

# **CHIMICA AMBIENTALE**

CdL triennale in  
Scienze e Tecnologie per l'Ambiente e la Natura  
E in  
Chimica

Docente  
Pierluigi Barbieri

**SSD Chimica dell'ambiente e dei beni culturali, CHIM/12**

Chimica ambientale

Colin Baird Michael Cann

Chimica ambientale

Terza edizione italiana condotta sulla quinta edizione americana

A cura di Eudes Lanciotti, Massimo Stefani

2013



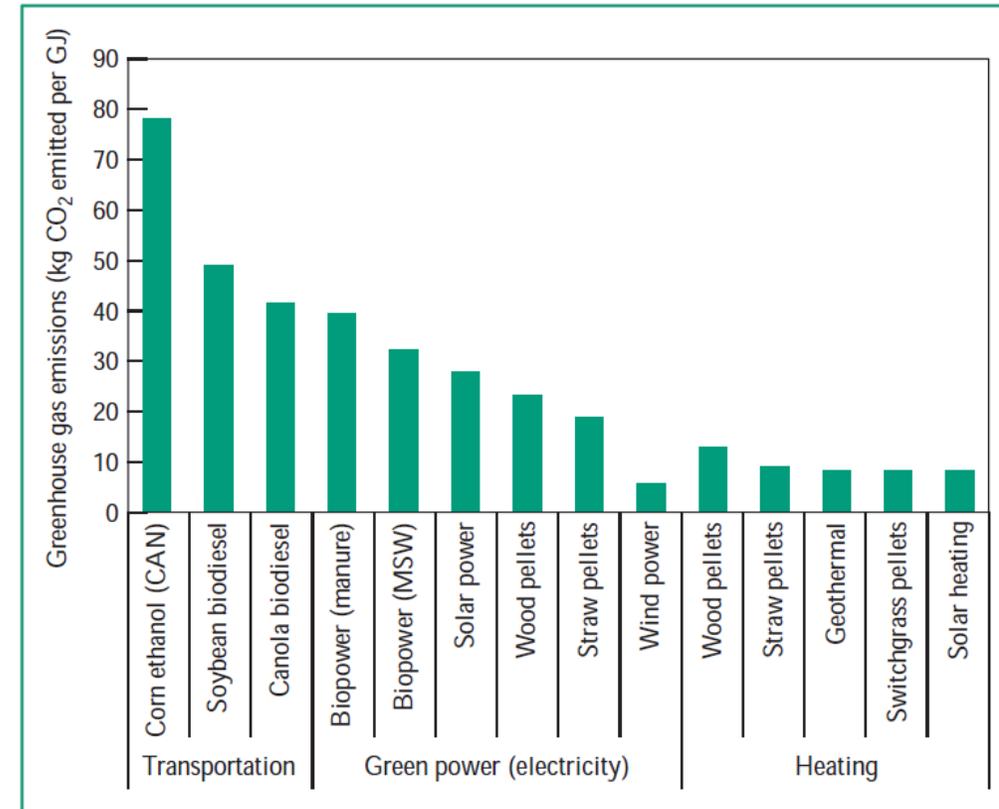
# ENERGIA SOLARE DIRETTA

***L'assorbimento diretto di energia*** dalla luce solare e la sua successiva ***conversione a forme utili*** di energia, come l'elettricità, possono verificarsi con due meccanismi:

- **conversione termica**, in cui la luce del sole (in particolare la sua componente a infrarossi) viene catturata come energia termica da un certo materiale assorbente. (Un esempio quotidiano di tale materiale è una superficie metallica lucida, che sappiamo per esperienza diventa molto calda quando lasciata alla luce del sole.)

L'energia solare è ***un'ottima fonte di calore a temperature vicine o inferiori al punto di ebollizione dell'acqua, una categoria che rappresenta fino alla metà del consumo totale di energia*** e ha basse emissioni di gas a effetto serra nel ciclo di vita.

**FIGURE 7-1** Life-cycle greenhouse gas emissions for various bioenergy technologies, by sector. (MSW = municipal solid waste) [Source: Adapted from REAP Canada, *Analysing Ontario Biofuel Options, Final Report* (2008), BIOCAP Foundation Canada.]

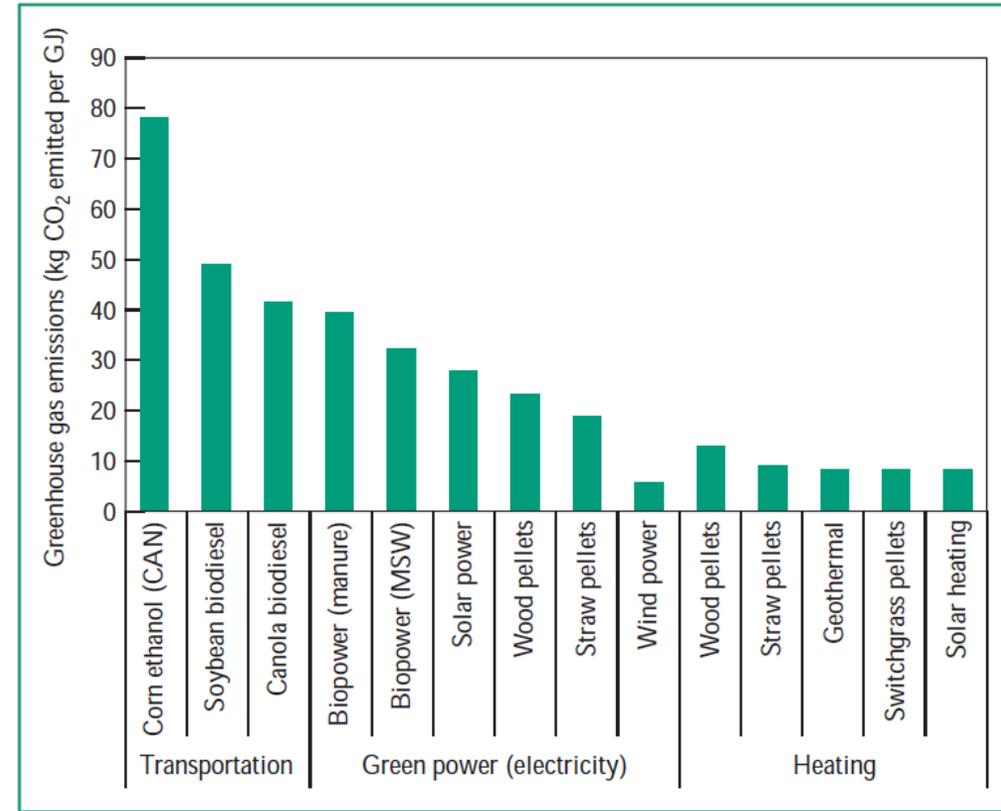


# ENERGIA SOLARE DIRETTA

*L'assorbimento diretto di energia* dalla luce solare e la sua successiva *conversione a forme utili* di energia, come l'elettricità, possono verificarsi con due meccanismi:

- **fotoconversione**, in cui l'assorbimento dei fotoni associati alle componenti dell'ultravioletto, del visibile e del vicino infrarosso dei raggi solari da parte dei materiali fotovoltaici determina l'eccitazione degli elettroni nel materiale assorbente a livelli di energia più elevati. L'eccitazione provoca successivamente un cambiamento fisico o chimico (piuttosto che una semplice degradazione al calore).

**FIGURE 7-1** Life-cycle greenhouse gas emissions for various bioenergy technologies, by sector. (MSW = municipal solid waste) [Source: Adapted from REAP Canada, *Analysing Ontario Biofuel Options, Final Report* (2008), BIOCAP Foundation Canada.]



## LCOE

Ogni tecnologia di generazione energetica, durante l'arco di vita che va dalla fase sperimentale fino alla condizione di maturità, subisce una progressiva diminuzione dei suoi costi che si riflette

sul costo dell'energia prodotta. Diversi sono i fattori che incidono su tale processo e che influenzano, in maniera variabile a seconda della fonte considerata, il cosiddetto tasso di apprendimento tecnologico, ossia la rapidità con cui una tecnologia entra sul mercato e diventa sempre più competitiva dal punto di vista economico. Come noto, i costi d'investimento non costituiscono l'unico costo nel corso della vita di un impianto in quanto anche altre spese, di tipo fisso e variabile, devono essere sostenute ai fini di un corretto funzionamento dell'impianto. Tra queste vi sono il costo del carburante, i costi di O&M, i costi legati alle emissioni di CO<sub>2</sub> e infine anche quelli per il *decommissioning* dell'impianto stesso. Queste voci incidono in maniera differente a seconda della tecnologia utilizzata e la loro somma lungo l'intero ciclo di vita di un impianto rappresenta il costo complessivo che concorre alla formazione del costo di generazione di un'unità di energia.

Nel settore elettrico, al fine di confrontare il costo di generazione da fonti diverse, viene calcolato, secondo una metodologia riconosciuta a livello internazionale, il cosiddetto *Levelized*

*Cost Of Energy* (LCOE), ossia il costo di produzione di 1 kW elettrico. Esso viene calcolato essenzialmente come rapporto tra il valore attualizzato della sommatoria delle uscite di cassa e il valore attualizzato della produzione elettrica nell'arco di vita utile dell'impianto. Tale costo corrisponde, in altri termini, al prezzo a cui l'elettricità deve essere prodotta per riuscire a coprire interamente tutti i costi.

Secondo la definizione dell'Agenzia Internazionale per l'Energia (fonte: *Projected cost of generating electricity*. International Energy Agency, 2010) la formula per il calcolo del LCOE è la seguente:

$$LCOE = P_{\text{elettricità}} = \frac{\sum_t (\text{Investimenti}_t + \text{O\&M}_t + \text{Carburante}_t + \text{Carbonio}_t + \text{Decommissioning}_t) * (1+r)^{-t}}{\sum_t (\text{Elettricità}_t * (1+r)^{-t})}$$

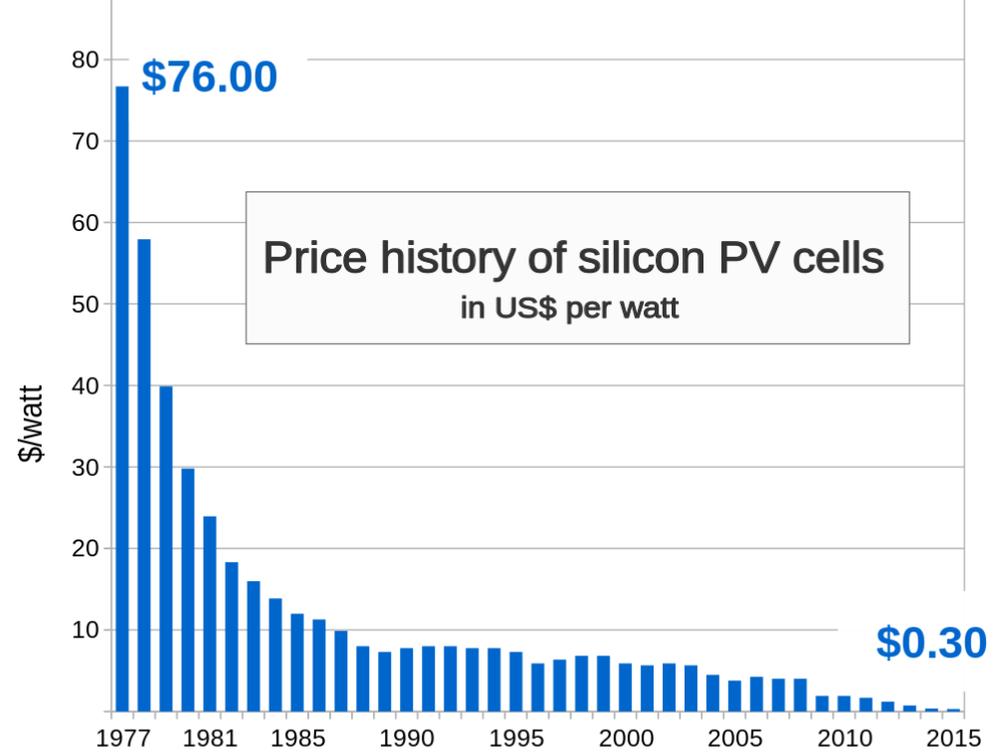
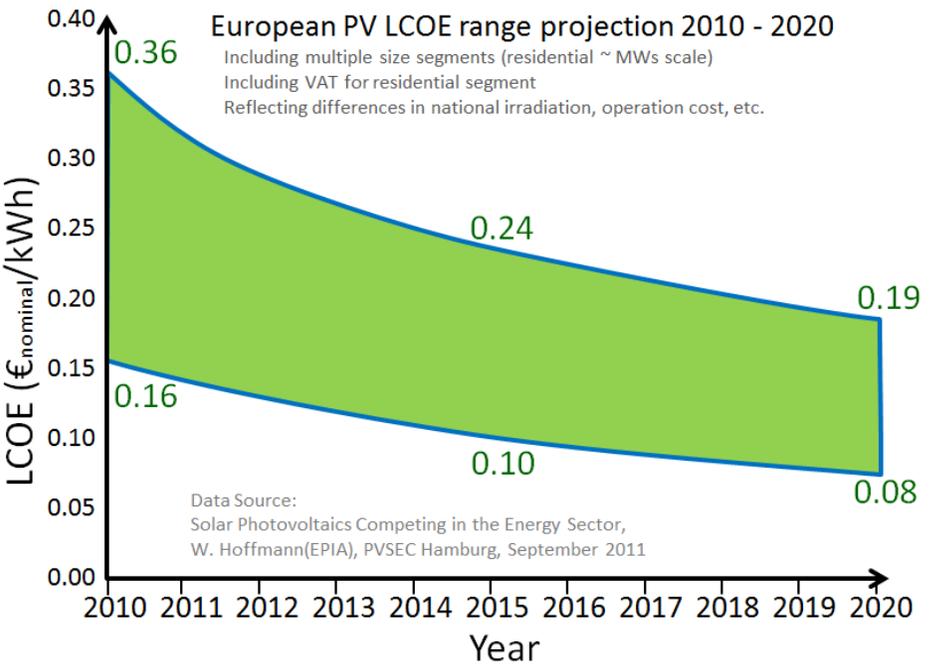
dove "t" è l'anno di riferimento e "r" il tasso di sconto. Un'assunzione fondamentale alla base del calcolo del LCOE è che sia "r" sia il prezzo dell'elettricità sono fissi e non variano nel corso della durata del progetto. Da un'analisi della composizione del LCOE per ogni tecnologia emerge come l'incidenza percentuale

delle singole voci di costo cambi notevolmente in base alla tecnologia considerata (tabella 1). Questo determina di conseguenza una differente sensibilità del LCOE di ogni fonte a fronte di variazioni dei

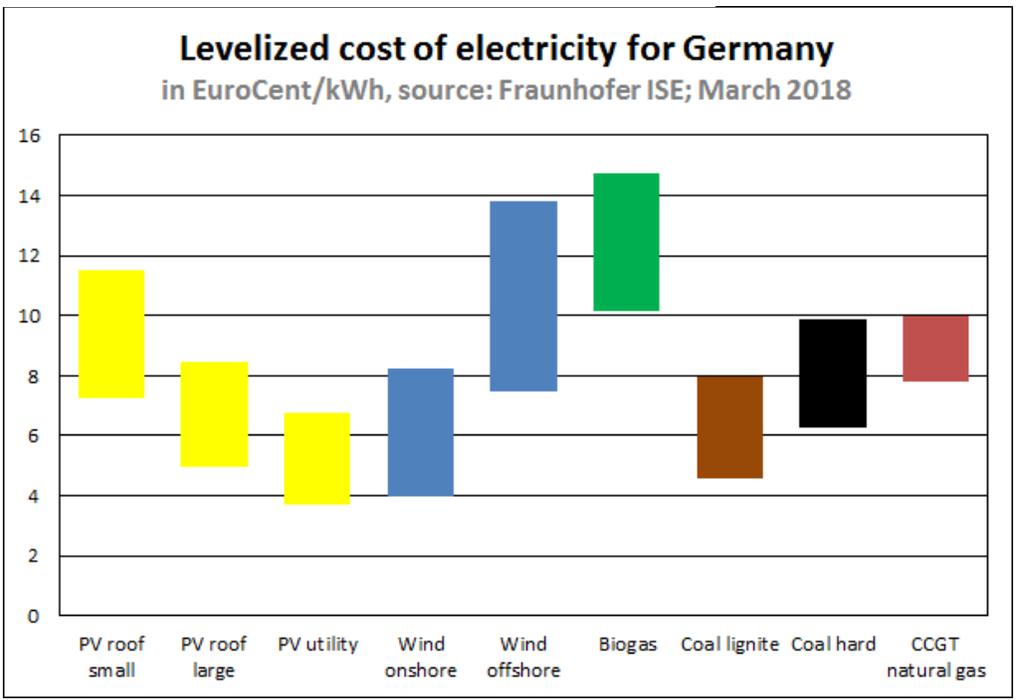
parametri che concorrono alla sua formazione.

Per esempio, un aumento del tasso di sconto determina una quasi totale invarianza del costo dell'energia derivante da impianti alimentati a gas, mentre nel caso del nucleare, a causa degli elevati tempi di costruzione e della vita utile degli impianti, questo comporta un marcato incremento proporzionale del LCOE. In generale, le tecnologie che necessitano di lunghi

**➔ PER COMPARARE LE DIVERSE FONTI  
BISOGNA ANALIZZARLE A FONDO  
IN TUTTI GLI ASPETTI**



Source: Bloomberg New Energy Finance & pv.energytrend.com



## ENERGIA SOLARE A BASSA TEMPERATURA

- Un esempio di ***tecnologia passiva del solare termico*** - *sistemi che non utilizzano alcun intervento attivo continuo o fonte di energia aggiuntiva per il loro funzionamento* - è l'uso di cucine a pannelli solari nei paesi in via di sviluppo. Nei climi temperati, la progettazione di edifici per assorbire e trattenere (mediante isolamento) in inverno una frazione massima dell'energia solare che cade su di loro è un altro esempio.
- Gli scaldacqua solari sono ampiamente utilizzati in Australia, Israele, negli Stati Uniti meridionali e in altre aree calde che ricevono molto sole, così come in Cina, Germania, Turchia e Giappone. Gli scaldacqua rappresentano il più grande uso di tecnologie solari termiche attive, che sono definite come quelle che impiegano una fonte di energia aggiuntiva per il loro funzionamento. I collettori solari che si trovano sui tetti delle case private e dei condomini, così come alcuni stabilimenti commerciali come gli autolavaggi, contengono acqua che viene fatta circolare intorno a un sistema chiuso da una pompa azionata elettricamente. La luce del sole viene assorbita da un collettore nero a piastre piatte, che trasferisce il calore all'acqua che scorre su di esso e che è delimitato all'esterno da un vetro o da una finestra di plastica. L'acqua calda viene pompata in un serbatoio di accumulo coibentato fino a quando non è necessario per scopi di «balneazione» o lavanderia, o per integrare il riscaldamento dell'acqua.

Nelle installazioni più elaborate, l'acqua calda viene fatta passare attraverso uno scambiatore di calore, che è un sistema di tubi su cui l'aria è passata e quindi riscaldata dal trasferimento di calore. L'aria calda può essere utilizzata immediatamente in inverno per riscaldare le stanze dell'edificio. Se non necessario immediatamente, il calore può essere immagazzinato in altri media come le rocce. Di solito un sistema di backup, in cui l'acqua può essere riscaldata elettricamente o bruciando un combustibile fossile, è incorporato in questi sistemi al fine di fornire calore nelle giornate nuvolose o in situazioni di elevata domanda.

## ENERGIA TERMICA SOLARE CONCENTRATA

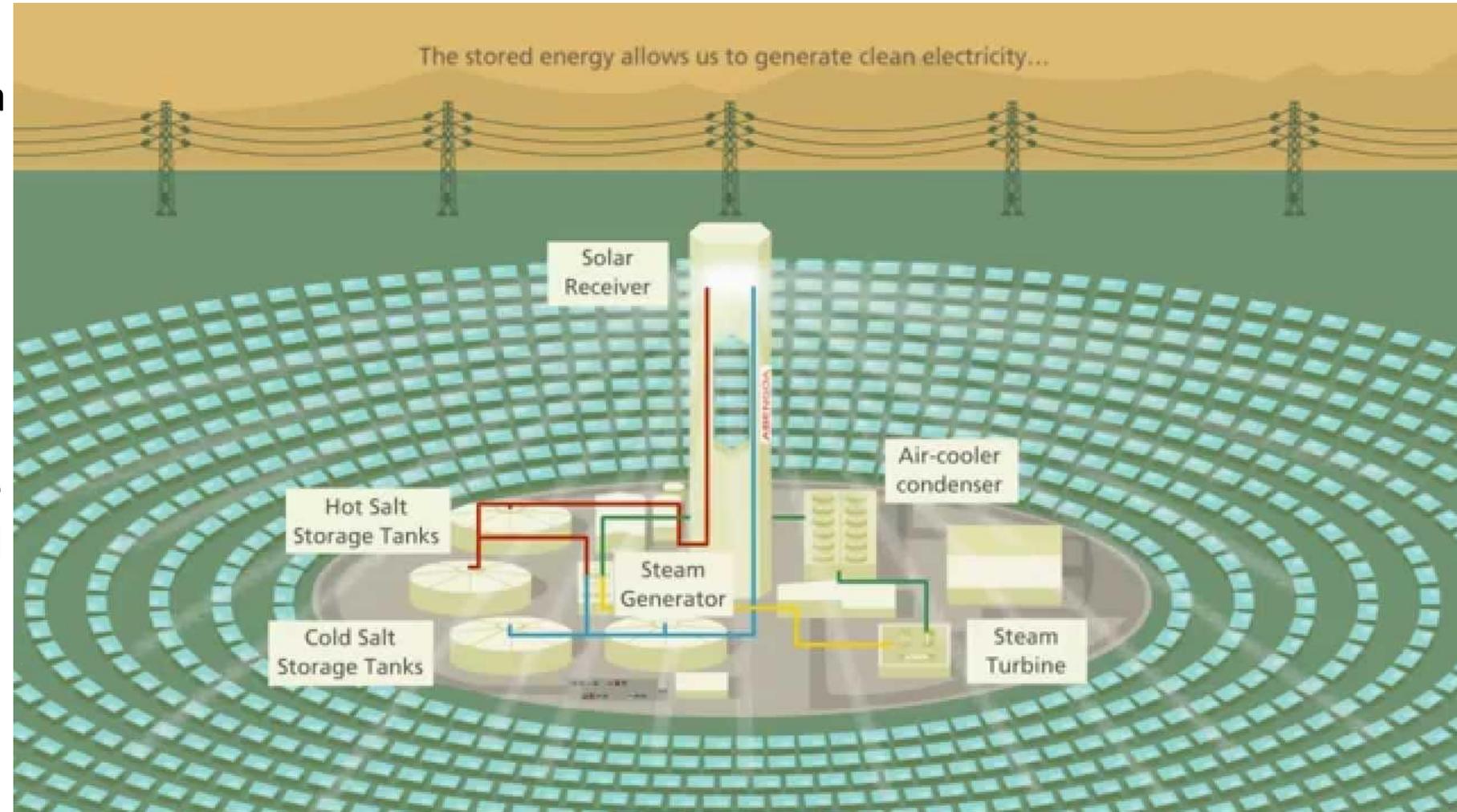
Concentrando la luce solare riflessa dagli specchi su un ricevitore che contiene un solido o un fluido, è possibile raggiungere temperature molto elevate. Il fluido caldo può essere utilizzato per generare elettricità tramite turbine o per altri usi. La quantità potenziale di energia elettrica di tali unità a energia solare concentrata è parecchie volte superiore a quella del fotovoltaico solare, sebbene il metodo si basi sull'assorbimento della luce solare diretta mentre le celle solari possono funzionare in una certa misura nei giorni nuvolosi.

La frazione di energia termica che può essere estratta e **convertita in elettricità** da una massa di fluido caldo a una temperatura  $T_h$  è limitata dalla seconda legge della termodinamica a essere non superiore a  $(T_h - T_c) / T_h$ , dove  $T_c$  è la temperatura assoluta finale dell'acqua di raffreddamento. Di conseguenza, è molto vantaggioso utilizzare un gas che è stato riscaldato alla massima temperatura possibile al fine di massimizzare la quantità di energia che viene trasformata in energia elettrica anziché solo degradare, sprecare calore.

Sono state raggiunte temperature di 1500°C nel vapore riscaldato focalizzando la luce del sole. Generalmente, le centrali elettriche necessitano di riscaldamento a 1200-1350°C ad una pressione di 10-30 atm per funzionare. La semplice focalizzazione della luce solare su tubi d'aria non può raggiungere più di 700°C a una pressione di 1 atm. Va anche tenuto presente che i corpi caldi, come un ricevitore solare, perdono continuamente energia irradiandola verso l'esterno.

Il tasso di perdita di radiazione è proporzionale a  $T^4$ , dove T è la sua temperatura Kelvin, e alla superficie del collettore. Di conseguenza, l'efficienza nell'energia di raccolta non aumenta linearmente con la temperatura. La dimensione del ricevitore è mantenuta il più piccola possibile per minimizzare la perdita di energia radiativa.

*Torri Solari vedi Baird Cann*



The **Solucar Complex** is a complex in [Sanlúcar la Mayor, Spain](#), used primarily for solar power developments.

The complex includes:

[PS10 Solar Power Plant](#)

[PS20 Solar Power Plant](#)

[Solnova Solar Power Station](#)

PS10 is the first of a set of [solar power](#) generation plants to be constructed in the same area that will total more than 300 MW by 2013.

Power generation will be accomplished using a variety of technologies. The first two power plants to be brought into operation at [Sanlúcar la Mayor](#) are the PS10, and Sevilla PV, the largest low concentration system photovoltaic plant in Europe.

### **300 MW:**

Completed and is operating:

PS10 (10 MW)

[PS20](#) (20 MW)

[Solnova 1](#) (50 MW)

Solnova 3 (50 MW)

Solnova 4 (50 MW)

**total: 180 MW.**

Three more plants are planned:

AZ20 (20 MW)

Solnova 2 (50 MW)

Solnova 5 (50 MW)

**Total 120 MW.**

PS20 and AZ20 are twin 20 MWe tower plants based on the same concept as PS10



## CELLE SOLARI FOTOVOLTAICHE (PV)

L'elettricità può essere prodotta direttamente dall'energia solare tramite il meccanismo di **fotokonversione**. Questa applicazione sfrutta ***l'effetto fotovoltaico***, che è la creazione di cariche positive e negative separate in un materiale a seguito dell'eccitazione mediante luce di un elettrone all'interno del solido dal suo normale livello di energia a uno stato eccitato superiore. Sia l'elettrone eccitato che la posizione del sito di carica positiva, la "buca" o vacanza elettronica, sono mobili all'interno del solido, quindi è possibile far fluire una corrente elettrica nel materiale. La buca "si muove" mediante il trasferimento di un elettrone di collegamento (diverso) da un atomo adiacente alla buca iniziale all'atomo su cui si trova la buca, commutando così la posizione della carica positiva. I successivi trasferimenti di elettroni di legame di questo tipo consentono alla buca di muoversi più lontano.

Le due metà di una cella fotovoltaica, generalmente **indicate con p e n**, sono composte da materiali diversi. Questa differenza crea un potenziale elettrico interno che dirige gli elettroni in una direzione e le lacune nella direzione opposta.

# Funzionamento di una cella fotovoltaica

The two halves of a silicon solar cell are distinguished by having the element doped with small amounts of two different elements.

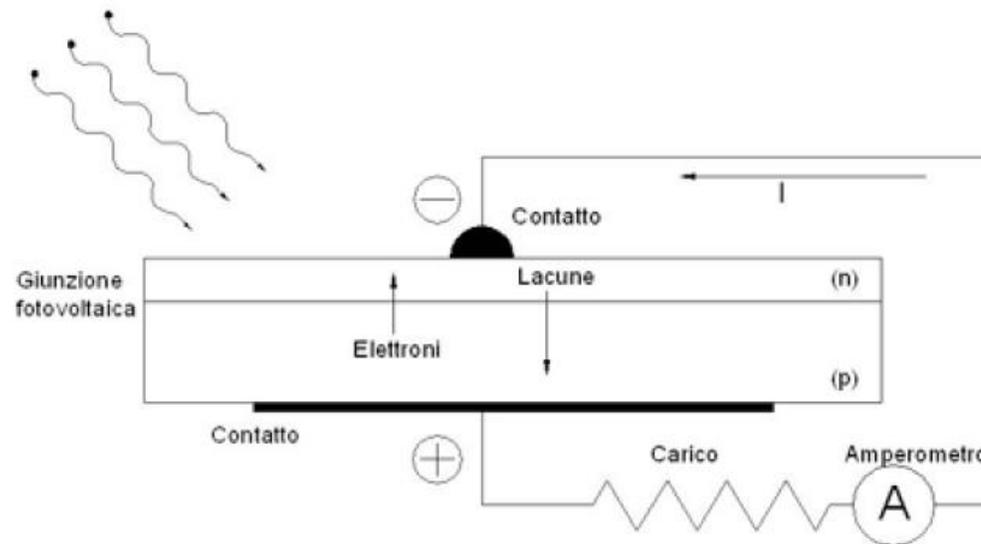


Fig. 1.1: Rappresentazione dell'effetto fotovoltaico (6)

Una volta che l'elettrone si è fatto strada attraverso il materiale n fino al primo elettrodo, passa attraverso un circuito esterno a un secondo elettrodo, dove si ricombina con un foro che vi è migrato attraverso il materiale p (drogaggio di silice con fosforo (n) e boro (p)).

Il materiale utilizzato per il fotovoltaico (PV) o le celle solari è un **semiconduttore**, che è un solido che ha un **comportamento conduttivo intermedio tra quello di un metallo (a conduzione libera) e quello di un isolante (non conduttivo)**.

Nei semiconduttori, i legami che collegano gli atomi sono relativamente deboli, quindi la separazione di energia tra i livelli di legame (chiamata banda di valenza quando applicata ai solidi) e i livelli di antilegame (chiamata banda di conduzione) è relativamente piccola (rispetto a quella di un isolante). Di conseguenza, l'energia richiesta per eccitare il meno stabile degli elettroni dei livelli pieni di legame al più stabile dei livelli di antilegame vuoti, chiamato **band gap** (o banda proibita), è piccolo e in molti casi si trova nell'intervallo di energia di fotoni di luce solare.

Il semiconduttore più comune utilizzato nelle celle solari è il **silicio cristallino elementare**, per il quale la banda proibita che separa i livelli di energia è  $124 \text{ kJ mol}^{-1}$ , che corrisponde alla luce infrarossa.

*L'assorbimento della luce del silicio si estende dall'energia del gap di banda di  $124 \text{ kJ mol}^{-1}$  fino alle energie associate alla regione visibile, quindi assorbe la maggior parte dei fotoni di luce solare. Tuttavia, tutta l'energia del fotone in eccesso rispetto alla differenza di banda di  $124 \text{ kJ mol}^{-1}$  viene sprecata convertendosi in calore anziché promuovere il flusso di corrente.*

Questa perdita di energia è combinata con quella sprecata dall'immediata ricombinazione di elettroni e buche anche nel più puro silicio monocristallino - che impedisce alla coppia di particelle di contribuire al flusso di carica all'esterno della cellula – e si raggiunge un massimo teorico del 29% dell'energia solare può essere convertito in energia elettrica.

Le celle di silicio commerciali ora hanno un'efficienza del 15-20%.

Per costruire celle fotovoltaiche si possono usare materiali semiconduttori diversi dal silicio:

- se ne viene scelto uno con un **gap di banda più piccolo**, anche se vengono assorbiti più fotoni solari, una frazione maggiore dell'energia dei fotoni di energia più alta viene sprecata come calore;
- se ne viene scelto uno con **intervallo di banda più grande**, meno fotoni alla luce del sole vengono assorbiti e producono elettroni.

Dati questi trade-off e lo spettro solare effettivo ricevuto sulla superficie terrestre, l'intervallo di banda ottimale corrisponde a una lunghezza d'onda vicino a quella di 920 nm, rispetto a quella di 1100 nm per il *silicio cristallino (poli- o mono- cristallino)*



La **conversione teorica massima** per una cella solare **a giunzione singola** di qualsiasi tipo è **del 34%**.

Una percentuale più elevata di energia solare può essere assorbita e utilizzata se **diversi wafer di celle con caratteristiche di assorbimento leggermente diverse sono impilati uno sull'altro in una singola cella**, sebbene tali celle solari siano costose da produrre.

Il **silicio amorfo** ha un'efficienza massima di poco più della metà del valore del silicio cristallino puro, perché la ricombinazione immediata di elettrone-foro si verifica più facilmente, convertendo più energia catturata in calore, ma è ampiamente utilizzata nelle celle solari perché è molto **meno costoso** da produrre, può essere prodotto in **film sottili** che assorbono i fotoni di luce solare molto meglio che piuttosto che i wafer (relativamente) spessi necessari per il silicio cristallino.

Il film di silicio amorfo in una cella fotovoltaica viene depositato su una superficie conduttiva mediante **deposizione chimica da vapore**. In questa tecnica, il gas silano,  $\text{SiH}_4$ , a bassa pressione si decompone a  $600\text{-}650^\circ\text{C}$  nei suoi elementi, depositando uno strato di silicio amorfo sulla superficie:

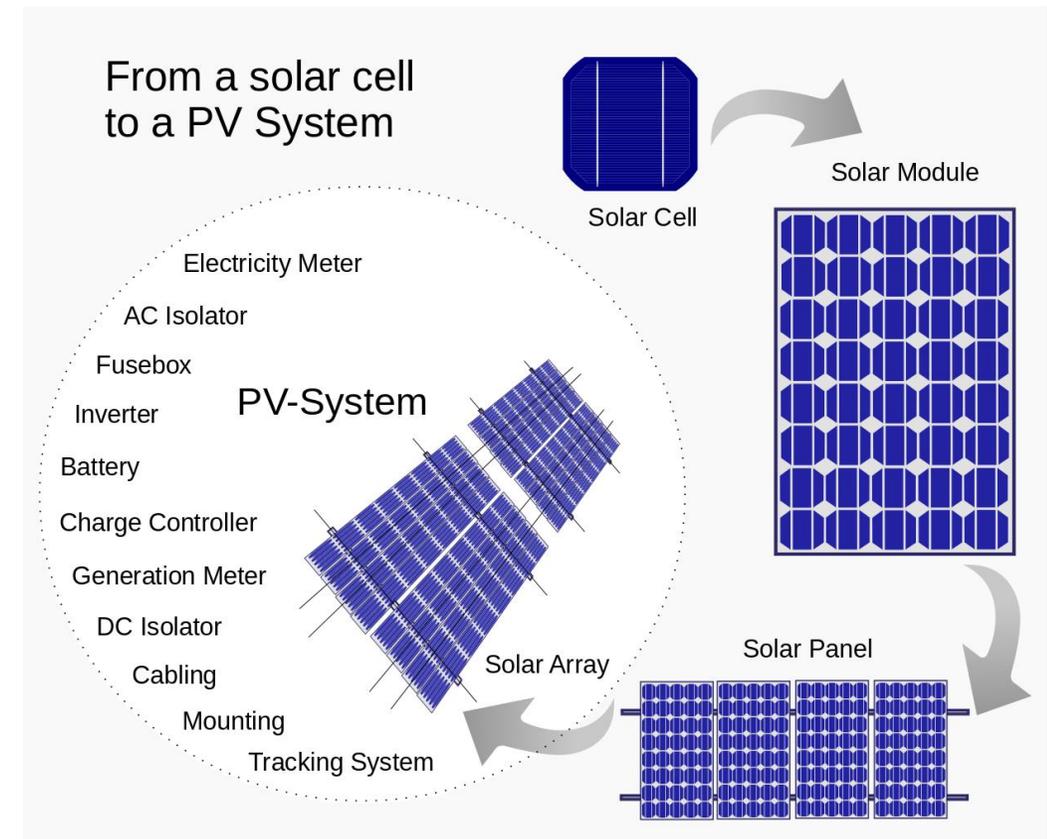


La superficie del silicio amorfo utilizzato per formare le celle solari contiene una piccola frazione di atomi di idrogeno, che si legano a qualsiasi atomo di silicio che non forma quattro legami con i loro vicini di silicio e altrimenti promuoverà la ricombinazione elettrone-lacuna spontanea. La perdita graduale nel tempo di questo idrogeno porta alla degradazione delle celle.

Il silicio amorfo ha un gap di banda un po' più grande rispetto all'elemento cristallino - e in effetti uno più grande del valore ottimale - in modo da catturare più energia visibile dello spettro solare ma meno dell'infrarosso.

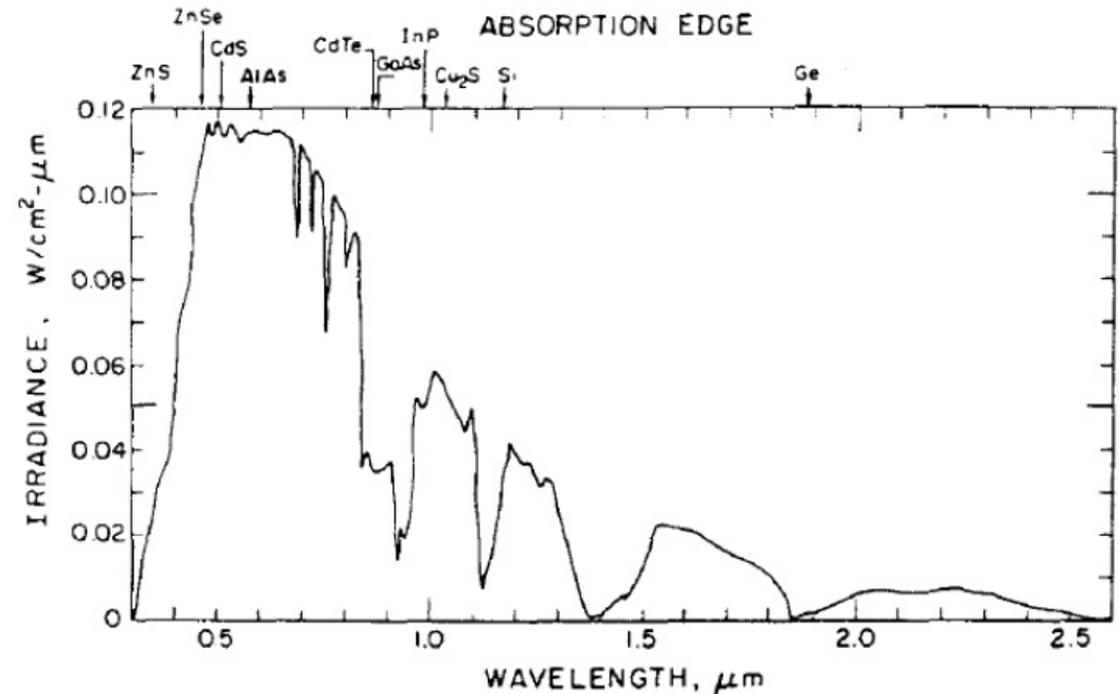
Ogni **cella solare in silicio cristallino** misura circa 10 cm x 10 cm x 200  $\mu\text{m}$  di spessore e produce solo circa 1 W di elettricità; quindi per generare elettricità in quantità utili, molte celle sono riunite in un pannello solare.

I **film sottili di silicio amorfo** hanno uno spessore di soli 2  $\mu\text{m}$ , vale a dire un centesimo di quelli di silicio di cristallo. A causa della loro sottigliezza, sono trasparenti alla luce visibile e possono essere utilizzati su finestre (il vetro può essere la superficie su cui si deposita il silicio amorfo).



Un'altra importante **cella fotovoltaica a film sottile** utilizza **cadmio**: Cd-Te per un lato della cella e CdS per l'altro. Il sistema Cd-Te inizia ad assorbire la luce a 920 nm, che è la lunghezza d'onda ottimale per raccogliere il numero massimo di fotoni e quindi il numero di elettroni e la massima corrente disponibile dallo spettro solare.

*Irradianza solare media sulla superficie terrestre in funzione della lunghezza d'onda. Superiormente sono indicate le band gaps di diversi semiconduttori.*



Benché siano collettori di luce piuttosto inefficienti, le celle di cadmio sono poco costose da produrre, il che spiega la loro crescente popolarità.

Le **celle solari organiche** utilizzano due diversi semiconduttori organici polimerici uniti tra loro. Quelli messi a punto finora hanno efficienze piuttosto basse nel convertire la luce solare in corrente elettrica, sebbene siano poco costose da produrre e possano raggiungere importanza in futuro.

## CELLE SOLARI SENSIBILIZZATE DA COLORANTE/ **DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS**

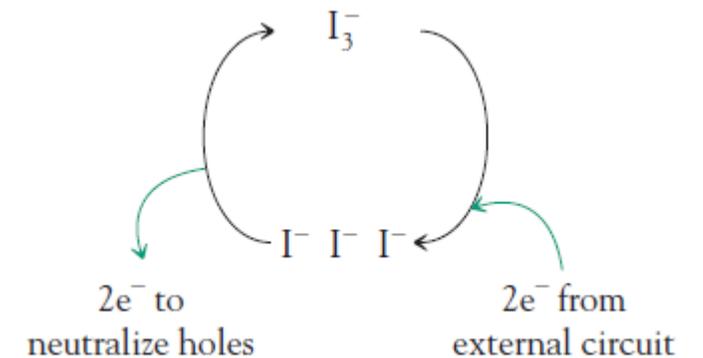
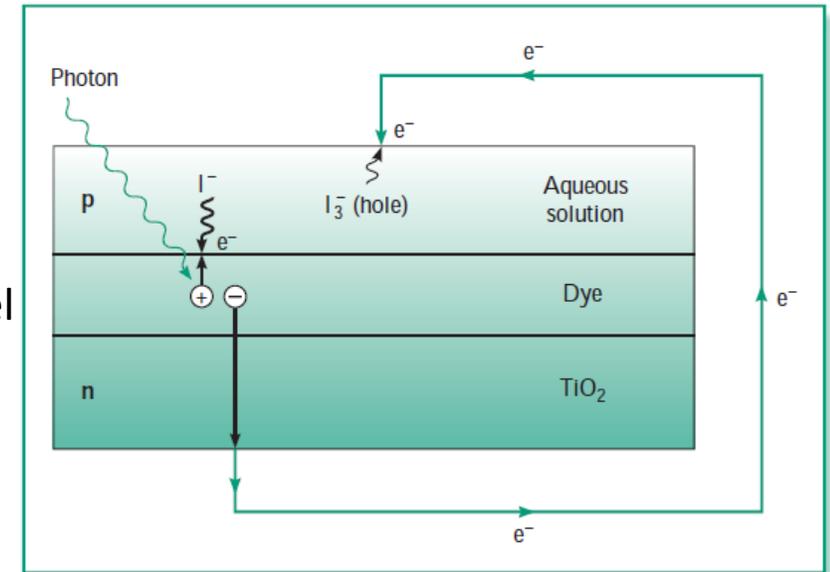
Nel tentativo di ideare celle solari che siano assorbitori della luce solare più efficienti in tutto il suo spettro, e di produrre celle che siano poco costose da produrre, i chimici hanno studiato molti coloranti. In tali celle, le varie funzioni della cella vengono eseguite da sostanze diverse, piuttosto che essenzialmente tutte dalla stessa, come avviene nei sistemi di silicio. ***Un sottile film di un colorante (il sensibilizzatore) assorbe i fotoni della luce solare. L'elettrone liberato risultante passa rapidamente dal colorante a un semiconduttore trasparente e economico come il biossido di titanio,  $TiO_2$ , che è il materiale n della cellula, e viene trasportato attraverso di esso a un elettrodo.***

La più promettente cella solare sensibilizzata da colorante, chiamata **cella di Gratzel**, è in realtà un **sistema fotoelettrochimico** poiché incorpora una reazione elettrochimica. Un sottile strato di colorante, un composto organometallico di rutenio, è depositato su piccole particelle di  $\text{TiO}_2$ , uno strato di cui copre un elettrodo.

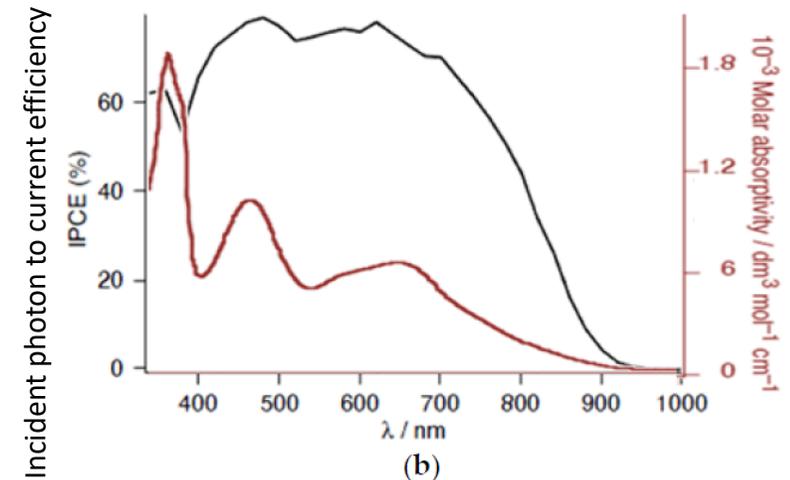
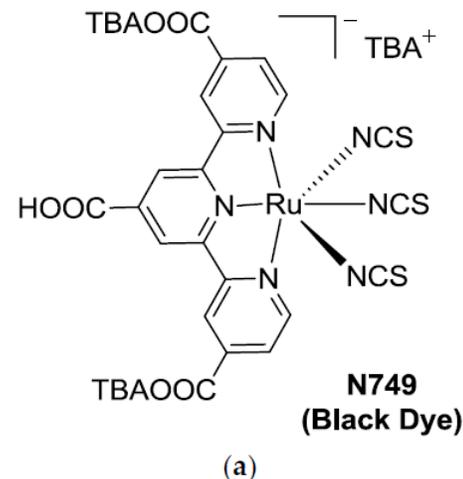
- L'elettrone liberato dall'assorbimento di un fotone da una molecola di colorante viene rapidamente trasferito al semiconduttore ne viaggia attraverso di esso fino ad un elettrodo.
- la buca creata da un fotone assorbito viaggia attraverso il colorante e viene trasferita a una sostanza chimica nella soluzione elettrolitica dall'ossidazione della sostanza chimica, che libera rapidamente un elettrone per neutralizzare la buca del colorante.

Questo processo si verifica abbastanza rapidamente e quindi evita la possibilità che la buca si ricombini con un elettrone liberato.

- Il prodotto chimico ossidato viaggia quindi verso il secondo elettrodo, dove riceve l'elettrone dalla corrente esterna e viene quindi ridotto, pronto a reagire di nuovo con una buca.
- La sostanza chimica ridotta nella soluzione elettrolitica, che diventa ossidata nel processo, è lo ione ioduro,  $\text{I}^-$ , presente in una soluzione a contatto con il colorante. In questo mezzo organico, lo ioduro ossidato è costituito dallo ione triioduro,  $\text{I}_3^-$ . L'elettrone liberato scorre attraverso il circuito esterno e successivamente rientra nella cella di un elettrodo, riducendo lo ione triioduro nella soluzione di elettrolita allo ione ioduro. L'elettrolita, solitamente un solvente organico come l'acetonitrile,  $\text{CH}_3\text{CN}$ , è il materiale che trasporta la buca dalla sua creazione al secondo elettrodo.



- Uno dei vantaggi delle celle fotovoltaiche sensibilizzate da colorante è che operano in condizioni di luce a bassa intensità, come accade nei giorni nuvolosi, mentre le celle di silicio in queste condizioni sono molto inefficienti a causa della ricombinazione della buca elettronica.
- Le conversioni della luce solare-corrente superiori all'11% sono state ottenute nelle celle dei coloranti. Inoltre, la purezza dei materiali nelle celle sensibilizzate dai coloranti non deve essere tanto elevata come nei sistemi di silicio perché le varie funzioni cellulari sono separate, il che riduce il costo.



triscarboxy-terpyridine Ru-complex [Ru(2,2',2''-(COOH)<sub>3</sub>-terpy)(NCS)<sub>3</sub>]

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5456731/pdf/materials-09-00137.pdf>

«Panchromatic absorption»

Energia Solare

GENERAZIONE DISTRIBUITA DI ENERGIA ELETTRICA - LA SVOLTA  
SEGNATA DAL FOTOVOLTAICO (Introduction to Photovoltaics)

Alessandro Massi Pavan (DIA) [apavan@units.it](mailto:apavan@units.it)



Di seguito a fonti energetiche solari distribuite,  
La fonte energetica nucleare,  
concentrata in grandi impianti



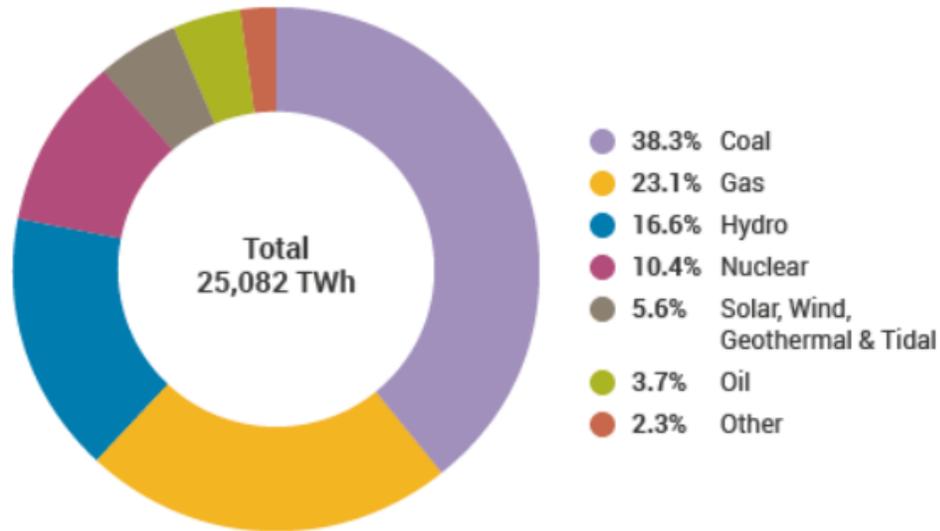
Home / Information Library / Current and Future Generation / Nuclear Power in the World Today

## Nuclear Power in the World Today

(Updated February 2019)

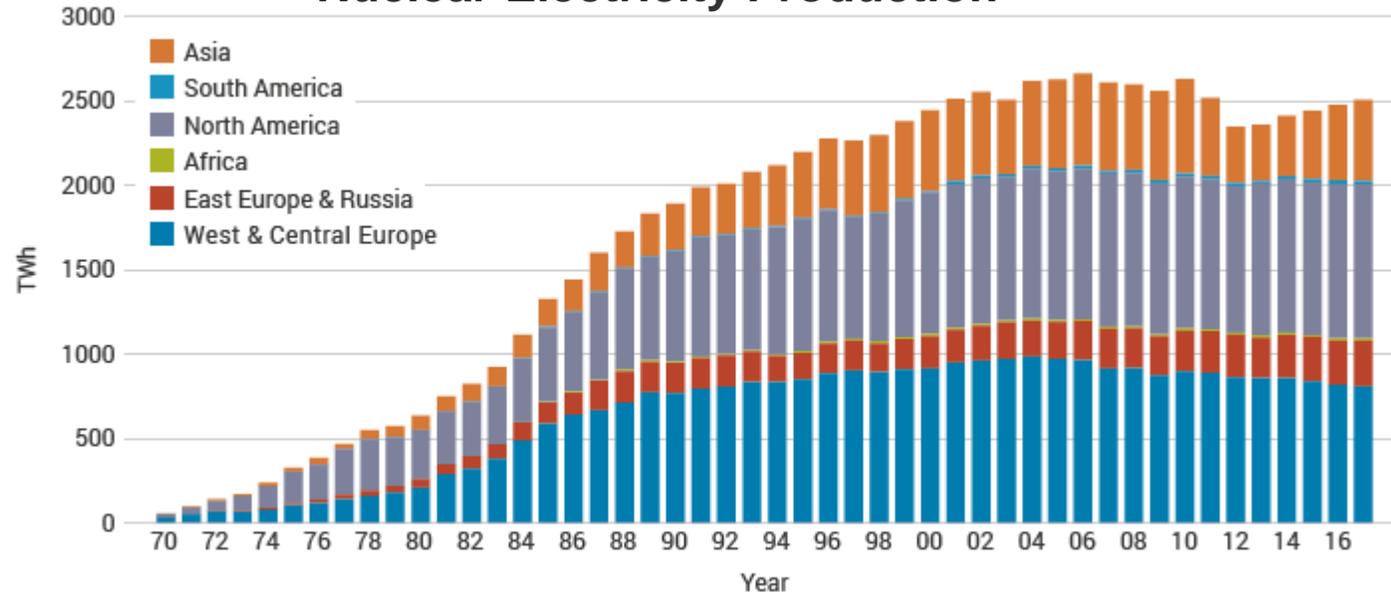
- The first commercial nuclear power stations started operation in the 1950s.
- Nuclear energy now provides about 11% of the world's electricity from about 450 power reactors.
- Nuclear is the world's second largest source of low-carbon power (30% of the total in 2016).
- Over 50 countries utilise nuclear energy in about 225 research reactors. In addition to research, these reactors are used for the production of medical and industrial isotopes, as well as for training.

World Electricity Production by Source 2016



Source: IEA Electricity Information 2018

## Nuclear Electricity Production



Source: IAEA PRIS

<http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>

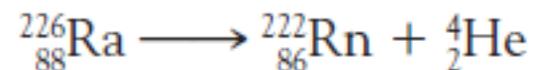
## LA NATURA DELLA RADIOATTIVITÀ

Sebbene la maggior parte dei nuclei atomici siano stabili all'infinito, alcuni non lo sono. I nuclei instabili o radioattivi si decompongono spontaneamente emettendo una piccola particella che si muove molto velocemente e quindi porta con sé una grande quantità di energia. In alcuni tipi di processi di decomposizione nucleare, gli atomi vengono convertiti da quelli di un elemento a quelli di un altro come conseguenza di questa emissione. Elementi molto pesanti sono particolarmente inclini a questo tipo di decomposizione, che avviene per emissione di una piccola particella. I nuclei prodotti dall'emissione della particella possono o meno essere radioattivi; se lo sono, subiranno un'altra decomposizione in un secondo momento.

Ricordiamo dalla chimica introduttiva che il numero di massa è il numero di particelle pesanti - protoni e neutroni - e non la massa effettiva del nucleo. **Una particella alfa ( $\alpha$ )** è una particella emessa radioattivamente che ha una carica di +2 e un numero di massa di 4 - ha due neutroni e due protoni - ed è **identica a un nucleo di elio** comune.

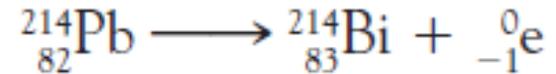
Quindi una particella  $\alpha$  è scritta come  ${}_2^4\text{He}$ , dove 4 è il suo numero di massa e 2 si riferisce alla sua carica nucleare (cioè numero di protoni).

Il nucleo che rimane dopo che un atomo ha perso una particella ha una carica nucleare che è 2 unità in meno rispetto all'originale ed è 4 unità più leggero. Ad esempio, quando un nucleo  ${}_{88}^{226}\text{Ra}$  (radio-226) emette una particella  $\alpha$ , il nucleo risultante ha un numero di massa di  $226 - 4 = 222$  unità e una carica nucleare di  $88 - 2 = 86$ ; questo è un elemento completamente nuovo che è un isotopo dell'elemento radon. Il processo può essere scritto come una reazione nucleare:



Si noti che sia il numero totale di massa che la carica nucleare totale si bilanciano individualmente in tali equazioni

**Una particella beta ( $\beta$ ) è un elettrone.** Si forma quando un neutrone si divide in un protone e un elettrone nel nucleo. Poiché il protone rimane nel nucleo quando l'elettrone lo lascia, la carica nucleare (o numero atomico) aumenta di 1 unità (puoi immaginare questo effetto come "sottraendo una particella negativa"). Non vi è alcun cambiamento nel numero di massa del nucleo, poiché il numero totale di neutroni più i protoni rimane lo stesso. Ad esempio, quando un atomo dell'isotopo di piombo  ${}_{82}^{214}\text{Pb}$  (piombo-214) decade radioattivamente con emissione di una particella  $\beta$ , la carica nucleare del prodotto è  $82 + 1 = 83$ , corrispondente all'elemento bismuto; il numero di massa rimane 214:



Si noti che il simbolo  ${}_{-1}^0\text{e}$  usato qui per l'elettrone mostra il suo numero di massa (zero) e la sua carica; nell'equazione si bilanciano i numeri di massa totale e i numeri di carica nucleare.

Un altro importante tipo di radioattività è l'emissione di una **particella (o raggio) gamma ( $\gamma$ )** da un nucleo. Questa è un'**enorme quantità di energia concentrata in un fotone e non possiede massa di particelle**. Né il numero di massa nucleare né la carica nucleare cambiano quando viene emessa una  $\gamma$  particella. L'emissione di un raggio spesso accompagna l'emissione di una particella  $\alpha$  o  $\beta$  da un nucleo radioattivo.

TABLE 9-1		Summary of Small Particles Produced by Radioactivity	
Particle Symbol and Name	Chemical Symbol	Comment	Effect on Nucleus of Particle Emission
$\alpha$ (alpha)	${}^4_2\text{He}$	Nucleus of a helium atom	Atomic number reduced by 2
$\beta$ (beta)	${}_{-1}^0\text{e}$	Fast-moving electron	Atomic number increased by 1
$\gamma$ (gamma)	None	High-energy photon	None

## **GLI EFFETTI SULLA SALUTE DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI**

Le particelle  $\alpha$  o  $\beta$  prodotte nel decadimento radioattivo di un nucleo non sono di per sé sostanze chimiche dannose, poiché sono semplicemente il nucleo di un atomo di elio e un elettrone. Tuttavia, vengono espulsi dal nucleo con un'incredibile quantità di energia di movimento. Quando questa energia viene assorbita dalla materia incontrata dalla particella, essa ionizza spesso gli atomi o le molecole; per questo motivo, si chiama radiazione ionizzante o semplicemente radiazione. Questa radiazione è potenzialmente pericolosa se la assorbiamo, poiché i componenti molecolari del nostro corpo possono essere ionizzati o altrimenti danneggiati.



Giulio De Leo, Giulia Fiorese,  
Giorgio Guariso

ENERGIA

E SALUTE DELLA TERRA

FONDAZIONE ACHILLE E GIULIA BOROLI

<http://www.fondazioneaegboroli.it/images/pdf/energia-salute-terra/energia.pdf>

**Tabella 1.9: Poteri calorifici di alcuni combustibili fissati per convenzione dalla norma internazionale UNI 10389**

Gas naturale	8250 kcal/m <sup>3</sup> (a press. Atm. a 15 °C)
Gas di petrolio liquefatto - GPL	27000 kcal/m <sup>3</sup> (a press. Atm. A 15 °C)
Gasolio	10210 kcal/kg
Olio combustibile	9870 kcal/kg

***L'uranio naturale è certamente la fonte con la maggiore densità energetica in assoluto (stimata in 418,7 GJ/kg, pur con metodi di conversione completamente diversi); per comprenderne le implicazioni, ci rifacciamo a un semplice e istruttivo esempio presentato chiaramente da Leonardo Maugeri nel libro *Con tutta l'energia possibile* (2008): si supponga di voler realizzare una centrale termoelettrica di 1 GW. Se sarà di tipo termonucleare necessiterà in prima approssimazione di circa 30 t di uranio arricchito all'anno, che possono essere, in linea teorica, contenute in un spazio limitato, equivalente a un vagone ferroviario; una centrale a olio combustibile della stessa potenza richiede invece 1.500.000 t di combustibile stivabili in circa 28.000 vagoni, mentre un'analogha centrale a carbone richiederebbe 2 milioni t di minerale trasportabili in 48.000 carri ferroviari.***

## Energia nucleare

Sebbene la maggior parte dell'energia che usiamo provenga dal calore generato dalla combustione di combustibili contenenti carbonio, il calore in quantità commerciali può anche essere prodotto indirettamente quando si verificano processi che coinvolgono nuclei atomici; questa fonte di energia è chiamata **energia nucleare**, usata principalmente *per produrre elettricità*.

Poiché *le forze nucleari sono molto più forti delle forze di legame chimico*, l'energia rilasciata per atomo nelle reazioni nucleari è immensa rispetto a quella ottenuta nelle reazioni di combustione.

Una delle attrazioni del nucleare è che **non genera anidride carbonica o altri gas serra** durante il suo funzionamento. Alcuni politici hanno promosso l'espansione del nucleare come mezzo per combattere il riscaldamento globale in futuro.

Esistono due processi mediante i quali l'energia viene ottenuta dai nuclei atomici: fissione e fusione.

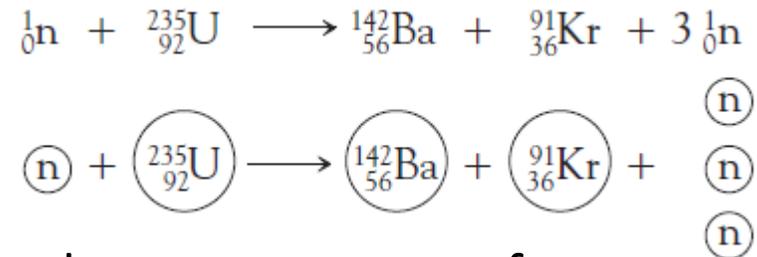
- Nella **fissione**, la collisione di alcuni tipi di nuclei pesanti con un neutrone provoca la scissione del nucleo in due frammenti di dimensioni simili chiamati prodotti di fissione. Poiché i frammenti separati sono più stabili dal punto di vista energetico rispetto al nucleo pesante originale, l'energia viene rilasciata dal processo.
- La combinazione di due nuclei molto leggeri per formare un nucleo combinato si chiama **fusione**. Ciò comporta anche il rilascio di enormi quantità di energia, dal momento che il nucleo combinato è più stabile di quello originale, più leggero.

## REATTORI NUCLEARI A FISSIONE

Attualmente, ci sono circa 440 centrali nucleari a fissione in funzione in 30 paesi in tutto il mondo.

Collettivamente, generano più del 11% della domanda globale di elettricità.

L'esempio più economicamente utile di fissione, e quello utilizzato principalmente dalle centrali elettriche, è indotto dalla collisione di un nucleo  $^{235}\text{U}$  con un neutrone. La combinazione di queste due particelle è instabile. Quando si decompone, i prodotti variano ma sono tipicamente un nucleo di bario,  $^{142}\text{Ba}$ , uno di krypton,  $^{91}\text{Kr}$  e tre neutroni:



Non tutti i nuclei di uranio che assorbono un neutrone formano esattamente gli stessi prodotti di fissione, ma il processo produce sempre due nuclei delle dimensioni di Ba e Kr, insieme a diversi neutroni.

I due nuovi nuclei prodotti nelle reazioni di fissione si muovono molto velocemente, così come i neutroni. È l'energia termica di questa energia cinetica in eccesso che viene utilizzata per produrre energia elettrica. Infatti, la generazione di energia elettrica da parte dell'energia nucleare e dalla combustione di combustibili fossili comporta l'uso della fonte di energia per produrre vapore, che viene poi utilizzato per trasformare turbine di grandi dimensioni che producono elettricità.

<https://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-and-uranium-requireme.aspx>

**WORLD NUCLEAR  
ASSOCIATION**

WORLD*	2563	c 10.3**	440	390,395	55	62,656	109	117,912	329	359,682	68,240
	TWh	% e	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	tonnes U
	NUCLEAR ELECTRICITY GENERATION		OPERABLE		UNDER CONSTRUCTION		PLANNED		PROPOSED		URANIUM REQUIRED

Sources:

Reactor and electricity data: International Atomic Energy Agency [Power Reactor Information System](#) (PRIS); US Energy Information Administration; company data; World Nuclear Association estimates

World Nuclear Association, *The Nuclear Fuel Report* (published September 2019, reference scenario forecast) – for uranium requirements

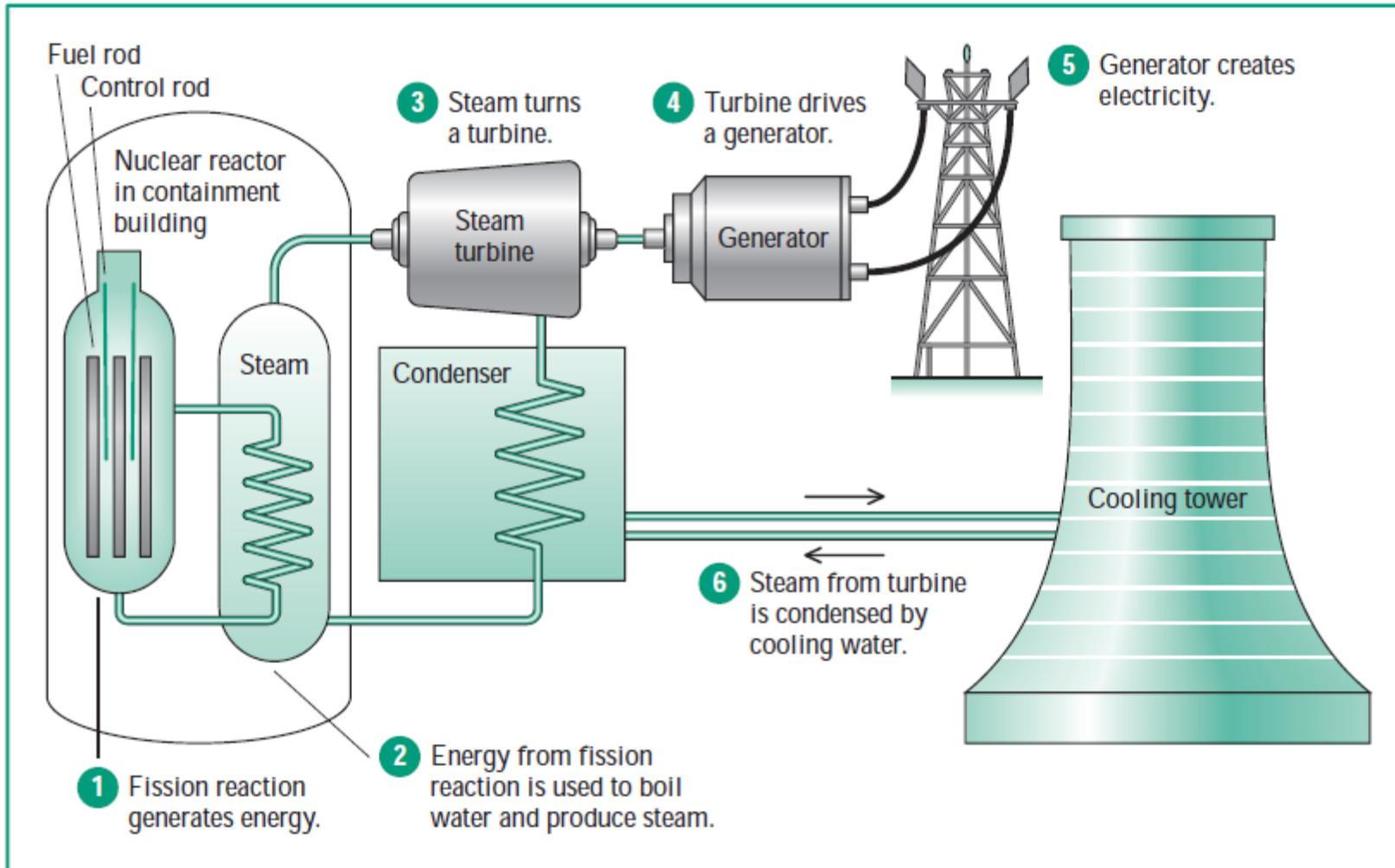
68,240 tU = 80,472 t U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>

Una media di circa tre neutroni viene prodotta per nucleo  $^{235}\text{U}$  che reagisce; uno di questi neutroni può produrre la fissione di un altro nucleo  $^{235}\text{U}$ , e così via, producendo una **reazione a catena**. Nelle **bombe atomiche**, i neutroni extra sono utilizzati per indurre una fissione molto rapida di tutto l'uranio che è costretto a rimanere in un piccolo volume, quindi l'energia viene rilasciata in modo esplosivo. Al contrario, in un reattore nucleare l'energia viene rilasciata gradualmente garantendo che, in media, solo un neutrone rilasciato da ciascun evento di fissione  $^{235}\text{U}$  avvii la fissione di un altro nucleo. I neutroni extra prodotti nella fissione vengono assorbiti dalle **barre di controllo** in un reattore nucleare. Queste sono barre fatte da elementi che assorbono neutroni come il cadmio. La posizione delle aste nel reattore può essere variata per controllare il tasso di fissione.

I neutroni che lasciano i nuclei  $^{235}\text{U}$  sulla fissione sono troppo veloci per essere assorbiti in modo efficiente da altri nuclei e causare ulteriore fissione, quindi devono essere rallentati se devono essere utili. Ciò è realizzato dal **moderatore che, a seconda del tipo di reattore, può essere acqua, acqua pesante (cioè acqua arricchita nel deuterio) o grafite.** Il materiale refrigerante utilizzato per trasferire l'energia termica prodotta dalla fissione nella maggior parte dei tipi di reattori è **l'acqua**, ma in alcuni casi viene utilizzato **biossido di carbonio gassoso**. In definitiva, il vapore ad alta pressione e ad alta temperatura viene creato, proprio come in un impianto di produzione di energia da combustibili fossili, e viene utilizzato per trasformare le turbine e creare elettricità.

L'efficienza operativa dei reattori nucleari è significativamente inferiore a quella dei combustibili fossili poiché il nucleo del reattore nucleare, da cui viene prelevato il calore, è poco più di  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mentre quello delle centrali a combustibile fossile può essere alto come  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

L'uranio nei reattori, di solito sotto forma di ossido  $\text{UO}_2$ , esiste sotto forma di piccole palline che vengono poste insieme in una serie di barre in lega di zirconio chiamate **barre di combustibile**. Quando dopo diversi anni di funzionamento il combustibile di uranio in un'asta viene «consumato», cioè quando il suo contenuto di  $^{235}\text{U}$  è troppo basso perché possa essere più utile come combustibile poiché la velocità con cui l'uranio produce neutroni è diventata troppo bassa, viene rimosso dal reattore e sostituito.



**FIGURE 9-2** Step-by-step schematic diagram of the production of electrical power by a nuclear fission reactor.

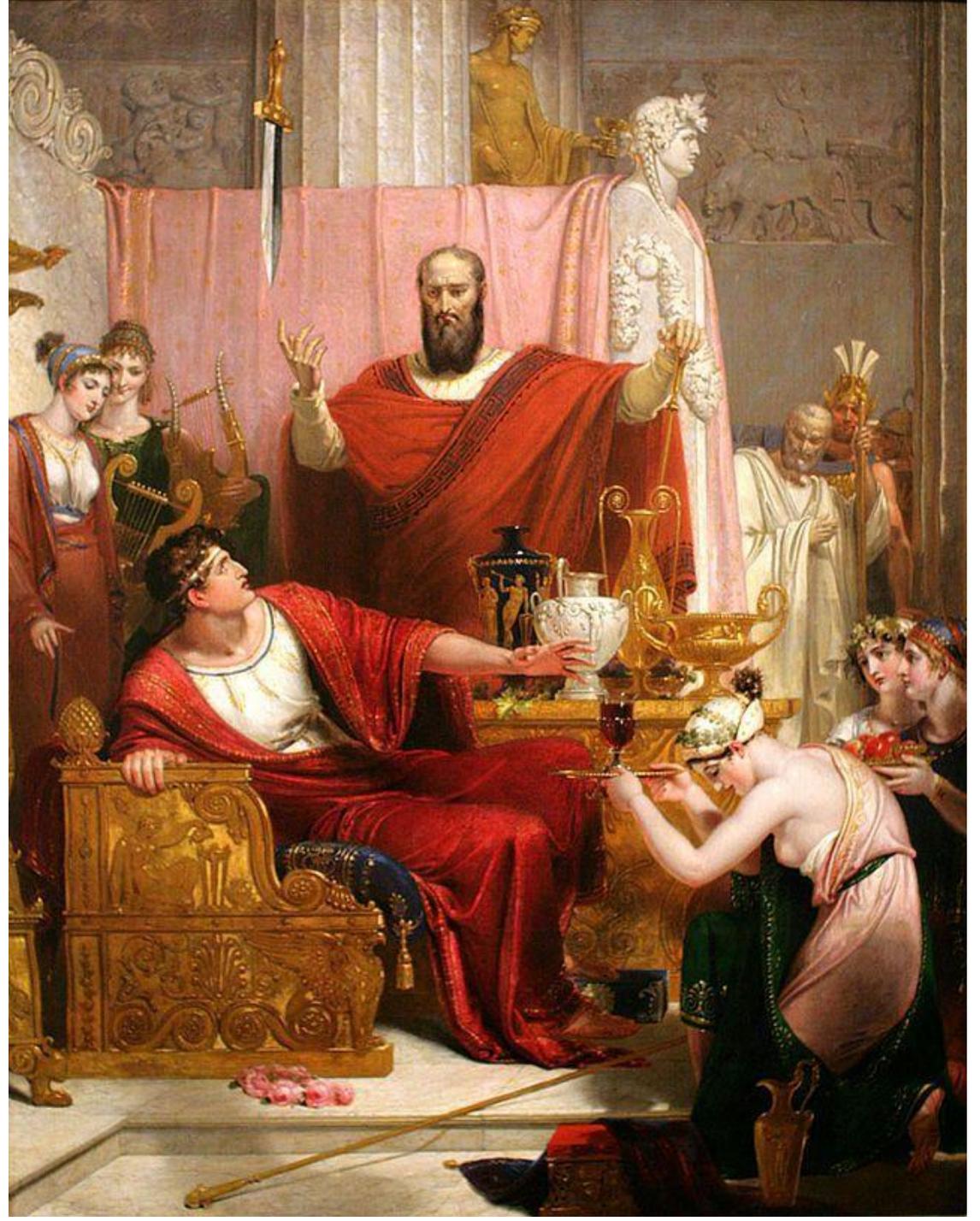


# Incidenti

- Three Miles Island
- Chernobyl (all'1.45 del 26 aprile 1986  
50 tonnellate di materiale radioattivo)
- Fukushima (11 marzo 2011)

<https://www.iaea.org/publications/10962/the-fukushima-daiichi-accident>

<https://www.iaea.org/newscenter/focus/fukushima/status-update>



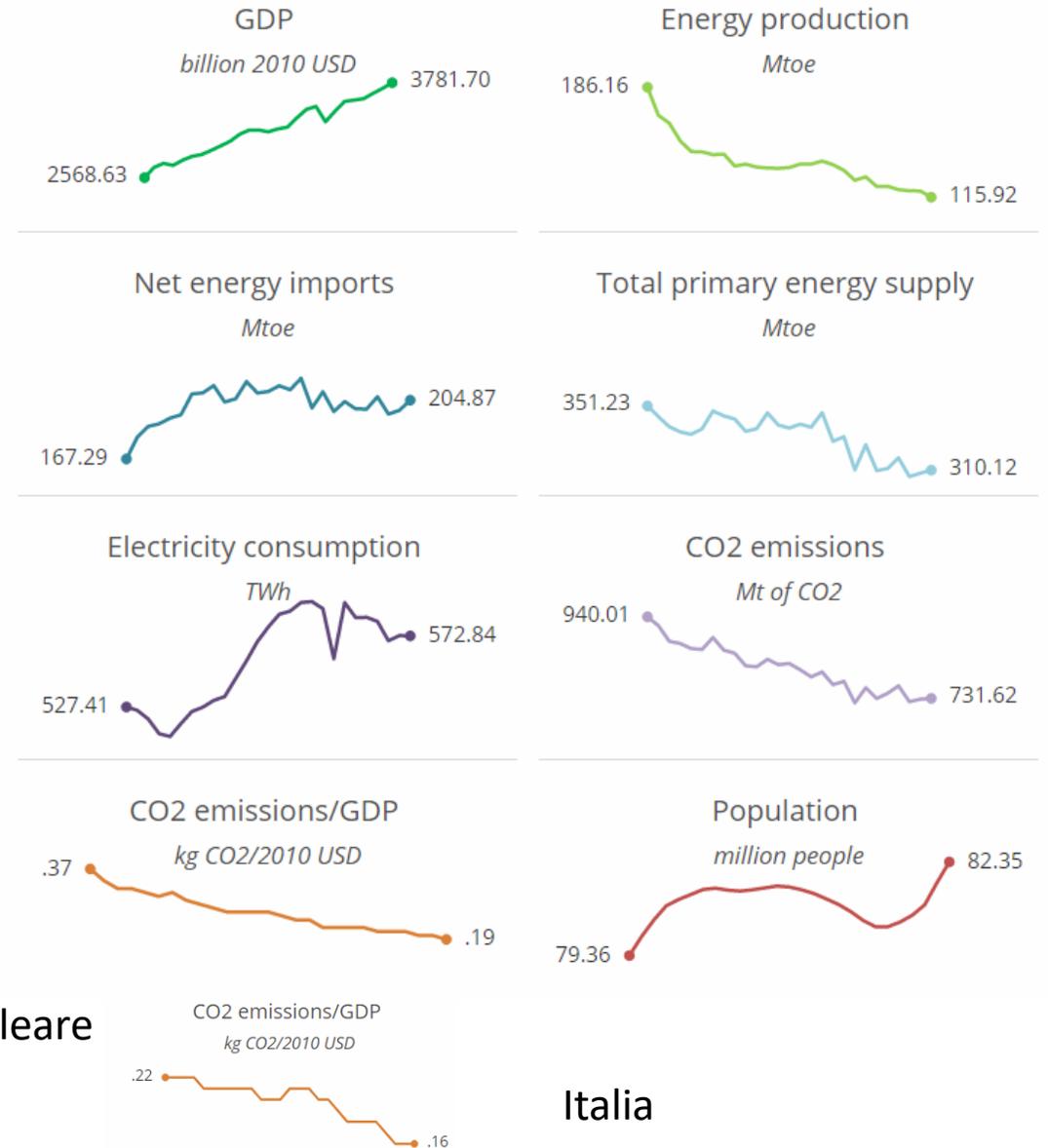
# Conseguenze

<https://www.iea.org/countries/germany/>

Following the Fukushima Daiichi nuclear accident in March 2011, Germany decided to **accelerate the phase-out of nuclear power by 2022** starting with the immediate closure of the eight oldest plants. This decision resulted in the adoption of a suite of new policy measures and determined renewable energy as the cornerstone of future energy supply, a set of policy instruments commonly known as the Energiewende.

- Disaccoppiamento emissioni/PIL  
Riduzione del ricorso a fonte nucleare

## Key stats for Germany, 1990-2016



<https://www.iaea.org/newscenter/focus/fukushima/status-update>



[Press centre](#)

[TOPICS](#) ▾

[SERVICES](#) ▾

[RESOURCES](#) ▾

[NEWS & EVENTS](#) ▾

[ABOUT US](#) ▾

## Fukushima Daiichi Status Updates

13 March 2020

On 13 March 2020, Japan provided the IAEA with a copy of a [report](#) on the summary of decommissioning and contaminated water management, the discharge record and seawater monitoring results with regard to groundwater pumped from the subdrain and groundwater drain systems, as well as, bypassing groundwater pumped at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station during December 2019, which the Ministry of Foreign Affairs has sent to all international Missions in Japan.

The report contains information on decommissioning and contaminated water management, discharges from the subdrain and groundwater drain systems, as well as on groundwater bypassing conducted during the month of December. In all cases, in advance of the action, TEPCO analyzes the quality of the groundwater to be discharged and announces the results. These results confirm that the radiation level of sampled water are substantially below the operational targets set by TEPCO.

**Italia, i costi nascosti del nucleare - 30 anni di referendum e scorie** (link con vari dossier)

<https://www.corriere.it/extra-per-voi/2016/04/18/italia-costi-nascosti-nucleare-30-anni-referendum-scorie-eacbb6be-055f-11e6-9d1f-916c0ba5b897.shtml>

Tra le «ricadute» del disastro di Chernobyl nel nostro Paese va annoverato anche il risultato delle consultazioni popolari che nel novembre 1987 e nel giugno 2011 fermarono le centrali della penisola. Oggi resta il problema dello smaltimento e smantellamento dei siti

**L'8 e 9 novembre 1987** l'Italia ha detto no all'uso dell'energia atomica con il primo, storico referendum sul tema. Il Paese patria di Enrico Fermi (nella foto sotto), il primo a innescare, nel 1942 a Chicago, una reazione nucleare a catena controllata, utilizzando uranio naturale all'interno di un blocco di grafite pura che rallentava i neutroni. La maggioranza dei cittadini che andò alle urne votò per il «sì», abrogando una serie di norme e orientando le successive scelte in ambito energetico in direzione contraria all'uso del nucleare. Il cosiddetto «referendum sul nucleare» non fu però, e non poteva esserlo, un voto sul «nucleare sì, nucleare no». I 3 quesiti riguardavano normative relative alla localizzazione degli impianti, l'abrogazione delle compensazioni agli enti locali che ospitavano centrali (anche a carbone) e il divieto all'Enel, allora azienda di Stato, di partecipare a progetti nucleari, anche all'estero. Il quorum per tutti e tre i quesiti fu largamente raggiunto e i «sì» furono nei tre casi superiori al 70%. In quell'occasione gli italiani furono chiamati a esprimersi anche su responsabilità civile dei giudici e commissione inquirente. Per la prima volta i «sì» vinsero in tutti e cinque i casi.

**L'effetto di Chernobyl sul primo referendum:** Occorre ricordare che erano gli anni della corsa agli armamenti e che l'anno precedente si era verificato il disastro di Chernobyl (all'1.45 del 26 aprile 1986). Secondo il rapporto 2006 del «Chernobyl Forum» dell'Onu — l'unico mai pubblicato — meno di 50 furono i morti legati all'incidente e ben 4 mila i casi di decessi per cancro alla tiroide (sviluppato soprattutto nei bambini) «collegabili» all'incidente. Un disastro che, per la prima volta, fece prendere coscienza di come un giorno il genere umano sarebbe potuto incorrere nella autodistruzione. Con un secondo referendum, il 12 e 13 giugno 2011, si chiuse definitivamente la porta al nucleare, abrogando nuove norme che consentivano la ripresa di una strategia energetica basata anche sull'energia atomica.

**Le verità negate sui numeri:** Il voluminoso rapporto di oltre 600 pagine «Chernobyl's legacy: Health, environmental and socio-economic impacts» è stato realizzato da otto agenzie delle Nazioni Unite assieme ai governi di Russia, Bielorussia e Ucraina, riuniti nel «Chernobyl Forum». Lo scopo è chiarire una volta per tutte gli effetti di Chernobyl a vent'anni dal disastro nucleare. Il rapporto fa scalpore, soprattutto tra quanti da due decenni lavoravano nelle zone contaminate a fianco delle vittime dell'incidente che sprigionò 50 tonnellate di materiale radioattivo pari a 200 volte la bomba di Hiroshima, liberando nell'atmosfera una nube tossica mai vista prima nella storia dell'umanità. I dati però vengono contestati e in molti parlano di «verità negate». Come riferito da Greenpeace nel 2011, ad esempio, le autorità ucraine hanno stimato che un totale di 5 milioni di persone abbiano sofferto per la catastrofe nucleare e che una buona parte di loro viva ancora nelle regioni contaminate. Le conseguenze della contaminazione radioattiva — tra malattie al sistema immunitario, cardiache, cancro — spiega l'organizzazione «potrebbero causare ancora tra i 100mila e i 400mila morti nelle tre ex repubbliche sovietiche».

**2009, la mappa italiana delle possibili centrali:** Nonostante l'esito delle due consultazioni referendarie, ad oggi in Italia esistono ancora sette siti nucleari, ex centrali elettriche e siti di stoccaggio. Nel 1987 erano presenti 4 centrali nucleari: Trino Vercellese (Vercelli), Caorso (Piacenza), Latina e Garigliano (Caserta). A queste va aggiunto Montalto di Castro (Viterbo), dove era in costruzione un quinto impianto. Il referendum, come detto, bloccò i lavori e portò alla chiusura dei siti funzionanti. Il nucleare, però, non ha mai smesso di essere uno dei temi di interesse (e anche una preoccupazione) dei governi. Basti pensare che nel febbraio del 2009 il nostro Paese firmò un accordo con il governo francese per realizzare quattro reattori di tecnologia EPR (centrali di «terza generazione») da 1.600 megawatt ciascuno. L'intesa tra Silvio Berlusconi e Nicholas Sarkozy prevedeva la cooperazione sulla produzione di energia con l'atomo. Lo scopo dichiarato di questa politica era tagliare le emissioni di gas serra, ridurre la dipendenza energetica dall'estero e abbassare il costo dell'energia elettrica all'utente finale.

**La ripresa del dibattito e l'addio ufficiale al nucleare:** L'Italia dei Valori il 9 aprile 2010 presenta una proposta di referendum sul nuovo programma elettronucleare italiano. A inizio marzo 2011, viene proposta come data per lo svolgimento del **referendum il 12 giugno e 13 giugno 2011**, nell'ambito dei Referendum abrogativi del 2011. A seguito dell'incidente di Fukushima Daiichi dell'11 marzo 2011, il Consiglio dei ministri stabilisce una moratoria di 12 mesi del programma nucleare italiano. La moratoria non riguarda l'Agenzia per la sicurezza nucleare, né il deposito di scorie. La consultazione viene però confermata: il quesito — in parte modificato rispetto alle intenzioni iniziali — dà mandato al governo, pur annullando la costruzione delle nuove centrali, di attuare successivamente il programma di energia nucleare in base alle risultanze di una verifica condotta sia dall'agenzia italiana che dall'Unione europea sulla sicurezza degli impianti. L'esito vede il raggiungimento del quorum con il 54% di votanti e una maggioranza di oltre il 94%. Mettendo un punto definitivo al nuovo programma nucleare.

**L'onda lunga di Fukushima:** Sono trascorsi cinque anni da quell'11 marzo del 2011, quando tre catastrofi, di cui due naturali, cancellarono 400 chilometri di coste giapponesi. Il bilancio fu di quasi 16.000 morti, 2.572 dispersi e 160mila evacuati, con oltre 127mila edifici distrutti. Il secondo più grave disastro nucleare dopo Chernobyl. Con una differenza sostanziale: se l'impatto del disastro in Ucraina fu quanto meno circoscritto dopo l'esplosione a cielo aperto, l'emergenza a Fukushima (nella foto sotto, Ap) non si può ancora definire conclusa. Tra reticenze e ritardi nelle bonifiche, il Giappone — che dell'atomo sicuro aveva fatto un credo — si trova oggi a vivere tra città abbandonate e radiazioni ben al di sopra dei limiti consentiti. Il governo di Tokyo ha speso finora 135 miliardi di euro per bonificare le città della prefettura di Fukushima abbassando il livello delle radiazioni, ma l'incubo non è finito. Come spiega il rapporto di Greenpeace Giappone «Radiation reloaded» gli elementi radioattivi sono stati assorbiti dalle piante, dalle foreste, da fiumi ed estuari. I pesci d'acqua dolce che rivestono un ruolo di primo piano nel commercio nipponico, presentano altissimi livelli di cesio. Numeri alla mano «già oltre 9 milioni di metri cubi di scorie nucleari sono sparsi su almeno 113mila siti nella Prefettura di Fukushima». Per smaltire gli effetti del disastro — scrive l'organizzazione — occorreranno secoli.

**Lo smaltimento: la mappa dei siti mancati Rifiuti pericolosi: l'elenco stilato dall'Ispra:** Seguita nel febbraio 2010 dall'approvazione di un decreto ministeriale sui criteri di localizzazione, costruzione ed esercizio del Deposito Nazionale dei rifiuti radioattivi (decreto legislativo 15 febbraio 2010, n. 31). Formalmente ancora non è possibile stabilire la localizzazione degli impianti (manca l'Agenzia per la sicurezza nucleare che per legge dovrebbe indicare le caratteristiche territoriali dei siti idonei), ma conosciamo l'elenco delle 50 aree potenzialmente idonee a localizzare una centrale nucleare. Secondo l'elenco reso noto da Legambiente (sfiora l'icona blu), i siti sono dislocati in ben 15 regioni italiane: 7 sono in Puglia, 6 in Toscana, 5 in Sardegna e Sicilia, 4 in Calabria, Lombardia e Veneto, 3 in Emilia Romagna, Lazio, Friuli Venezia Giulia, 2 in Campania, 1 in Basilicata, Molise, Piemonte e Umbria.

Secondo l'ultimo inventario dei rifiuti radioattivi compilato da Ispra (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), *in Italia al momento sarebbero stoccati nei vari depositi temporanei circa 28mila metri cubi di rifiuti radioattivi, di cui oltre 1500 di terza categoria, cioè ad alta attività, con tempo di decadimento di migliaia di anni.* Anche se la produzione massiccia di rifiuti è cessata con lo spegnimento delle centrali nucleari e degli impianti di lavorazione del combustibile nucleare, la quantità è andata comunque aumentando di qualche centinaio di metri cubi ogni anno, passando dai 23mila del 1994 ai 27mila del 2007.

**Le scorie «prodotte» dagli impianti spenti:** Ciò è dovuto all'impiego di materie radioattive nell'industria, nella ricerca e nelle attività mediche e diagnostiche, ma anche alle operazioni necessarie al mantenimento in sicurezza degli impianti nucleari e alle azioni di decommissioning: l'ultima fase del ciclo di vita di un sito. Questa attività comprende le operazioni di mantenimento in sicurezza degli impianti, allontanamento del combustibile nucleare esaurito, decontaminazione e smantellamento delle installazioni nucleari e gestione e messa in sicurezza dei rifiuti radioattivi, in attesa del loro trasferimento al «Deposito Nazionale». Che ancora non desiste. Solo con lo smantellamento definitivo dei vecchi impianti la produzione di rifiuti radioattivi nel nostro Paese finirà del tutto, ma rimarrà comunque il problema del trattamento e gestione dei rifiuti accumulati. Oggi i rifiuti radioattivi in Italia sono distribuiti in 23 depositi.

**Caccia al Deposito Nazionale:** La maggior parte degli Stati ha già realizzato o localizzato il proprio «Deposito Nazionale» mentre altri – come l’Italia – si stanno muovendo ora in questa direzione, anche sulla base di quanto previsto dalla normativa europea. L’iter è già cominciato, l’obiettivo è di giungere alla costruzione di questa struttura nel giro di alcuni anni, in modo da dare così una soluzione definitiva al problema dello smaltimento di questi rifiuti, oggi sparsi in decine di depositi temporanei. Prima, però, bisognerà individuare l’area geograficamente e geologicamente giusta per un’opera del genere e – soprattutto – trovare un punto d’incontro e di mediazione con le popolazioni che quel luogo lo abitano. Nel deposito italiano saranno smaltiti definitivamente 75.000 metri cubi di rifiuti radioattivi a bassa e media attività, ai quali servono 300 anni per perdere la radioattività e decadere. In via provvisoria – finché non sarà individuato e realizzato un deposito geologico europeo – vi saranno anche custoditi 15.000 metri cubi di rifiuti ad alta attività, quelli che per decadere impiegano invece centinaia di migliaia di anni. Così duraturi, quest’ultimi, da dover essere isolati in un deposito in profondità di tipo geologico. Nascerà poi anche un parco tecnologico per la ricerca, formato da un centro studi, un laboratorio ambientale e una scuola di formazione (nella foto sotto alcuni militanti di Greenpeace espongono copie di barili di scorie tossiche, in segno di protesta contro i rischi delle centrali).

**Il caso dei costi di smantellamento tra Trino e Caorso:** A partire dal 1999, la gestione e lo smantellamento delle centrali italiane è stata affidata alla Società Gestione Impianti Nucleari, che si occupa anche dello smaltimento delle scorie radioattive grazie a un accordo con la francese Areva. La Sogin si occupa dello smaltimento della centrale nucleare «Enrico Fermi» di Trino (nella foto sotto) dove è in corso la rimozione dei materiali radioattivi. Il termine delle operazioni è previsto tra il 2026 e il 2030. L’operazione, oltre alla demolizione fisica dell’impianto, prevede anche lo smaltimento di 2mila tonnellate di rifiuti radioattivi (circa 47 barre) e la bonifica dell’area. Per effettuare tutte queste operazioni, serviranno 234 milioni di euro che riporteranno l’area allo stesso stato in cui si trovava nel 1961, quando fu dato il via ai lavori di costruzione di questa centrale da 260 Megawatt entrata in funzione nel 1964 e chiusa nel 1987 sull’onda della paura provocata da Chernobyl.

**Addio al reattore «Arturo» di Caorso:** Oasi naturalistica a ridosso del Po o centro direzionale e produttivo? Con il decreto con il quale il ministero allo Sviluppo economico ha dato il via libera nel 2014 alla dismissione e alla decontaminazione del reattore «Arturo» e della centrale nucleare di Caorso — comune del Piacentino —, la Provincia e la Regione cominciano a formulare anche le ipotesi di riconversione. Finora sono state smantellate, decontaminate e allontanate dal sito circa 9.400 tonnellate di sistemi e componenti metallici, il 62% del metallo. Come si fosse smontata pezzo per pezzo l’intera Torre Eiffel.

**Trecento miliardi degli anni ’70:** La centrale di Caorso, la più grande d’Italia, era stata realizzata dall’Enel tra il 1970 e il 1977. I lavori erano stati affidati al Consorzio di imprese Getsco-Anm (Ansaldo Meccanica Nucleare). Il costo complessivo dell’opera, negli anni Settanta, era stato di 300 miliardi di vecchie lire. Il primo gennaio 1981 la data fatidica in cui l’impianto ha iniziato a funzionare. Il periodo di esercizio è proseguito fino al 1986, quando è stato fermato per la periodica ricarica del combustibile. Poi dal 1987, a seguito dell’esito del referendum sul nucleare, il sito non è più stato riavviato (nella foto, Ansa, la catena umana realizzata dai cittadini nel 1987 contro la centrale).

**L’energia in Italia tra fabbisogno e sprechi:** L’importazione non è sempre proporzionale alla richiesta: il fabbisogno energetico italiano viene sostenuto da corrente prodotta all’estero per un’aliquota che può oscillare tra meno del 10% in fase diurna fino a punte massime del 25% durante la notte. Tale importazione avviene da quasi tutti i paesi confinanti, anche se le quote maggiori sono quella proveniente dalla Svizzera e dalla Francia. Parte di questa energia (in particolare quasi il 37% di quella svizzera e l’87% di quella francese) viene prodotta con centrali nucleari. Una conseguenza, questa, del mancato passaggio del referendum del 1987, in cui l’Italia scelse il «no» al nucleare.



[Home](#) / [Information Library](#) / [Country Profiles](#) / [Countries O-S](#) / [Slovenia](#)

## Nuclear Power in Slovenia

*(Updated September 2017)*

- **Slovenia has shared a nuclear power reactor with Croatia since 1981.**
- **It has further capacity under consideration.**

Slovenia in 2015 produced 15.1 TWh of electricity, 5.7 TWh (37%) of which was from nuclear, 4.8 TWh (32%) from fossil fuels (mostly lignite), and 4 TWh (27%) from hydro. Final consumption in 2015 came to 12.8 TWh, about 6200 kWh per capita. Both imports and exports were significant at about 9 TWh each; imports were mainly from Austria (4.7 TWh) and Croatia (4.2 TWh); 6.3 TWh was exported to Italy and 2.7 TWh to Croatia. At the end of 2015, net installed electricity generating capacity was 3.4 GWe<sup>a</sup>.

Neighbouring Croatia produced 11.4 TWh in 2015 and consumed 15.3 TWh<sup>a</sup>. Nearly 20% of its electricity consumption comes from the jointly-owned Krsko nuclear plant in Slovenia. It has in the past considered building a new nuclear plant of its own in eastern Slavonia near the Serbian border with a capacity of up to 1600 MWe.

## Nuclear facilities

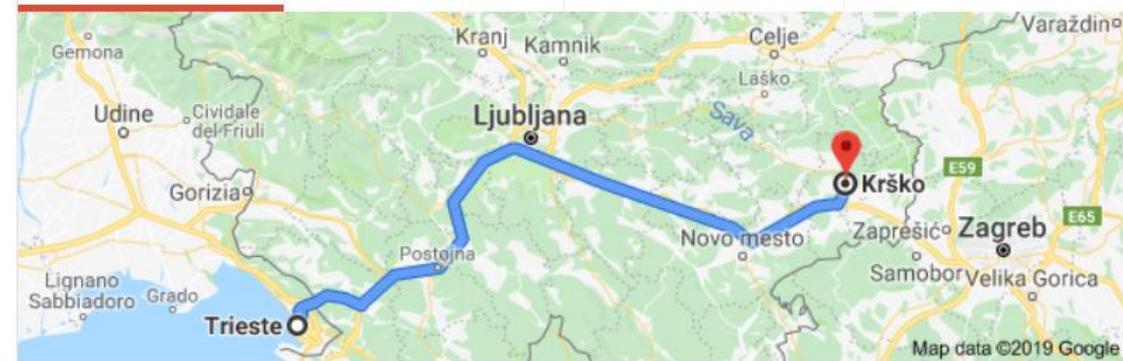
Slovenia has a 696 MWe Westinghouse nuclear reactor in operation, Krsko 1, which is jointly owned by Croatia. This pressurized water reactor was the first western nuclear power plant in eastern Europe. Construction started in 1975 and the unit was connected to the grid in 1981, entering commercial operation in 1983. In 2001 its steam generators were replaced and the plant was updated 6% then, and 3% subsequently. Its operational lifetime was designed to be 40 years, but a 20-year extension was confirmed in mid-2015, subject to inspections in 2023 and 2033.

It is owned and operated by [GEN Energija](#), which incorporates the Slovenian stake in [Nuklearna Elektrarna Krško](#) (NEK), a joint Slovene-Croat company operating Krsko.

### Nuclear reactors operating or planned in Slovenia

Reactor	Type	MWe net	First power	Expected close
Krsko 1	Westinghouse PWR	696	1981	2043
Total (1)		<b>696</b>		
Krsko 2	?	1100-1600 MWe	?	

A further Krsko unit of 1100 to 1600 MWe is under consideration. An application towards a second reactor at the Krsko nuclear power plant was submitted to the country's ministry of economy by GEN Energija in January 2010. Parliament was expected to decide on this in 2011, and the project – referred to as JEK 2 – remains an objective. The cost is estimated at up to €5 billion, and it would be fully owned by Slovenia.



1 h 57 min (185.9 km) via A1 and A2/E70



Directions

## Waste management

Operational low- and intermediate-level waste is stored at Krsko, as is used fuel.

In February 2017 Holtec was confirmed as contractor for establishing a dry cask storage facility for used fuel at Krsko.

The 1996 strategy for long-term management of used fuel recommends direct disposal of it, but leaves open the possibility of a later decision to reprocess it. In mid-2015 the intergovernmental commission responsible for the plant agreed to construct a dry storage facility for used fuel. The commission has requested a plan for the disposal of used fuel and decommissioning the plant, and in 2015 said that until this program is developed and approved by both the Slovenian and Croatian governments, payments made by the two countries into a decommissioning fund will remain at the current level. Each country is responsible for half of the waste.

A permanent repository for low- and intermediate-level waste is planned at Vrbina, in Slovenia near the Krsko plant. Site selection was undertaken over five years, and compensation of €5 million per year will be paid to the local community. The repository will consist of two silos holding 9400 m<sup>3</sup> of material, enough for Slovenia's share of Krsko arisings plus other Slovenian radioactive waste. In mid-2014, Slovenia allocated €157 million for the project, which will be built from 2017 and is due to open in 2020. Croatia may participate, or will build its own repository.

## Research and development

Slovenia has a 250 kW Triga research reactor operating since 1966 at the [Josef Stefan Institute](#), which is a major research establishment. It also operates a nuclear training centre.

