tecnologia in via di sviluppo della trasmutazione degli Attinidi mediante irraggiamento neutronico mentre riguardo il transitorio dei campi termici si circoscrive l'indagine a quelli descrivibili dall'equazione di Fourier. Caratteristica peculiare dello studio condotto è stata il porre particolare attenzione alla realizzazione di modelli fisico - matematici dei sistemi studiati che fossero in grado di preservare la continuità temporale della soluzione individuata, pur rinunciando, nel caso dell'equazione di Fourier, alla continuità spaziale. Si giunge



La Commissione Ricerca e Reattori Innovativi

pubblica sulla Raccolta uno studio sui modelli matematici per l'Ingegneria nucleare.

scaricato da un P.W.R., con arricchimento iniziale del 3,2%, sottoposto a un burn up di 33.000 MWd/tonn., ipotizzando un tempo di raffreddamento del combustibile di 365 giorni. Le costanti nucleari adottate, cioè le sezioni d'urto termiche di cattura e di fissione e le vite medie, sono tratte da HANDBOOK ON NUCLEAR ACTIVATION DATA, AIEA. Tutti i risultati ottenuti, dalle simulazioni e dalle misure, sono stati tradotti in forma grafica per permettere una immediata visualizzazione dell'evoluzione del sistema.

6. Il problema della trasmissione del calore per conduzione nell'ingegneria nucleare

Nell'ingegneria nucleare riveste estrema importanza l'analisi dei campi termici dei materiali strutturali che compongono il vessel, nel caso dei reattori ad acqua leggera, e più in generale il sistema di contenimento primario. Lo studio di tali campi termici è un problema complesso che coinvolge tutte le modalità di scambio termico: conduzione, convezione, irraggiamento, ebollizione e condensazione ed è rivolto alla

Pubblicazioni della Commissione Ricerca e Reattori Innovativi



Pubblicazioni della Commissione Ricerca e Reattori Innovativi



L'EVOLUZIONE TECNOLOGICA e LA STORIA ITALIANA



ISPRA-1



GARIGLIANO



LATINA



TRINO



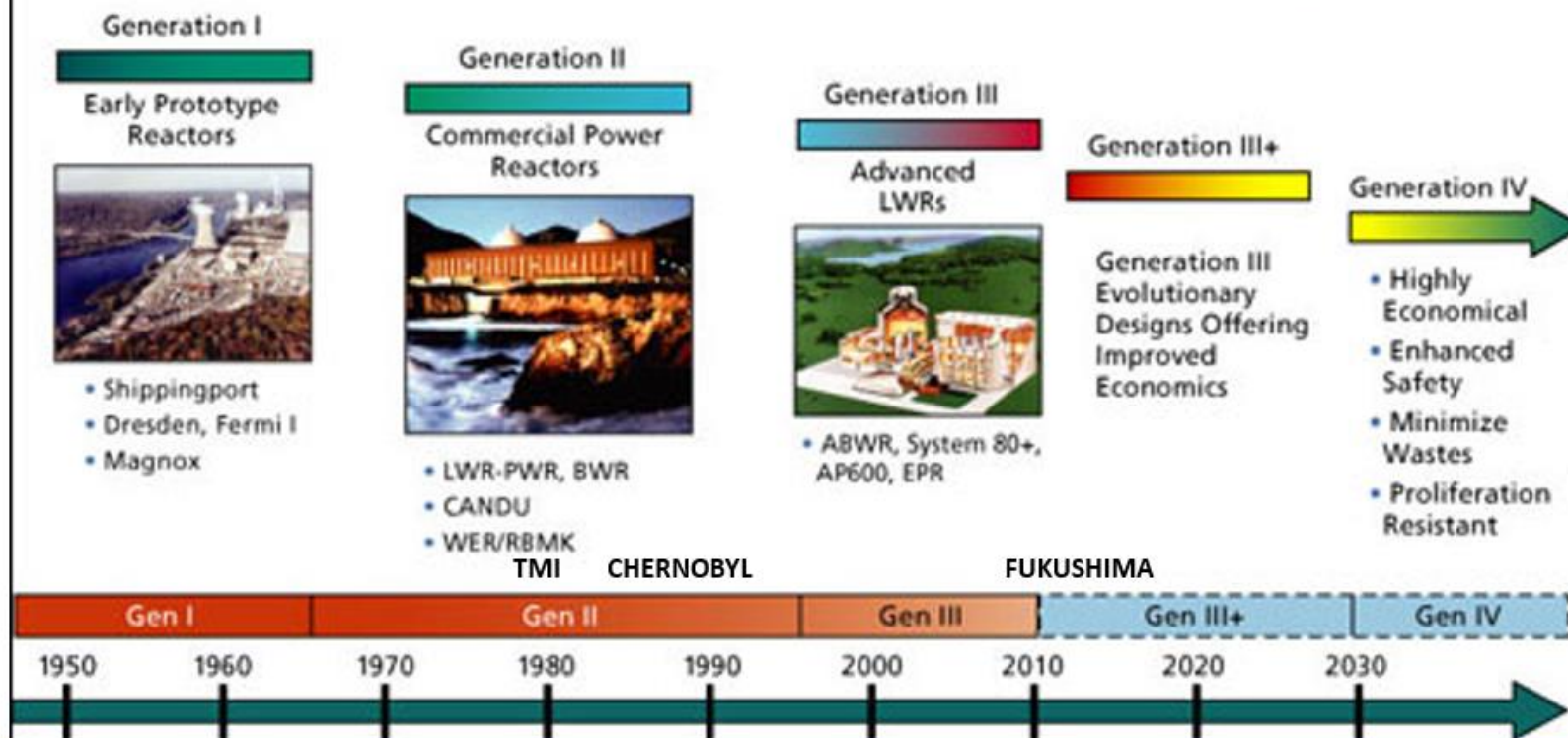
CAORSO



MONTALTO

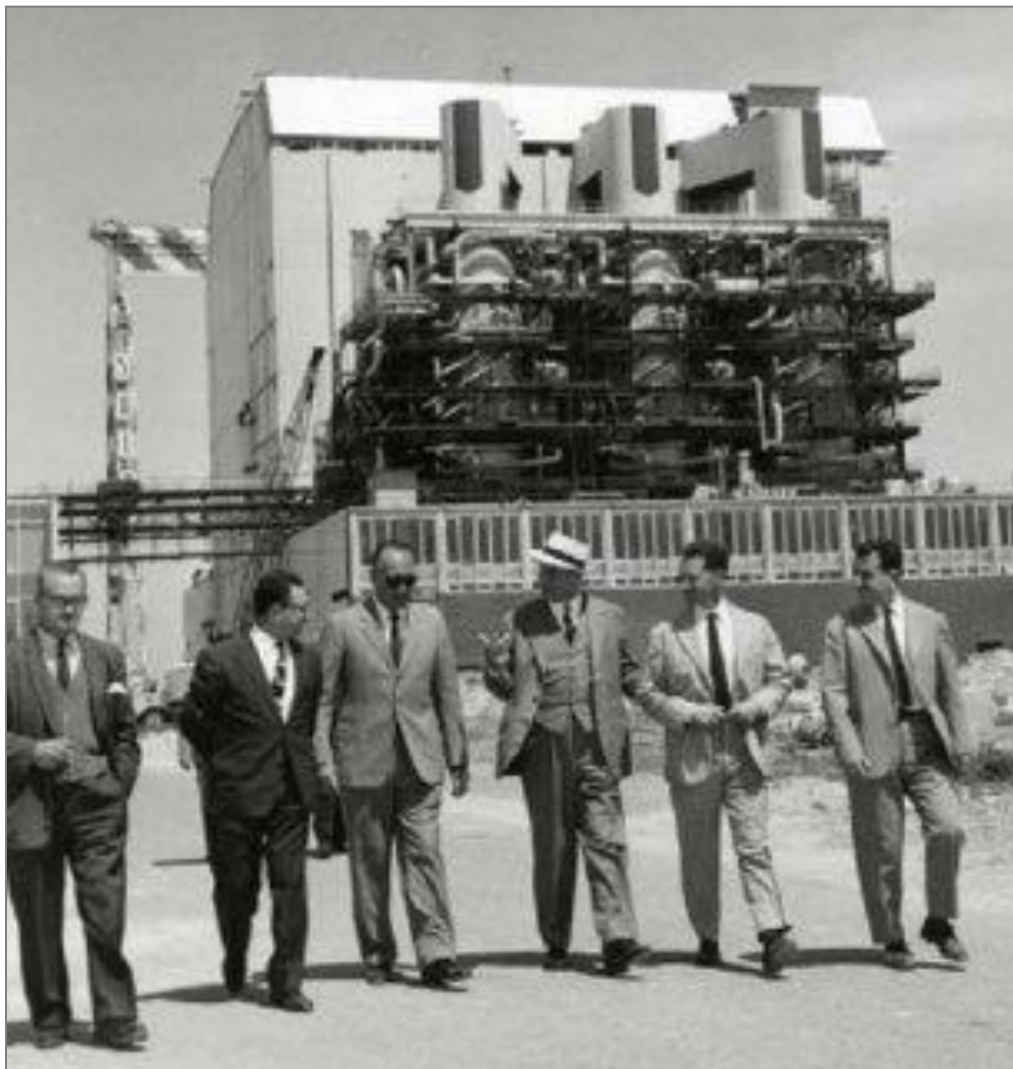


The Evolution of Nuclear Power



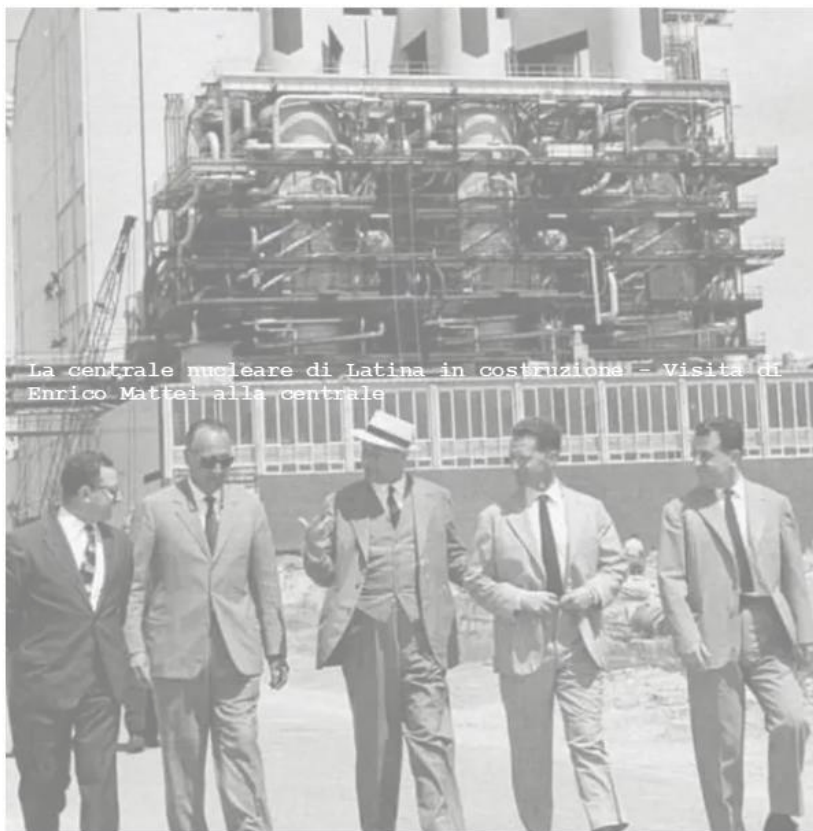
CISE->**CNRN (1952)**-> CIRENE - PEC
CNEN 1960-> ENEA (1982)

LA CENTRALE NUCLEARE ENI DI LATINA – ENRICO MATTEI

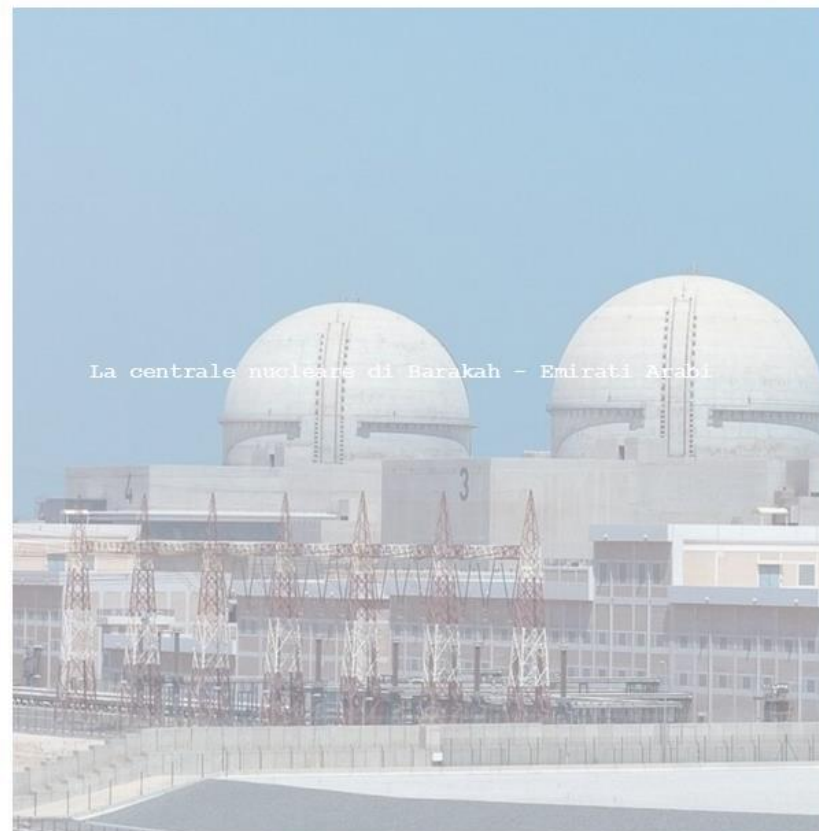


- **Giorno inaugurazione:**
Maggio 1963
- **Produzione:**
Giugno 1963





La centrale nucleare di Latina in costruzione - Visita di Enrico Mattei alla centrale



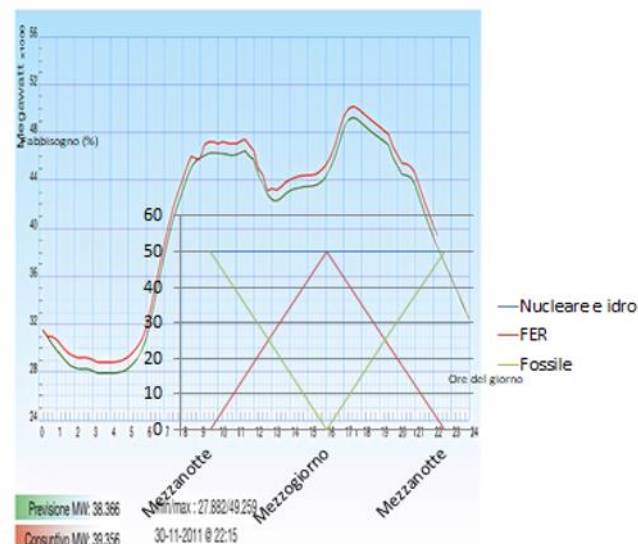
La centrale nucleare di Barakah - Emirati Arabi

Prima parte: a cura dell'Ing. Massimo Sepielli

Pubblicazione Report della Commissione Ricerca e Reattori Innovativi



RAPPORTO SULLO SVILUPPO NUCLEARE ITALIANO NEL QUADRO DI UN MIX ENERGETICO OTTIMIZZATO



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

Ing. Massimo Sepielli



La Centrale Nucleare di Latina e il suo contesto ambientale. Criteri metodologici per l'inserimento territoriale di un impianto nucleare

Legge Delega Governo Italiano in materia di nucleare sostenibile

Previsione di un programma nazionale, finalizzato allo sviluppo della produzione di energia da fonte nucleare sostenibile che concorra alla strategia nazionale per il raggiungimento degli obiettivi di neutralità carbonica al 2050 e per garantire al Paese:

- ❑ la sicurezza e l'indipendenza energetica;
- ❑ la prevenzione dei rischi di interruzione della fornitura di energia;
- ❑ Il contenimento dei costi per i clienti finali domestici e non domestici.



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).**

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**.

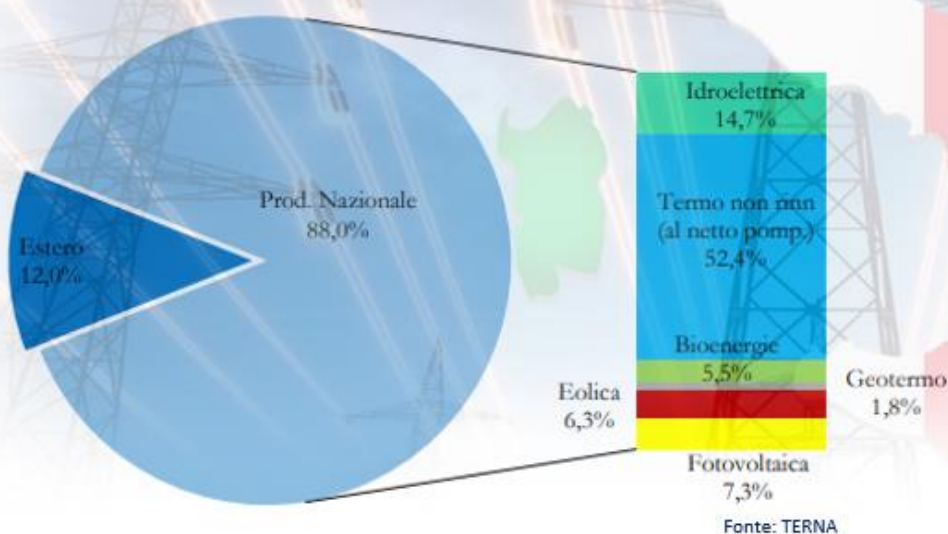
I **44 TWh annui** di elettricità importati dall'estero sono prodotti da energia nucleare:

- 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.

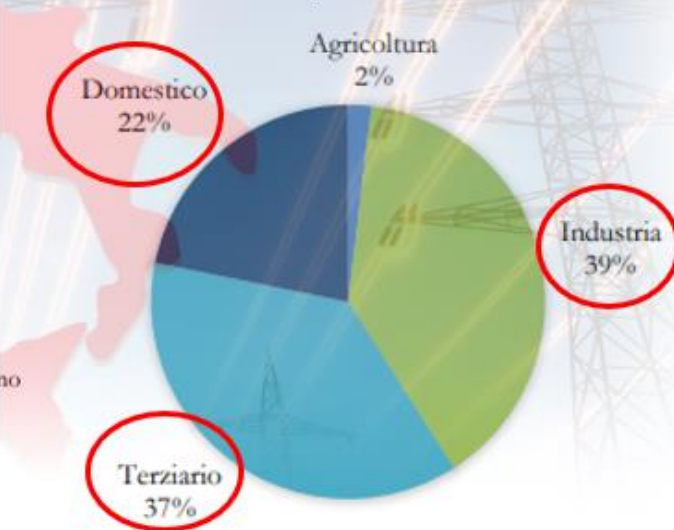
Fonti: Ministero dello Sviluppo Economico - GSE - Eurostat

Dati aggiornati al 2019

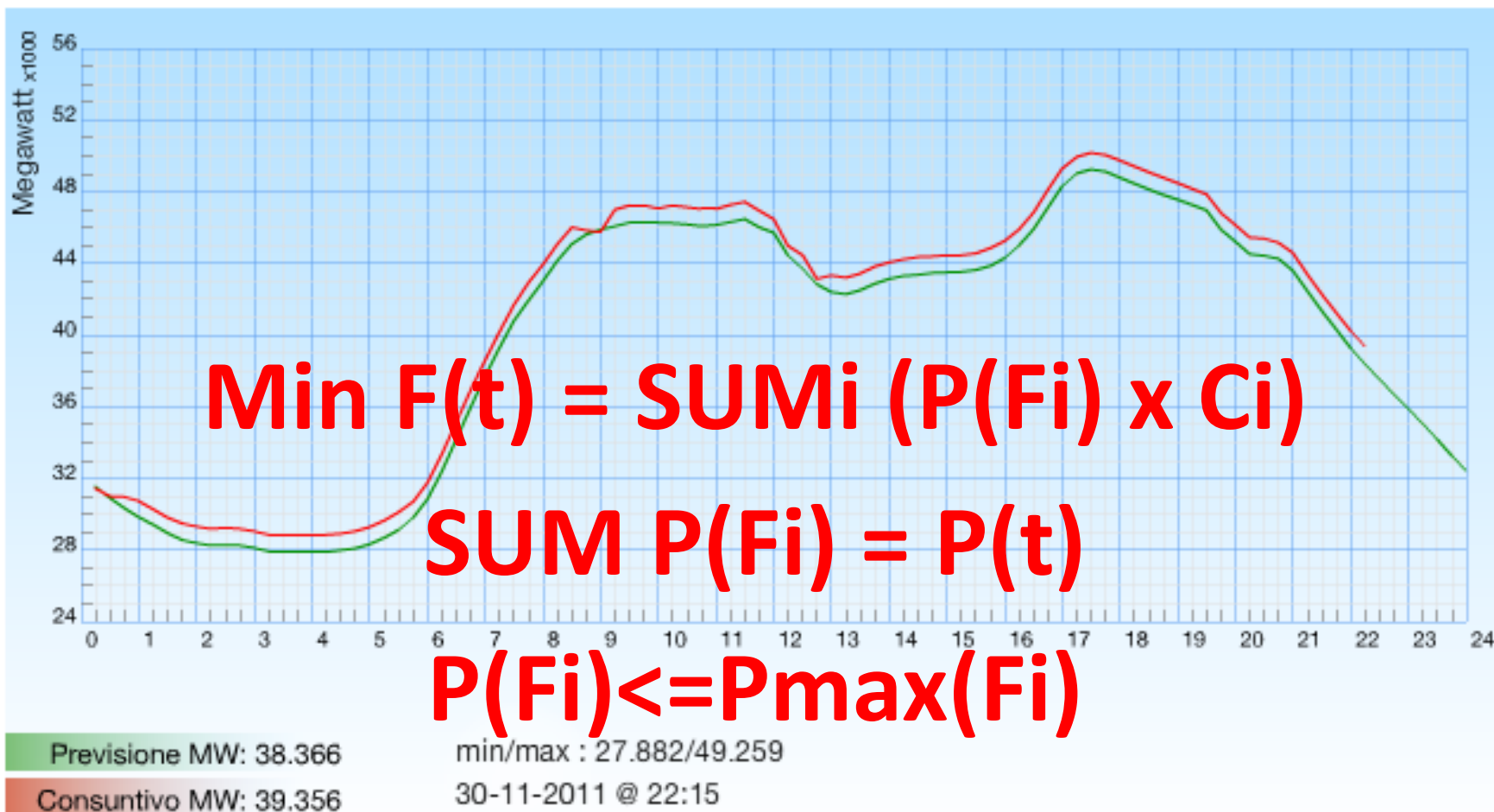
Produzione energia elettrica per fonte - anno 2019



Consumi elettrici per settore - anno 2019

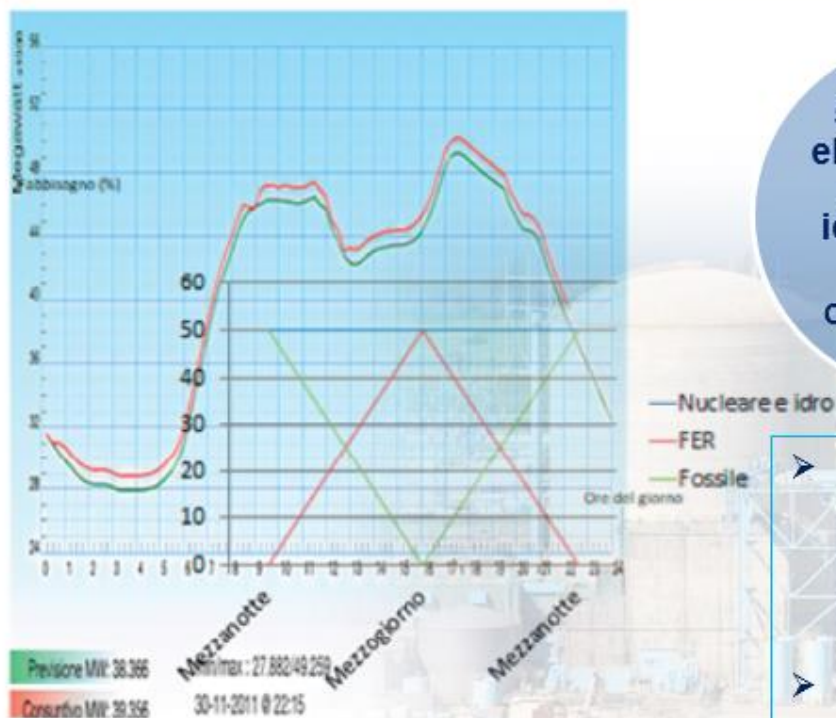


Mix energetico ideale - Funzione obiettivo costi



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.



**50% Energia
elettronucleare
da fissione e
idroelettrica =
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**.

Proposte per un Piano energetico nazionale

- Autonomia e sicurezza approvvigionamento.
- PEN ottimale da applicazione matematico-ingegneristica funzione obiettivo.
- 50% base e 50% variabile a compensazione (FER – gas Italiano+ bio-geo).
- Sostituzione gas russo ed estero (risp. 12 GW e 20 GW).
- 7-10 reattori large scale III generazione per sostituire gas russo (10 GWe).
- Un solo modello large scale da scegliere tra quelli già in operazione nel mondo (grande rete).
- Un solo modello SMR (piccole reti) incrementabile.
- Siti nucleari già collaudati o programmati.
- **Tutte le regioni (verificata la compatibilità con gli aspetti tecnico-normativi) in proporzione ai propri consumi elettrici che assorbono dalla rete nazionale (chi è già autonomo può scollegarsi).**
- Tempi tecnici senza tempi morti burocrazia:
 - large scale 5 anni;
 - SMR primi moduli 3 anni (insieme a deposito).
- Industria /Utility/R&S Italiane/ISIN.
- Ciclo combustibile nucleare ENI + produzione idrogeno verde-viola.



Gli Small Modular Reactors – SMR

SMR Definition

MICROREACTOR

1 MW – 10 MW



SMALL MODULAR REACTOR

20 MW – 300 MW



MEDIUM TO LARGE REACTOR

300 MW – 1,000+ MW



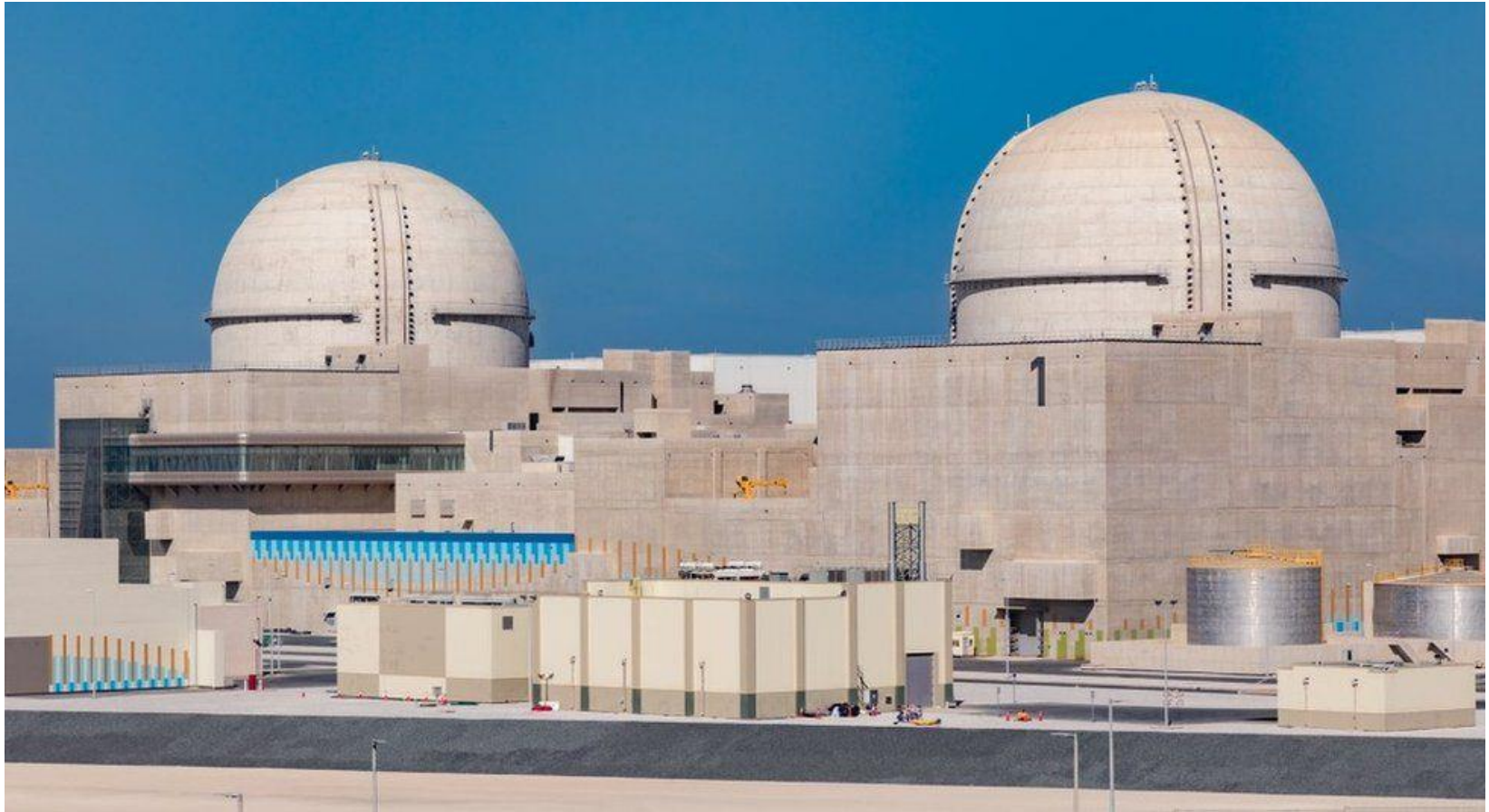
- Two important factors: **Size** and **Modularity**
- Nuclear power plants provide **flexibility** in terms of power
- SMRs provide **electric power** in the range of 20-300 MW(e)

Source: energy.gov/ne

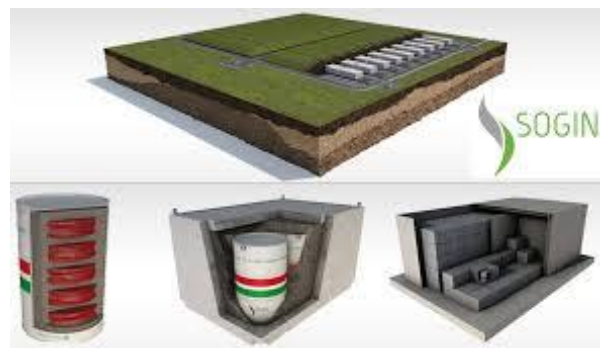
Un esempio di reattore di potenza attualmente in produzione

Il reattore APR 1400 (KEPCO) - Barakah (Emirati Arabi)

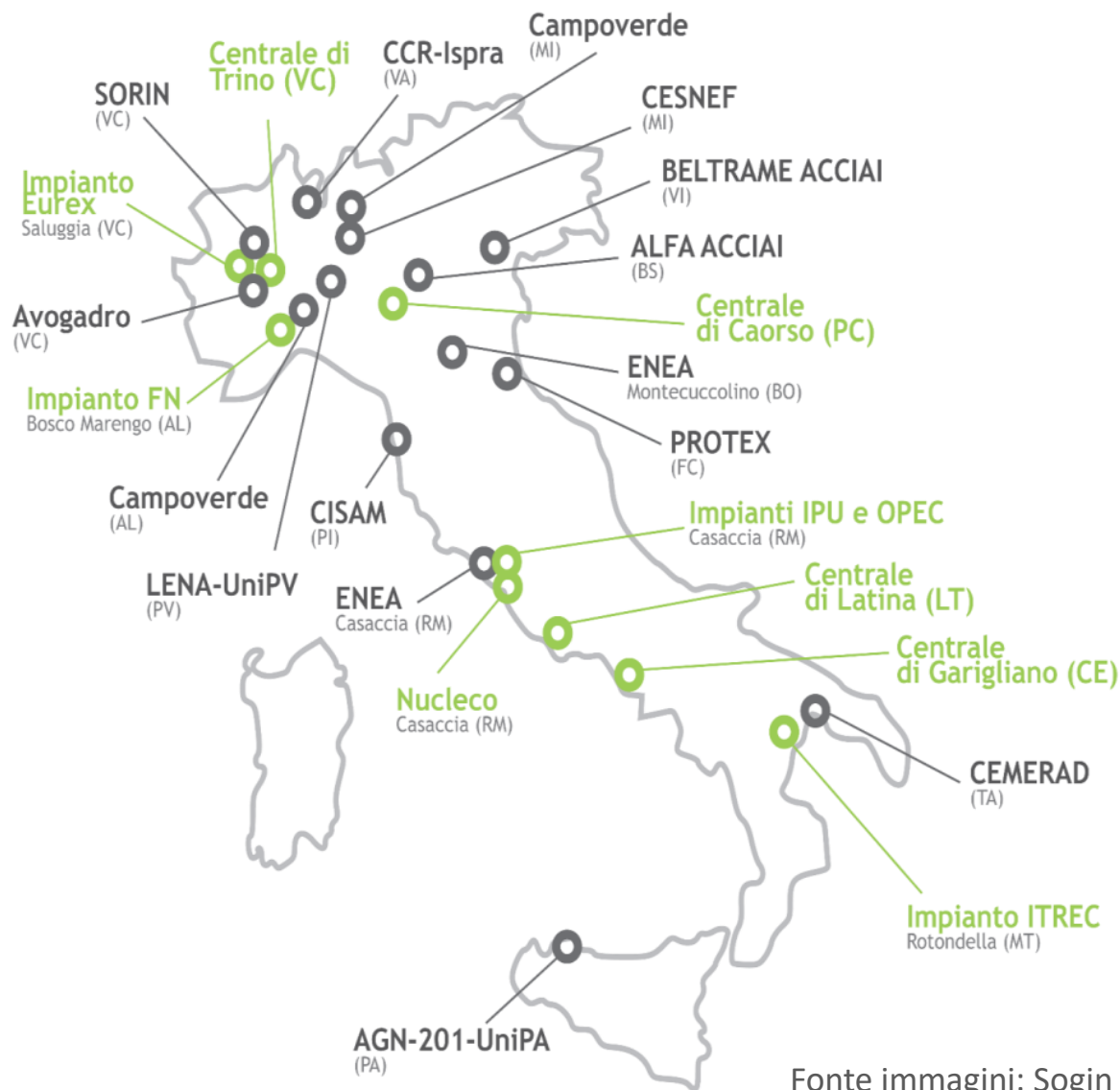
- **Costruito in 4 anni**
- **Costo: 4 miliardi**



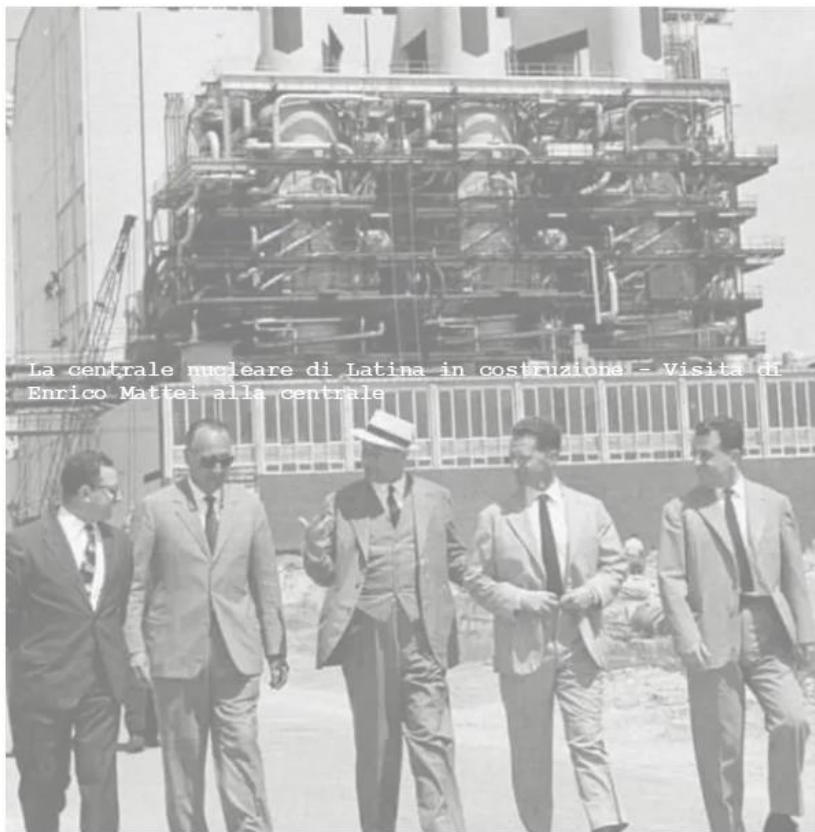
SITI NUCLEARI OGGI IN ITALIA: ex centrali, impianti ciclo, depositi temporanei



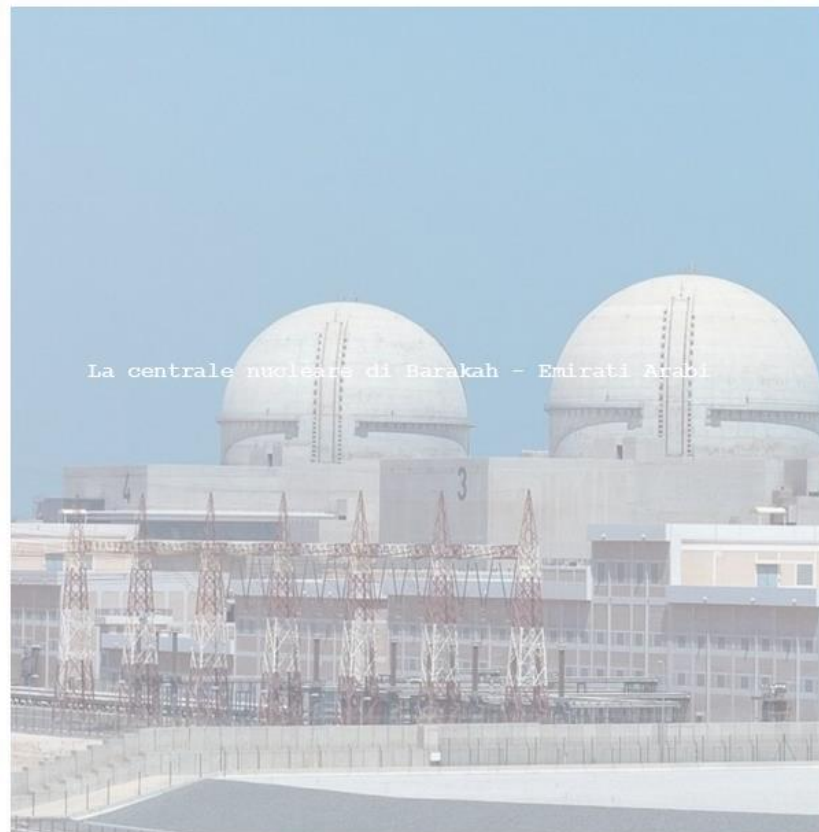
Progetto del deposito nazionale per i rifiuti radioattivi a bassa e a media intensità: rifiuti dalle ex centrali nucleari, dall'industria e dalla medicina nucleare.



Fonte immagini: Sogin



La centrale nucleare di Latina in costruzione - Visita di Enrico Mattei alla centrale



La centrale nucleare di Barakah - Emirati Arabi

Seconda parte: a cura dell'Ing. Alessandra Di Pietro

Requisiti per la localizzazione di una centrale nucleare

La localizzazione delle centrali nucleari di potenza si basa su requisiti minimi necessari al loro funzionamento e richiede un'analisi preventiva di criteri e requisiti tecnici e normativi in base ai quali selezionare le aree idonee.

Le aree del territorio, 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.**

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.**

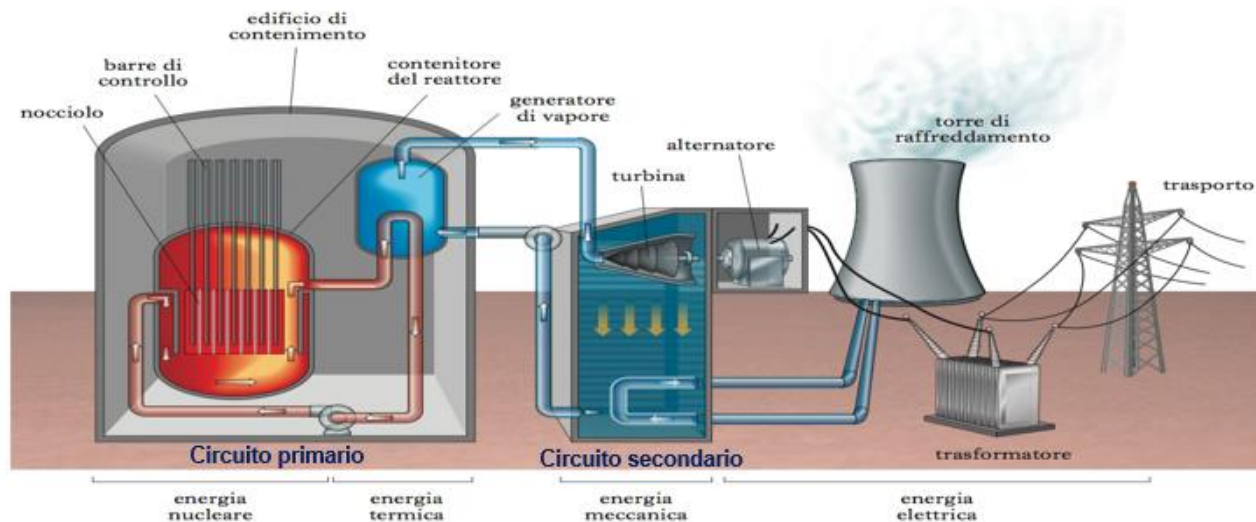
Fonte immagine: www.meteoweb.eu/2023/04/finlandia-nuova-centrale-nucleare-oliluoto/1001228964/

Layout di una centrale nucleare di potenza ad acqua pressurizzata PWR

L'impianto nucleare di un reattore PWR (reattore ad acqua pressurizzata) è schematicamente composto da due sistemi principali: circuito primario e circuito secondario. E' la tipologia di reattore più utilizzata la mondo.

La reazione nucleare di fissione, alla base del funzionamento del reattore nucleare a fissione, consiste nella scissione di un nucleo sotto «bombardamento» neutronico. Dalla reazione a catena ovvero la successione delle reazioni nucleari di fissione si libera energia nucleare (200 MeV a fissione) con conseguente rilascio di energia termica (potenza termica).

- ❑ **Circuito idraulico primario:** la parte dell'impianto dove si trova il reattore (contenitore in pressione dove è contenuto il nocciolo ovvero il combustibile nucleare: uranio, plutonio, etc.) 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 da acqua in ciclo aperto o dalle torri di raffreddamento in ciclo chiuso.
- **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.



Fonte immagine: www.educationtechnicaonline.com/tag/nucleare/

Aspetti tecnici della localizzazione di una centrale nucleare - *esigenze del sistema di produzione*

Premessa: gli aspetti coinvolti nella localizzazione di una centrale nucleare, richiedono lo studio di numerosi aspetti, da quelli tecnici, legislativi e socio-economici fino a quelli che riguardano una razionale gestione del territorio, e i **risultati** da essi derivanti **devono garantire in primis la sicurezza nucleare e la protezione della popolazione e dell'ambiente e la disponibilità di energia elettrica.**

In questo quadro generale si colloca la Radioprotezione.

INSERIMENTO
CORRETTO NELLA
STRUTTURA DELLA
RETE ELETTRICA

DISPONIBILITÀ DI
ACQUA DI
RAFFREDDAMENTO

ADEGUATEZZA
CARATTERISTICHE
GEOTECNICHE DEL SITO

ACCESSIBILITÀ

- le strutture di trasmissione e interconnessione devono garantire stabilità, continuità ed economia nei costi del trasporto dell'energia.
- La restituzione di una parte del calore in forma degradata (raffreddamento dei condensatori) avviene in prevalenza utilizzando l'acqua di fiume, di laghi con una portata considerevole o acqua di mare (sistema di raffreddamento in ciclo aperto).
- Vengono studiati e monitorati gli effetti degli scarichi termici nel corpo d'acqua; per ogni corpo d'acqua viene eseguita una indagine naturalistica ad hoc.
- La restituzione del calore può avvenire anche con torri di raffreddamento (sistema di raffreddamento in ciclo chiuso).
- Gli elevati carichi specifici di un impianto nucleare dovuti ai pesi degli schermi, in genere in calcestruzzo e delle strutture di contenimento, richiedono buone caratteristiche del terreno e fondazioni, talvolta, di tipo particolare.
- Il trasporto dei componenti di un impianto nucleare di potenza richiede in fase di costruzione un conveniente allacciamento alla rete stradale e ferroviaria.
- Il rifornimento del combustibile, durante l'esercizio, dato il suo elevatissimo contenuto energetico, non crea particolari esigenze di trasporto così come il suo immagazzinamento e ritrattamento verso i siti preposti.

Aspetti tecnici della localizzazione di una centrale nucleare - *Requisiti di radioprotezione in fase di normale esercizio*

Le concentrazioni di radioattività negli scarichi, sia liquidi che gassosi, sono molto modeste e inferiori di alcuni ordini di grandezza ai valori limiti consentiti dalle Autorità di controllo.

Queste concentrazioni sono **contenute entro valori dell'ordine del per cento e di qualche per mille dei valori dovuti al fondo naturale di radioattività**. Questi ottimi risultati in termini di radioprotezione sono conseguenza del criterio di contenimento adottato in sede di progetto per l'esercizio dell'impianto nucleare.

CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE

- Gli studi idrogeologici riguardano non solo le caratteristiche delle acque superficiali ma anche quelle delle falde acquifere in profondità con relativo studio dell'entità e della direzione dei corsi d'acqua sotterranea. Sono studiate anche le caratteristiche fisico – chimiche del suolo in relazione alla capacità di filtrazione, di scambio ionico, etc.

CARATTERISTICHE METEOROLOGICHE

- I parametri meteorologici più importanti che vengono analizzati nel progetto nucleare, in relazione ad un determinato sito, sono:
 - ✓ la direzione del vento;
 - ✓ L'andamento della temperatura con l'altezza;
 - ✓ L'entità e le caratteristiche delle precipitazioni.
- Alla costruzione delle centrali nucleari sono associati programmi di rilievo meteorologico.

CONTROLLO DEI PRODOTTI RADIOATTIVI

- Viene esaminata la genesi dei rifiuti radioattivi (provenienti dalla fissione dell'uranio e del plutonio e dall'attivazione dei materiali esposti al flusso neutronico).

Aspetti tecnici della localizzazione di una centrale nucleare - *Requisiti di radioprotezione in fase di normale esercizio*

TABELLA II - VALORI MEDI ANNUI DELLE DOSI ALLA POPOLAZIONE
USA DOVUTE ALLE VARIE SORGENTI DI RADIOATTIVITÀ

Sorgenti	Dose (millirem)	in percento	
		Di tutte le sorgenti	Delle sole sorgenti artificiali
Fondo naturale	125	68,3	-
Applicazioni mediche	55,2	30,1	93,8
Diagnostica a raggi X	(50)	(27,3)	85,0
Terapia a raggi X	(5)	(2,7)	(8,5)
Radioisotopi	(0,2)	(0,1)	(0,3)
Altre sorgenti	1,7 ⁽⁷⁾	0,9	2,9
Prodotti commerciali (TV a colori, orologi a quadranti luminosi, etc.)	2	1,1	3,4
TOTALE		100	100

⁷Le centrali nucleari contribuiscono per meno di 0,001 millirem/a

Fonte: Centrali Elettronucleari vol. I – Autore: L. Sani

Aspetti tecnici della localizzazione di una centrale nucleare - *Requisiti di radioprotezione contro un rilascio di prodotti radioattivi non dovuti ad un normale esercizio*

I criteri adottati per assicurare una adeguata protezione della popolazione e dell'ambiente contro un rilascio incontrollato, sebbene assai improbabile, di prodotti radioattivi sono i seguenti:

- **Livello elevato di qualità di progetto, di costruzione e di esercizio dell'impianto** al fine di assicurare una bassissima probabilità di malfunzionamento dei componenti e dei sistemi anche in caso di eventi avversi esterni all'impianto sia di origine naturale che di natura umana;
- **Impiego di salvaguardie impiantistiche diversificate e ridondanti** per prevenire un incidente che comporti il rilascio all'esterno del circuito primario;
- **Soluzioni di confinamento dei prodotti di fissione** per contenere il loro rilascio nell'ipotesi un incidente;
- **Area di rispetto attorno alla centrale** ed una zona a bassa densità di popolazione con efficaci piani di emergenza ed evacuazione.

CARATTERISTICHE GEOSISMOTETTONICHE

- Le strutture della centrale il cui danneggiamento potrebbe provocare la fuoriuscita di radioattività in eccesso ai valori consentiti sono realizzate in modo da mantenere integra la loro funzione anche dopo il massimo terremoto prevedibile che viene assunto come «terremoto di progetto».
- La progettazione antisismica è basata su una analisi dinamica.

CARATTERISTICHE DEMOGRAFICHE

- Nell'area di rispetto è vietato risiedere e le attività che si svolgono al suo interno sono attinenti con l'esercizio dell'impianto.
- Il raggio dell'area di rispetto permette di non superare la dose ammissibile di radioattività in caso di incidente per un individuo che rimanesse in qualsiasi punto dell'area per il tempo necessario affinché il piano di emergenza diventi operativo.
- L'estensione dell'area immediatamente circostante all'area di rispetto potrebbe essere tale da non permettere il superamento della dose ammissibile in caso di incidente per un individuo che rimanesse esposto per un tempo indefinito al confine esterno di essa.

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**.

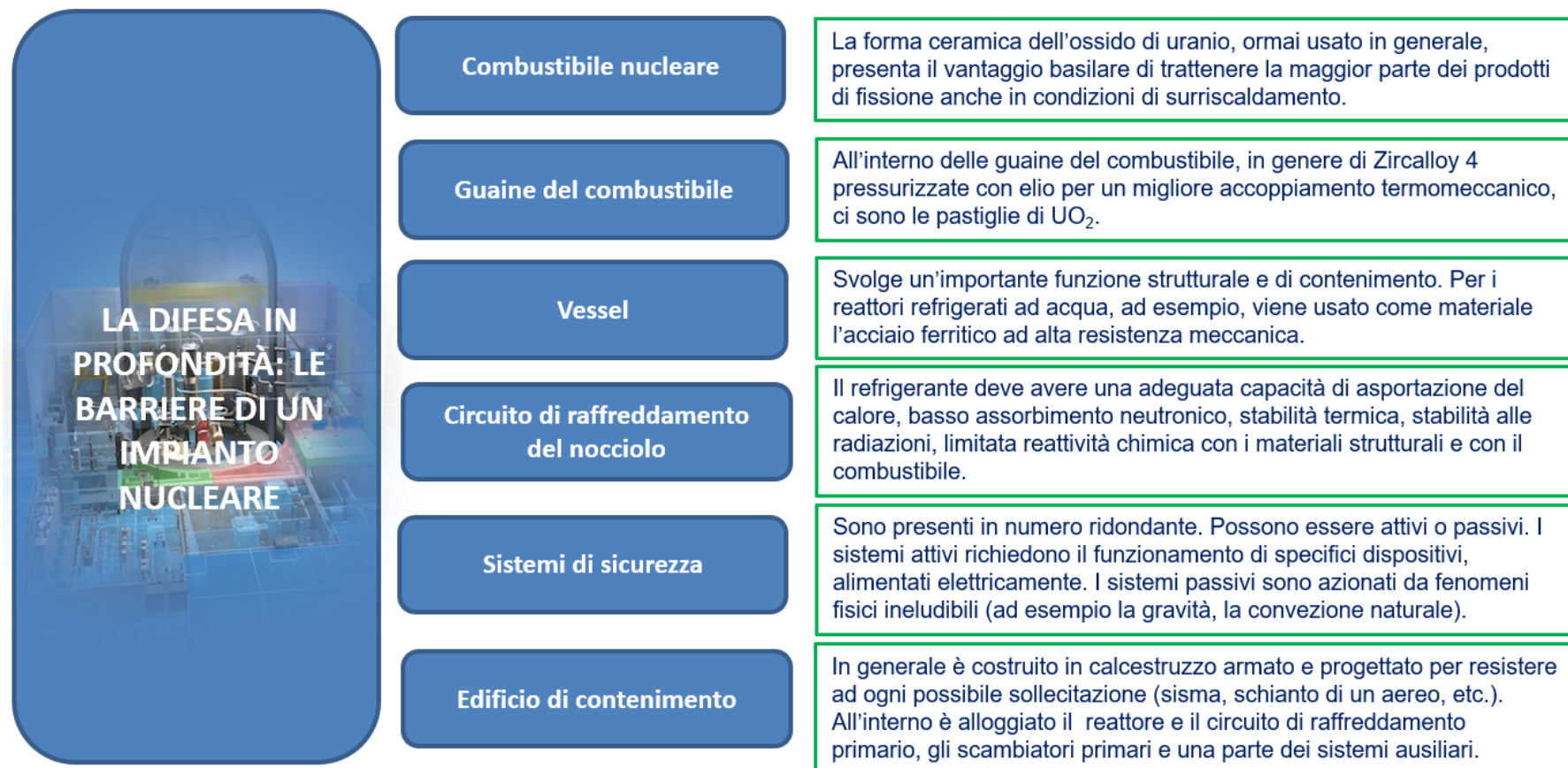
Dato il forte rapporto di interdipendenza e di equilibrio richiesto tra gli elementi costituenti il reattore nucleare, la tecnica adottata per i calcoli del progetto nucleare è quella della separabilità e sovrapposizione degli effetti. Il risultato viene, poi, sempre implementato da fattori di sicurezza.

- ❑ **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.

La sicurezza negli impianti nucleari: *la difesa in profondità*

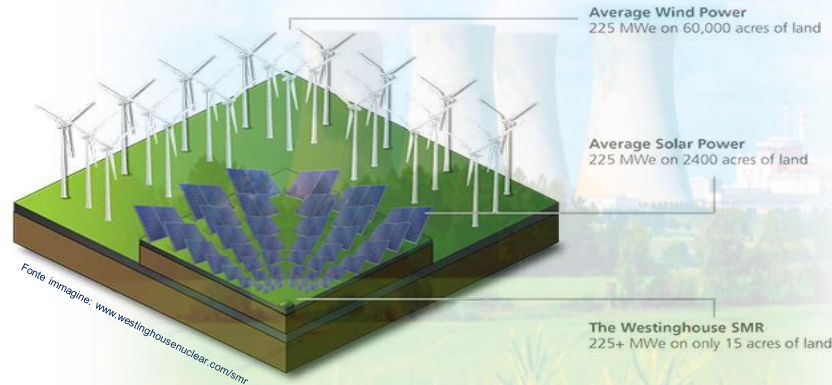
Numerose barriere, almeno quattro, ed un certo numero di sistemi che si frappongono tra il reattore e il circuito primario e l'esterno. Il concetto di sicurezza di difesa in profondità è insito in tutte le tipologie di reattore.

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.



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



TIPO DI STOCCAGGIO	DENSITÀ DI ENERGIA (MJ/kg)
Uranio	24.000.000
Gas	53,6
Carbone	32,5
Petrolio	41,87

In un comune processo di **combustione**, l'ossidazione di un **atomo di carbonio** fornisce un'energia di circa **4 eV**, un'energia che è circa **un cinquantamillesimo** (1/50 000 000) di quella prodotta nella reazione nucleare di **fissione di un atomo**.

BILANCIO ENERGIA PRODOTTA DAI RIFIUTI RADIOATTIVI

I rifiuti radioattivi stoccati in un contenitore flask (180 l di volume, 84 kg di materiale radioattivo) hanno prodotto 360 milioni di kWh per un fabbisogno medio di circa 12.000 famiglie per 30 anni.

- ❑ 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**.

L'energia nucleare da fissione nel mondo

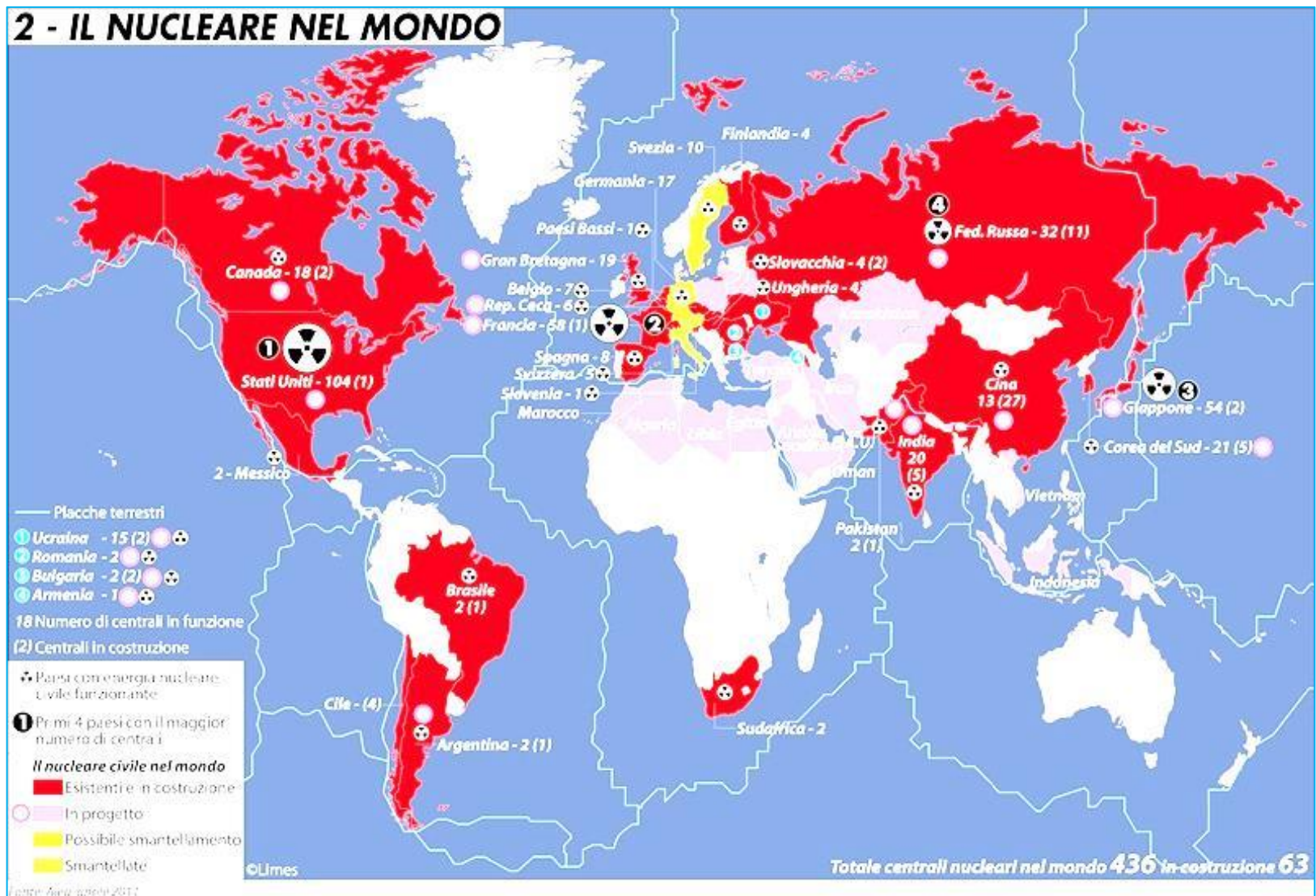


Tabella di alcuni reattori di potenza PWR in esercizio nel mondo

Reattore Progettista	Potenza elettrica nella/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 / KEPKO 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

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 sconosciuta) 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, Bielorussa 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

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

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

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

