

# Università degli studi di Padova

## Facoltà di Ingegneria

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI

*Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Gestionale*

TESI DI LAUREA

*“Energia nucleare: impieghi, radioattività e  
funzionamento del reattore”*

Relatori: Ch.mo Prof. MOZZON MIRTO  
Ch.mo Prof. MICHELIN RINO

Laureando: CONFENTE GABRIELE

Anno accademico 2011 - 2012



# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>9</b>
<b>1. Concetti di base</b>	<b>11</b>
1.1. Fisica atomica e nucleare	11
1.1.1. Il neutrone	12
1.1.1.1. La scoperta del neutrone	12
1.1.1.2. Caratteristiche del neutrone	12
1.1.2. Fissione nucleare	13
1.1.3. Fusione nucleare	15
1.2. Il ciclo del combustibile nucleare	16
1.2.1. L'uranio	17
1.2.1.1. Arricchimento e ritrattamento	18
1.2.2. Il torio	19
<b>2. La radioattività</b>	<b>21</b>
2.1. La scoperta della radioattività	21
2.2. Il decadimento radioattivo	22
2.2.1. Decadimento alfa	23
2.2.2. Decadimento beta	23
2.2.3. Decadimento gamma	24
2.2.4. Serie radioattive	25
2.3. Effetti delle radiazioni	26
2.3.1. Dosimetria e radioprotezione	27
2.4. Rifiuti nucleari	27
2.4.1. Classificazione internazionale e italiana	29
<b>3. Applicazioni delle reazioni nucleari</b>	<b>31</b>
3.1. Impieghi della radioattività	31
3.1.1. Radioterapia	31

3.1.1.1.Boroterapia con neutroni	32
3.1.2.Radiodiagnostica	32
3.1.2.1.Radiografia	33
3.1.2.2.Tomografia Assiale Computerizzata (TAC)	33
3.1.2.3.Tomografia Computerizzata (TC)	34
3.1.2.4.Scintigrafia	34
3.1.2.5.Angiografia	34
3.1.2.6.Mammografia	35
3.1.2.7.Mineralometria Ossea Computerizzata (MOC)	35
3.1.2.8.Teleradiografia	35
3.1.2.9.Radioscopia	35
3.1.2.10.Risonanza Magnetica Nucleare (RMN)	36
3.1.2.11.Tomografia a Emissione di Positroni (PET)	36
3.1.2.12.Tomografia Computerizzata a Emissione Singola di Fotoni (SPECT)	37
3.1.3.Applicazioni industriali	37
3.1.4.Applicazioni nel campo della sterilizzazione	38
3.1.5.Applicazioni biologiche e agroalimentari	38
3.1.6.Applicazioni ambientali	39
3.1.7.Applicazioni in archeologia e antropologia	39
3.1.8.Applicazioni in geologia e prospezione mineraria	40
3.1.9.Applicazioni nel campo della sicurezza	40
3.1.10.Applicazioni nel campo della ricerca	40
3.2.Impieghi dei reattori nucleari	40
3.2.1.Applicazioni marine	41
3.2.2.Applicazioni non elettriche	41
3.2.2.1.Ricerca	41
3.2.2.2.Cogenerazione	42
3.2.2.3.Desalinizzazione	42
3.2.2.4.Produzione di idrogeno	42
3.3.Impieghi dell'energia nucleare	43

3.3.1.Applicazioni spaziali	43
3.3.1.1.Generatori termoelettrici a radioisotopi (RTG)	43
3.3.1.2.Reattori nucleari spaziali	44
3.3.2.Applicazioni militari	44
3.3.2.1.Armi a fissione nucleare: la bomba atomica	44
3.3.2.2.Armi a fusione nucleare: la bomba a idrogeno	47
<b>4.Sistemi per la produzione elettrica</b>	<b>49</b>
4.1.Reattori nucleari a fissione	49
4.2.Reattori di potenza	50
4.2.1.Generazioni di reattori nucleari	52
4.2.2.Filiere di reattori nucleari	52
4.2.2.1.Reattori ad acqua leggera (LWR)	53
4.2.2.2.Reattori ad acqua pesante (HWR)	54
4.2.2.3.Reattori a gas (GCR)	54
4.2.2.4.Reattori avanzati a gas (AGR)	55
4.2.2.5.Reattori a gas ad alta temperatura (HTGR)	56
4.2.2.6.Reattori di progetto russo (RBMK, VVER)	56
4.3.Reattori di ricerca	57
4.4.reattori convertitori e autofertilizzanti	58
4.5.Reattori nucleari a fusione	59
<b>5.Sicurezza nucleare</b>	<b>61</b>
5.1.Obiettivi ed elementi di sicurezza nucleare	61
5.2.Decomissioning	62
5.2.1.Stadi del decomissioning	63
5.2.2.Strategie di decomissioning	63
5.2.2.1.Smantellamento immediato (DECON)	63
5.2.2.2.Custodia protettiva passiva (SAFESTOR)	64
5.2.2.3.Incapsulamento (ENTOMB)	64
5.3.Incidenti nucleari	65

5.3.1.Stati Uniti: Three Mile Island	65
5.3.1.1.Eventi	65
5.3.1.2.Considerazioni e conseguenze	66
5.3.2.Ucraina: Chernobyl	67
5.3.2.1.Eventi	67
5.3.2.2.Considerazioni e conseguenze	68
5.3.3.Giappone: Fukushima	70
5.3.3.1.Eventi	70
5.3.3.2.Considerazioni e conseguenze	72
<b>6.Costi dell'energia nucleare</b>	<b>73</b>
6.1.Questioni economiche	73
6.2.Analisi dei costi	73
<b>7.La situazione in Italia e nel mondo</b>	<b>77</b>
7.1.La situazione energetica italiana	77
7.2.La situazione nucleare italiana	78
7.2.1.Il referendum del 1987	79
7.2.2.La ripresa del dibattito sul nucleare	79
7.2.3.Il referendum del 2011	80
7.2.4.Le centrali nucleari in Italia	80
7.3.La situazione nucleare nel mondo	82
<b>Bibliografia</b>	<b>85</b>
<b>Sitografia</b>	<b>85</b>





# Introduzione

I fabbisogni crescenti di energia a livello globale e i problemi ambientali, dovuti all'utilizzo indiscriminato di combustibili fossili, rendono necessari l'introduzione e l'utilizzo di fonti alternative di energia. In questo contesto, accanto alle energie rinnovabili, anche l'energia nucleare assume un ruolo di notevole importanza determinato da numerosi progressi tecnologici e applicazioni di rilievo.

Questo elaborato si propone di fornire un'introduzione ai concetti, alle applicazioni, ai sistemi e alla situazione dell'energia nucleare in Italia e nel mondo, passando attraverso l'analisi dei costi, degli incidenti, della sicurezza e della radioattività.

In ingegneria con energia nucleare, detta anche energia atomica, si intendono tutti quei fenomeni in cui si ha produzione di energia in seguito a trasformazioni nei nuclei atomici; tali trasformazioni si dicono reazioni nucleari. L'energia nucleare deriva da profonde modifiche della struttura della materia e insieme alle fonti rinnovabili e fossili è una fonte di energia primaria, ovvero è presente in natura e non deriva dalla trasformazione di altra forma di energia. Ampio è il dibattito intorno all'energia nucleare sul fronte della sicurezza, sul rischio proliferazione, sui costi, sulla indispensabilità di tale fonte energetica in relazione alle altre fonti energetiche e sul problema energetico globale. A livello internazionale l'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (AIEA) delle Nazioni Unite, con sede a Vienna, si occupa di promuovere l'utilizzo pacifico dell'energia nucleare e di impedirne l'utilizzo per scopi militari; ha inoltre funzionalità di sorveglianza e controllo sulla sicurezza degli impianti nucleari esistenti o in fase di progettazione e realizzazione.

Il primo impiego dell'energia nucleare risale al 2 dicembre 1942, durante la seconda guerra mondiale, quando Enrico Fermi mise a punto negli USA la prima pila nucleare funzionante; solo nella seconda metà del secolo scorso si prese l'iniziativa di sfruttare l'energia nucleare a fini civili, per la produzione di energia elettrica.



# CAPITOLO 1

## Concetti di base

### 1.1.Fisica atomica e nucleare

Gli elementi esistenti in natura sono costituiti da atomi, a loro volta formati da un nucleo centrale che ne contiene tutta la massa. Il nucleo è costituito da neutroni e protoni, i quali vengono detti nucleoni e hanno sostanzialmente massa identica. I protoni sono particelle cariche di elettricità positiva, mentre i neutroni sono elettricamente neutri. Attorno al nucleo gravitano gli elettroni dotati di carica negativa e con massa trascurabile rispetto al nucleo. Si definisce nuclide una specie atomica caratterizzata da una ben determinata composizione del nucleo. Ogni nuclide è rappresentato dal simbolo dell'elemento accompagnato da due indici posti a destra: uno in alto che indica il numero di massa ( $A$ ), ossia il numero totale di nucleoni nel nucleo, ed uno in basso che rappresenta il numero atomico ( $Z$ ), il quale designa il numero totale di protoni nel nucleo e quindi di elettroni nel caso di atomi neutri. Vale  $A = N + Z$ . Due nuclidi aventi lo stesso  $Z$ , ma diverso  $A$  vengono detti isotopi.

Particella	Simbolo	Massa	Carica elettrica
Elettrone	$e^-$	$9,109 \cdot 10^{-28} \text{ g}$	$-1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Protone	$p^+$	$1,672 \cdot 10^{-24} \text{ g}$	$1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Neutrone	$n$	$1,674 \cdot 10^{-24} \text{ g}$	0

Tabella 1. Caratteristiche delle particelle atomiche.

Le reazioni che coinvolgono l'energia nucleare sono principalmente tre: fissione nucleare, fusione nucleare, decadimento radioattivo. Nelle prime due vi è conversione di massa in energia.

### 1.1.1 Il neutrone

#### *1.1.1.1. La scoperta del neutrone*

Nel 1930, nel corso di alcune ricerche sulle reazioni nucleari, Bothe e Becker trovarono che il Berillio colpito da particelle alfa dava luogo ad una radiazione molto penetrante. Escluso che si trattasse di particelle cariche alfa o beta la loro conclusione fu di trovarsi di fronte a raggi gamma, ipotesi sbagliata se si esaminava la traiettoria alla camera di Wilson.

Partendo da questi presupposti Chadwick immaginò che la radiazione penetrante fosse costituita da una nuova particella materiale dotata di massa e priva di carica elettrica, per giustificarne il potere penetrante: così l'identikit del neutrone.

#### *1.1.1.2. Caratteristiche del neutrone*

Oltre ad una funzione fondamentale nei processi di fissione, il neutrone rappresenta un proiettile ideale per le reazioni nucleari grazie all'assenza di carica elettrica.

I neutroni si possono estrarre a fasci di grandissima intensità direttamente dai reattori nucleari oppure si possono ottenere come prodotto di reazioni nucleari che vengono effettuate mediante particelle alfa; la sorgente più comune è il radioberillio.

Per quanto riguarda la rivelazione dei neutroni, essa non può essere effettuata con il metodo tradizionale alla camera di Wilson (scatola a tenuta ermetica che contiene aria satura di vapore acqueo collegata, mediante un condotto, ad un cilindro entro il quale scorre un pistone), poiché la mancanza di carica elettrica non consente il formarsi delle tracce ionizzate e quindi non è possibile determinare la natura del neutrone. Si hanno perciò essenzialmente

due metodi indiretti di rivelazione, uno basato sull'urto e uno sulla disintegrazione, nei quali il neutrone provoca la ionizzazione di altre particelle.

I neutroni inoltre, mancando di carica elettrica, non possono essere accelerati a volontà. Occorre quindi prendere neutroni di energia superiore al richiesto e rallentarli secondo le esigenze, con metodi di moderazione sfruttando degli opportuni schermi i cui nuclei vengono urtati dai neutroni che cedono loro energia secondo le leggi dell'urto elastico; quando la velocità o energia del neutrone diventa pari a quella dell'ambiente che lo circonda il neutrone viene detto termico.

Sempre per la mancanza di carica elettrica, i neutroni possono giungere indisturbati anche dentro il nucleo degli elementi più pesanti senza risentire della barriera elettrostatica. Quando questo si verifica i neutroni trasformano il nucleo in un isotopo generalmente radioattivo.

Infine un ultimo elemento molto importante nelle reazioni nucleari è la sezione d'urto definita come la probabilità che si verifichi una determinata reazione.

### 1.1.2.Fissione nucleare

Dal 1934 al 1939, prima Fermi e successivamente Hahn e Strassmann, constatarono dopo numerosi esperimenti che l'uranio colpito da un neutrone lento si spaccava in due frazioni di numero atomico circa uguale. Il fenomeno prese il nome di fissione, la quale può quindi essere definita come un particolare tipo di reazione nucleare che avviene solo su nuclei pesanti (con alto numero atomico), causata da un neutrone o da un quanto gamma che provocano la separazione del nucleo stesso in due frammenti principali aventi numero atomico minore più alcune particelle, generalmente neutroni, con liberazione di una certa quantità di energia; la somma delle masse dei due frammenti e dei neutroni emessi è leggermente minore di quella originaria, infatti la massa mancante si è trasformata in energia per la legge di conservazione.

In generale per produrre la fissione è necessaria una certa energia di attivazione che serve a raggiungere la configurazione critica al di là della quale si ha la

formazione di frammenti e l'efficacia nell'impiego dei neutroni dipende dal valore assunto dalla sezione d'urto e dalla velocità del neutrone incidente: solitamente a basse velocità vi è un aumento della sezione d'urto e di conseguenza una maggiore probabilità di fissione.

A lato (fig. 1) è rappresentato un esempio di schema di fissione.

Nella prima fase un nucleo di U-235 viene bombardato da un neutrone e avviene la fissione che spezza il nucleo in due atomi e libera tre neutroni e dell'energia.

Nel secondo passaggio uno di questi neutroni è assorbito da un altro nucleo di U-238 ed è perso nel bilancio; un secondo neutrone può fuggire dal sistema o essere assorbito da un elemento che non continua la reazione; il terzo neutrone viene assorbito da un nucleo di U-235 che si spezza in altri due atomi liberando così due neutroni e dell'energia.

Nella terza ed ultima fase i due neutroni liberati si scontrano con due nuclei di U-235 ed ognuno di questi nuclei libera altri neutroni che servono per continuare la reazione.

Dunque un elemento di particolare importanza della fissione sta nel fatto che essa dà origine alla rigenerazione di neutroni in grado di provocare altre fissioni: si ha cioè quella che si definisce reazione a catena. In questo contesto è utile definire il fattore di moltiplicazione effettivo  $K$  come il rapporto tra i neutroni presenti in una generazione e i neutroni della generazione precedente: se  $K > 1$  (sistema divergente) si ha una reazione a catena in cui il numero di

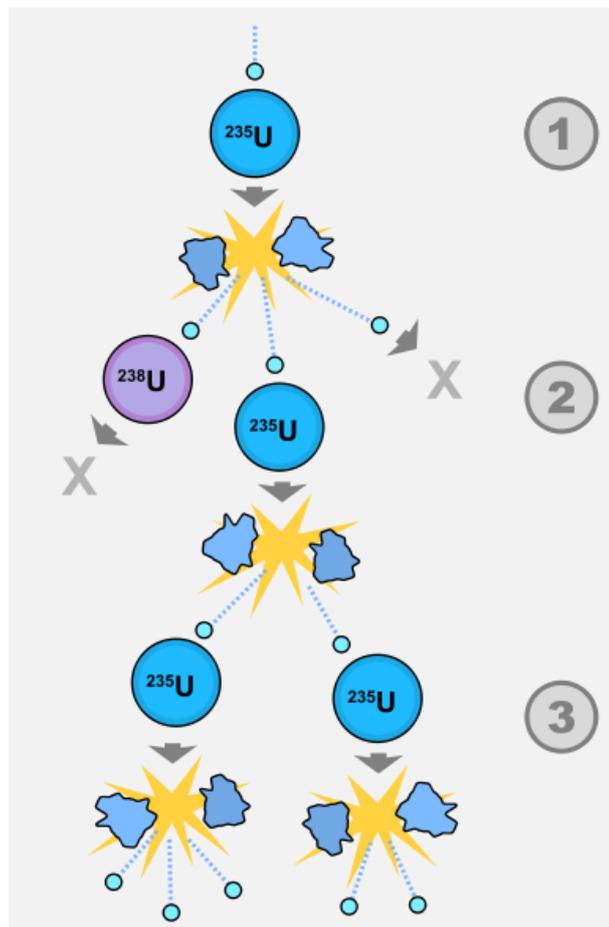


Figura 1. Schema di fissione nucleare.

fissioni aumenta esponenzialmente, se  $K < 1$  (sistema convergente) il numero di neutroni assorbiti scende e la reazione è destinata a spegnersi e infine se  $K = 1$  (sistema critico) si ottiene una reazione stabile in grado di autoalimentarsi dove il numero dei neutroni presenti nel sistema non varia.

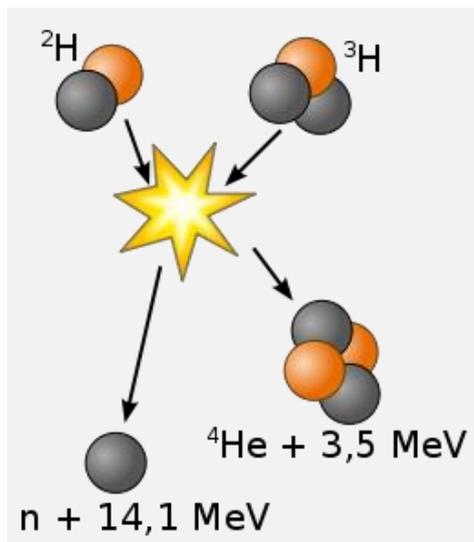
I nuclei che possono dare origine al processo di fissione vengono chiamati fissili. I principali isotopi fissili, ossia fissionabili ad opera di neutroni, sono U-233, U-235, Pu-239, Pu-241, mentre gli isotopi fertili, i quali subiscono fissione solo per opera di neutroni veloci, sono U-238 e Th-232.

### 1.1.3. Fusione nucleare

Un procedimento per ottenere energia dall'atomo è la fusione nucleare. Essa è esattamente l'opposto della fissione, infatti nel processo di fusione i nuclei di due o più atomi leggeri (ossia con basso numero atomico come ad esempio il deuterio D-2 e il trizio T-3, entrambi isotopi dell'idrogeno H-1) si fondono dando origine a nuclei più pesanti; in questo tipo di reazione il nuovo nucleo costituito ed il neutrone liberato hanno una massa totale minore della somma delle masse dei nuclei reagenti, con conseguente liberazione di un'elevata quantità di energia, principalmente cinetica, la quale a parità di peso è molto superiore all'energia liberata dalla fissione. Dal momento che i nuclei possiedono carica positiva, si respingono tra loro, perciò affinché la fusione avvenga è necessario farli avvicinare ad elevata velocità per vincere la forza di repulsione coulombiana e fare in modo che fondano tra di loro: più le temperature sono alte (centinaia di milioni di gradi), maggiore è la velocità dei nuclei e dunque la probabilità di superare la repulsione.

La fusione nucleare, nei processi terrestri, è utilizzata in forma incontrollata per le bombe ad idrogeno e in forma controllata nei reattori a fusione termonucleare, ancora in fase di sperimentazione.

Molte reazioni di fusione sono possibili nel sole e nelle stelle e solo alcune possono essere impiegate per la produzione di energia elettrica sulla terra.



Il processo più studiato per scopi pacifici è la reazione deuterio-trizio (fig. 2) che può avvenire alle temperature più basse e quindi è più facilmente riproducibile in laboratorio, grazie anche alle maggiori sezioni d'urto. Lo schema rappresenta una combinazione di un nucleo di D-2 con uno di T-3 i cui prodotti sono He-4, un neutrone libero e dell'energia sviluppata.

Figura 2. Fusione nucleare.

Il risultato del raggiungimento dell'elevatissima temperatura di innesco, per far sì che avvenga la fusione, è la vaporizzazione e la ionizzazione di qualsiasi materiale che assume proprietà molto diverse dai gas ordinari: in queste condizioni la materia è allo stato di plasma, ossia un gas ionizzato contenente tutti gli elettroni che gravitano attorno ai nuclei. L'elevata temperatura permette inoltre di avere un sufficiente rendimento nella reazione.

Un altro problema sul quale stanno studiando ricercatori di tutto il mondo è il confinamento del plasma in una certa regione dello spazio: spesso si ricorre al confinamento magnetico che non è altro che il contenimento del plasma mediante un campo magnetico sfruttando il fatto che le sue particelle essendo cariche risentono dell'influenza dei campi magnetici; si realizza una specie di guaina magnetica che circonda il plasma e ne impedisce la fuoriuscita. Un effetto analogo lo si ha utilizzando la tecnica del confinamento inerziale nella quale il combustibile viene compresso all'ignizione tramite un bombardamento di fotoni o particelle.

## 1.2. Il ciclo del combustibile nucleare

Con il termine ciclo del combustibile si intendono l'insieme di tutte le trasformazioni del materiale combustibile prima, durante e dopo l'impiego all'interno del reattore.

E' costituito da tre fasi principali:

- preparazione del combustibile fresco: include tutte le fasi per la preparazione degli elementi da utilizzarsi nel reattore dall'estrazione dell'uranio, alla lavorazione e al suo arricchimento;
- sfruttamento del combustibile nel reattore;
- immagazzinamento del combustibile esausto.

L'uranio naturale viene estratto da giacimenti superficiali o sotterranei. Il minerale viene macinato e trasportato in un impianto di conversione, in cui viene trasformato in un gas tossico e aggressivo detto. Nell'impianto di arricchimento si incrementa la percentuale di U-235 e il prodotto arricchito viene mandato ad un impianto di fabbricazione del combustibile, dove il gas tossico viene trasformato in polvere e quindi in pastiglie per le barre di combustibile, le quali dopo essere state assemblate sono pronte all'uso nel reattore. Parte del combustibile deve essere sostituito ogni anno a causa dell'impoverimento dell'uranio e dell'accumulo di prodotti di fissione. Il combustibile usato viene generalmente conservato per circa un mese e mantenuto, per un anno, entro vasche di raffreddamento. Infine le barre vengono trasportate, dentro a contenitori fortemente schermati, in strutture apposite di immagazzinamento a lungo termine o in impianti di riprocessamento chimico dove uranio e plutonio vengono separati dal resto delle scorie e in parte recuperati.

### 1.2.1.L'uranio

L'uranio puro emette particelle alfa e si presenta come un metallo bianco-argenteo molto denso e lievemente radioattivo. L'uranio è una miscela di tre isotopi radioattivi: l'U-238 il più abbondante e stabile che costituisce circa il 99,3% dell'uranio naturale, l'U-235 il più interessante per le applicazioni energetiche e l'unico fissile in natura forma un altro 0,7%, mentre l'U-234 è presente in quantità trascurabili. L'uranio si dice arricchito quando la frazione di U-235 viene artificialmente aumentata dallo 0,7% ad un range di valori che variano dal 3% al 7% a scapito dell'U-238. L'uranio si estrae da due minerali: la

carnotite e l'uranite e le attuali maggiori risorse si trovano in alcune masse cristalline di ben definite zone di Australia, Canada e Sud Africa.

I consumi di uranio previsti per il 2020 sono stimati a circa 80000 tonnellate annue e per rispondere alla domanda di questo minerale da usarsi come combustibile si fa riferimento sia a fonti primarie (miniere), sia a fonti secondarie (smantellamento di testate, combustibile esaurito riciclabile, U-238 opportunamente arricchito, riserve di combustibile civile e materiale fissile militare). Le fonti primarie costituiscono oltre la metà della fornitura di combustibile per le centrali nucleari e oltre il 55% della produzione di uranio proviene dalle miniere di Canada, Australia e Kazakistan.

#### *1.2.1.1. Arricchimento e ritrattamento*

I principali processi per l'arricchimento dell'uranio sono: diffusione gassosa, centrifugazione, separazione aerodinamica, separazione elettromagnetica, ionizzazione selettiva laser.

Il metodo più utilizzato per applicazioni energetiche civili è la diffusione gassosa, nella quale l'uranio estratto dal minerale e trasformato in esafluoruro gassoso viene pompato per stadi attraverso dei setti porosi che permettono di separare l'U-235 dall'U-238. Per pompare il gas sono necessarie grosse quantità di energia elettrica o ogni stadio aumenta la percentuale dell'U-235 di circa un punto percentuale. La centrifugazione e la separazione aerodinamica sono utili per le armi nucleari in quanto ogni stadio aumenta l'U-235 del 40%, la separazione elettromagnetica fu usata per costruire la bomba atomica utilizzata contro il Giappone al termine della seconda guerra mondiale e infine la ionizzazione laser selettiva è una tecnica sofisticata, alla portata di pochi stati, che consiste nel far ionizzare da un laser ad una determinata frequenza solo gli atomi di U-235 che vengono successivamente separati.

Il ritrattamento o riprocessamento è un processo chimico del combustibile esaurito che consente di recuperare l'U-235 e il Pu-239 separandoli dai prodotti di fissione.

### 1.2.2. Il torio

Anche il torio può essere impiegato come combustibile nelle applicazioni energetiche delle reazioni nucleari. Esso è l'elemento radioattivo più abbondante e si trova in piccole quantità nella maggior parte delle rocce e dei suoli. Tale elemento si rinviene inoltre in molti minerali di cui il più comune è la monazite che contiene fino al 12% di ossido di torio. L'unico isotopo naturale del torio è il Th-232 che oltre ad essere fertile è molto stabile e decade lentamente (circa 14 miliardi di anni). Altri isotopi come il Th-230 e il Th-229 sono ottenibili mediante reazioni nucleari.



## CAPITOLO 2

### La radioattività

#### 2.1. La scoperta della radioattività

Nel 1895 Roentgen, sperimentando la scarica dei gas nel vuoto, scoprì un tipo di radiazione ancora sconosciuto che chiamò raggi X. Essi avevano un comportamento molto insolito: si generavano nel punto in cui avveniva la scarica, non erano visibili ad occhio nudo e producevano una fluorescenza verdastra. Subito dopo questa scoperta Henry Becquerel si mise ad approfondire le caratteristiche dei materiali che producevano fluorescenza, in quanto credeva vi fosse un nesso tra questi e i raggi X; le ricerche non approdarono ad alcun risultato positivo, ma diedero a Becquerel la possibilità di scoprire, nel 1896, la radioattività.

Gli esperimenti di Becquerel consistevano nell'esporre alla luce del sole una sostanza fosforescente disposta su un involucro di carta opaco in cui vi era una lastra fotografica destinata a rivelare l'emissione della sostanza, nella fattispecie l'uranio; la lastra risultava impressionata per effetto di una radiazione emessa dal minerale. Quando Becquerel si accorse che la lastra veniva impressionata anche al buio si trovò di fronte ad un fenomeno del tutto nuovo e inatteso: non era la luce solare a provocare questo effetto, bensì l'uranio. Becquerel, dopo ulteriori studi e approfondimenti, giunse a concludere che la radioattività provocava una forte ionizzazione dell'aria, che essa non veniva influenzata dallo stato di aggregazione chimica dei composti e che provocava una trasmutazione degli atomi i quali cambiano la loro natura chimica all'atto dell'emissione. Infine egli poté dimostrare che una parte della radioattività dell'uranio era dovuta ad elettroni emessi ad elevatissima velocità dagli atomi del minerale.

In seguito Rutherford scoprì la radiazione alfa, che produceva una ionizzazione intensa e veniva assorbita da sottili lamine di materia, e la radiazione beta,

meno ionizzante ma più penetrante. Villard più tardi si accorse di una terza ed ultima radiazione detta gamma, molto più penetrante delle precedenti e di natura elettromagnetica come i raggi X, motivo per cui non risentiva dell'effetto dei campi magnetici.

Le ricerche sui materiali radioattivi destarono grande interesse in Marie Curie e suo marito Pierre Curie. Marie analizzò metodicamente tutti gli elementi allora conosciuti per scoprire se ve ne erano altri che potessero dar luogo ad emissione radioattiva e da questi esami risultò che il torio presentava un effetto analogo. Successivamente i due coniugi, saggiando il contenuto di uranio dalla pechblenda, rilevarono che alcuni campioni erano più radioattivi di altri e ciò implicava che nella pechblenda fossero presenti elementi in quantità minime di radioattività molto elevata. Cominciò così la manipolazione e l'analisi spettroscopica di tonnellate di minerale fatte venire dalle miniere della Polonia per cercare di isolare alcuni nuovi elementi. Si scoprirono il bario, il radio, il polonio e l'attinio.

## **2.2.Il decadimento radioattivo**

Il decadimento radioattivo è un insieme di processi attraverso i quali alcuni nuclei atomici instabili o radioattivi detti radionuclidi o radioisotopi, trasmutano, in un certo tempo di decadimento, in nuclei di energia inferiore raggiungendo uno stato di maggiore stabilità con emissione di radiazioni ionizzanti in accordo ai principi di conservazione di massa, energia e quantità di moto. Quando le forze all'interno del nucleo non sono perfettamente bilanciate, il nucleo è instabile; molti dei nuclidi sinora noti sono instabili, ovvero radioattivi. La stabilità di un nuclide dipende dal rapporto tra il numero di protoni ( $Z$ ) e quello dei neutroni ( $N$ ): per numeri atomici bassi (sino a  $Z = 20$ ) i nuclidi stabili presentano un numero di neutroni pari a quello dei protoni, per atomi più pesanti i nuclidi stabili hanno più neutroni che protoni. Le reazioni nucleari di disintegrazione degli nuclei stabili sono chiamate reazioni di decadimento, mentre quelle provocate da agenti esterni si dicono reazioni indotte. La radioattività è descritta e quantificata per mezzo dell'attività di un

campione di una sostanza radioattiva, ossia il numero di disintegrazioni che in essa si producono nell'unità di tempo. L'attività si misura in Becquerel (1 Bq = 1 disintegrazione/secondo) e attraverso il decadimento viene persa gradualmente dalle sostanze radioattive. Inoltre il decadimento si misura con il tempo di dimezzamento o emivita di un radioisotopo, ossia il tempo necessario affinché la metà degli atomi di un isotopo radioattivo decadono.

### 2.2.1. Decadimento alfa

Le particelle alfa sono nuclei di elio privi dei loro elettroni periferici e composti da due protoni e due neutroni; hanno energia cinetica molto alta che comporta bassa velocità e a causa della loro elevata massa risultano poco penetranti. Il decadimento alfa (fig. 3) avviene con l'emissione di una di queste particelle da parte dell'isotopo di un elemento con elevato numero atomico ( $Z > 82$ ). Perdendo due protoni l'elemento indietreggia di due posizioni nella tavola periodica degli elementi, ovvero il numero atomico passa da  $Z$  a  $Z-2$ . Le ragioni di tale fenomeno sono da ricercare nella tendenza di tutti i sistemi fisici a cercare condizioni di energia più stabile.

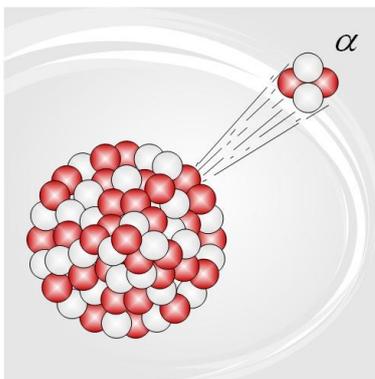


Figura 3. Decadimento alfa.

### 2.2.2. Decadimento beta

I raggi beta sono costituiti da un flusso di elettroni ad alta energia espulsi dal nucleo. Essi possiedono massa piccola, velocità elevata e un grande potere di penetrazione; inoltre l'interazione dei raggi beta con la materia produce l'emissione di raggi X di piccola lunghezza d'onda. Il loro decadimento

può avvenire sostanzialmente in due modi, mediante il decadimento beta meno (fig. 4) o il decadimento beta più: quando un neutrone trasmuta in una coppia protone-elettrone più un antineutrino elettronico (particella priva di carica con massa quasi nulla) si parla di decadimento beta meno; in questo caso il protone rimane nel nucleo atomico e le altre due particelle vengono espulse. Se invece un protone trasmuta in una coppia neutrone-positrone più un neutrino elettronico siamo di fronte ad un decadimento beta più, il quale avviene molto raramente.

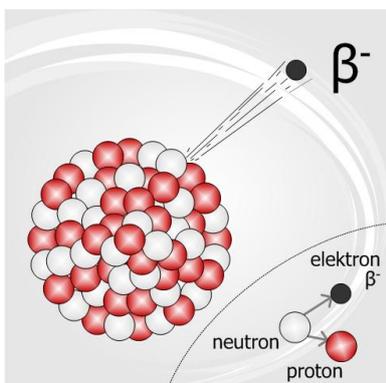


Figura 4. Decadimento beta meno.

### 2.2.3. Decadimento gamma

I raggi gamma sono radiazioni elettromagnetiche che accompagnano in alcuni casi l'emissione alfa o beta da parte dei radionuclidi; hanno quindi la stessa natura della radiazione luminosa e dei raggi X, ma con altissima frequenza e perciò con una lunghezza d'onda molto più piccola. I raggi gamma si differenziano dai raggi X per la loro origine nucleare e non atomica; essi sono assai penetranti e per essere fermati richiedono grandi spessori di metallo o calcestruzzo. Il meccanismo di emissione dei raggi gamma (fig. 5) è insolito: la perdita di una particella alfa o beta, che trasforma l'elemento, lascia il nucleo in uno stato eccitato con un eccesso di energia rispetto a quella che competerebbe alla nuova situazione. Questo surplus di energia deve essere eliminato per poter tornare in uno stato normale e quindi si ha l'emissione dell'energia sotto forma di quanto gamma, ma solo dopo l'espulsione delle particelle alfa o beta. Perciò il decadimento gamma si differenzia dai precedenti

perché comporta solo la perdita di energia e avviene fra stati eccitati dello stesso nucleo. I raggi gamma sono meno ionizzanti delle radiazioni alfa e beta e interagiscono con la materia mediante l'effetto fotoelettrico, l'effetto Compton e l'effetto di creazione di coppie.

L'effetto fotoelettrico avviene quando un fotone gamma interagisce con un elettrone orbitante attorno ad un atomo e gli trasferisce tutta la sua energia, col risultato di espellere l'elettrone dall'atomo. Avviene quando l'energia iniziale  $E_0$  risulta inferiore a 0,5 MeV.

L'effetto Compton si verifica nel momento in cui un fotone gamma incidente espelle un elettrone da un atomo, in modo simile al caso precedente, ma l'energia addizionale del fotone viene convertita in un nuovo fotone gamma, meno energetico, con una direzione diversa dal fotone originale.

Infine l'effetto di creazione di coppie di elettroni e positroni avviene per  $E_0$  superiore a 1,02 MeV ed è conseguente all'annichilazione del fotone per urto contro una particella materiale che assorbe una parte dell'energia incidente.

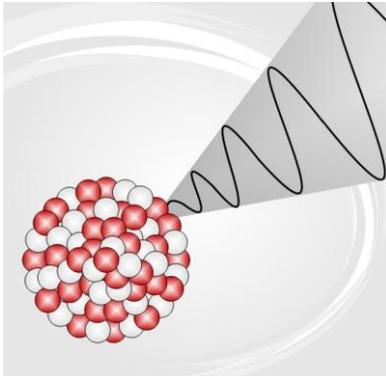


Figura 5. Emissione di raggi gamma.

#### 2.2.4. Serie radioattive

Gli atomi che subiscono la disintegrazione radioattiva perdono le loro caratteristiche iniziali, trasformandosi in atomi di altri elementi, che possono essere ancora instabili e decadere a loro volta: si generano così le cosiddette serie radioattive. Un'analisi accurata dei vari elementi ha portato ad individuare queste catene di trasformazioni successive, le quali danno luogo a delle famiglie radioattive, ciascuna delle quali ha un capostipite e un termine ultimo stabile

che è il piombo. In tabella 2 sono elencate le tre principali famiglie radioattive con i rispettivi nuclidi iniziali e finali.

Famiglia	Nuclide iniziale	Nuclide finale
Uranio	Uranio 238	Piombo 206
Torio	Torio 232	Piombo 208
Attinio	Uranio 235	Piombo 207

Tabella 2. Famiglie radioattive.

### 2.3.Effetti delle radiazioni

Gli effetti delle radiazioni ionizzanti si suddividono in effetti deterministici e stocastici. Gli effetti deterministici sono attribuibili direttamente all'irraggiamento, si manifestano subito dopo l'irradiazione e questo solo se l'assorbimento supera una dose soglia ben precisa. Se la dose assorbita non è letale, questi effetti, ad esempio eritemi, dermatiti o emorragie, regrediscono nel giro di alcune settimane. Gli effetti stocastici, invece, non dipendono dalla dose assorbita e non si verificano immediatamente dopo l'irraggiamento. Essi derivano da alterazioni delle macromolecole del DNA e dell'RNA, i quali se vengono danneggiati danno vita a delle cellule geneticamente modificate che dopo un certo periodo di latenza possono dar luogo a tumori o leucemie. Tale effetto è prodotto principalmente dalle radiazioni gamma, più energetiche e penetranti delle particelle alfa e beta.

Oltre a questi effetti biologici, le radiazioni hanno anche degli effetti sui materiali, infatti la trasmutazione rende necessaria una scelta attenta delle leghe metalliche destinate ad operare in ambienti radioattivi, poichè l'accumulo radioattivo ne cambia la composizione chimica e fisica e può far loro perdere le necessarie caratteristiche di resistenza, durezza e stabilità. Inoltre i materiali esposti in maniera permanente alle radiazioni, con il passare del tempo accumulano isotopi instabili e diventano sempre più radioattivi.

### 2.3.1. Dosimetria e radioprotezione

Dosimetria e radioprotezione sono due discipline che hanno come oggetto la protezione dell'uomo e dell'ambiente dagli effetti nocivi delle radiazioni e si occupano della misurazione e del calcolo delle dosi di radiazioni assorbite.

Fermare completamente emissioni di raggi alfa e beta è molto semplice e richiede pochi millimetri di un qualsiasi materiale solido. Per attenuare invece raggi X e gamma, possono essere richiesti alcuni decimetri di calcestruzzo o piombo, il quale è molto stabile essendo l'ultimo elemento del decadimento radioattivo. L'energia depositata dalle radiazioni ionizzanti nelle sostanze irradiate è considerata in dosimetria il parametro fondamentale per descrivere quantitativamente gli effetti delle radiazioni: la quantità di energia depositata nell'unità di massa del materiale prende il nome di dose assorbita e si misura in gray (Gy).

La radioprotezione infine si differenzia dalla dosimetria, in quanto cerca di quantificare indicatori di rischio basandosi sulla misura della dose assorbita e sulla valutazione di altri fattori quali il tipo di radiazione e di tessuto esposto. Gli indicatori principali sono la dose equivalente e la dose efficace, la dose individuale e la dose collettiva.

## **2.4. Rifiuti nucleari**

I rifiuti radioattivi sono materiali non più utilizzabili nei quali sono ancora presenti radionuclidi che emettono radiazioni di vario tipo, la cui intensità decresce col tempo e si dimezza in un periodo variabile da pochi secondi a migliaia di anni, a seconda del tipo di radioisotopo contenuto. Le fonti delle scorie radioattive possono essere le centrali nucleari, il ciclo del combustibile (estrazione del minerale, trasformazione in combustibile, combustibile irraggiato, materiali di scarto, prodotti di fissione, attività di riprocessamento), i centri di ricerca, le attività di smantellamento dopo la chiusura del sito e le numerose altre applicazioni. I principi fondamentali a cui si deve far riferimento per la gestione di questi rifiuti devono basarsi sulla protezione sanitaria delle

popolazioni e dei lavoratori, sulla preservazione dell'ambiente e sull'impatto sulle generazioni future.

Il problema della gestione dei rifiuti, intesi come prodotti di fissione, va suddiviso solitamente in due fasi: la prima fase prevede l'immagazzinamento del combustibile esausto in apposite piscine d'acqua che raffreddano e schermano il materiale e la seconda consiste nel recupero dello stesso dai depositi di scorie, l'eventuale separazione di prodotti di fissione velenosi (riprocessamento o ritrattamento) e il confinamento a lungo termine di questi scarti. In alcuni paesi, specialmente in Francia, è stato messo a punto il combustibile MOX (mixed oxide) costituito da plutonio e uranio impoverito il quale consente un ulteriore riciclaggio di materiale subito dopo il processo di ritrattamento. Esistono due modi principali per smaltire i rifiuti nucleari: per bassi livelli di radioattività si tende a ricorrere al deposito superficiale, ovvero il confinamento in aree terrene protette e contenute all'interno di barriere ingegneristiche, mentre per alti livelli di radioattività si sfruttano i depositi geologici che prevedono lo stoccaggio in bunker sotterranei schermati opportunamente.

La gestione dei rifiuti radioattivi costituisce a livello mondiale un problema essenziale, tanto che ormai è entrata in fase avanzata di sviluppo nella maggioranza dei paesi industrializzati che impiegano l'energia nucleare per diversi scopi e influenza notevolmente già la fase di progettazione dell'impianto, in modo da scegliere materiali e tecniche di costruzione adeguati. In Italia sarà sempre necessaria la gestione delle scorie nucleari, in quanto l'uso di sorgenti e materiali radioattivi è molto diffuso in applicazioni non energetiche, prevalentemente nelle pratiche ospedaliere quali la radiodiagnostica. La gestione complessiva dei rifiuti in Italia deve garantire la sistemazione di circa 80 mila metri cubi di materiale radioattivo. Attualmente è anche in corso un programma di smantellamento progressivo delle centrali nucleari e degli impianti sperimentali connessi al ciclo del combustibile.

#### 2.4.1. Classificazione internazionale e italiana

I rifiuti radioattivi sono classificati secondo varie categorie che tengono conto delle concentrazioni dei radioisotopi da un lato e dalle diverse modalità di gestione e smaltimento dall'altro. A livello internazionale si fa riferimento alla classificazione impartita dalle guide tecniche della IAEA:

- Very Low Level Waste: sono i rifiuti che decadono in pochi mesi o al massimo in alcuni anni con livelli di radioattività bassi. Questi rifiuti hanno origine dagli impieghi medici e di ricerca e dopo un periodo di immagazzinamento vengono gestiti come rifiuti convenzionali;
- Low and Intermediate Level Waste – Short Lived: sono rifiuti che richiedono tempi variabili da qualche decina fino a qualche centinaia di anni per raggiungere concentrazioni di radioattività accettabili. Questi rifiuti provengono dalle centrali nucleari, dagli impianti di ciclo del combustibile e dalle operazioni di decommissioning. E' suggerito lo smaltimento in siti ingegneristici di superficie;
- Low and Intermediate Level Waste – Long Lived: sono i rifiuti ad alta radioattività che decadono nel corso di migliaia di anni. Provengono dal riprocessamento del combustibile irraggiato o da attività di ricerca particolari. Dopo essere stati trattati possono essere smaltiti in formazioni geologiche a grande profondità;
- High Level Waste: sono i rifiuti che superano i 4000 Bq/g per particelle alfa emittenti e presentano una significativa produzione di calore. Lo smaltimento avviene in una formazione geologica profonda dopo un periodo di stoccaggio, in adeguate strutture ingegneristiche, di oltre 30 anni.

La classificazione italiana è leggermente diversa da quella internazionale e fa riferimento a tre categorie di rifiuti radioattivi: la prima categoria corrisponde ai rifiuti VLLW, la seconda categoria ai rifiuti LILW-SL e la terza ed ultima categoria raggruppa assieme i rifiuti LILW-LL e HLW della classificazione internazionale.



## CAPITOLO 3

### Applicazioni delle reazioni nucleari

#### 3.1. Impieghi della radioattività

L'uomo ha da sempre convissuto con la radiazione nucleare e negli ultimi cinquant'anni ha imparato ad utilizzarla per migliorare la propria esistenza. La scoperta delle reazioni nucleari che forniscono energia, radiazioni e radioisotopi ha avuto un'importanza eccezionale fornendo all'umanità una vasta quantità di benefici. Le applicazioni e le attività umane che implicano l'uso diretto o indiretto dell'energia nucleare o della radioattività sono innumerevoli e vanno ben oltre ai soli fini energetici.

Di seguito vengono forniti alcuni esempi delle principali applicazioni mediche che appartengono a due categorie fondamentali: la radioterapia e la radiodiagnostica.

La sezione si conclude con la sintesi di ulteriori impieghi che la radioattività trova in importanti settori come l'industria, l'agricoltura, l'alimentare, la geologia, la prospezione mineraria, l'ambiente, l'archeologia e la ricerca.

##### 3.1.1 Radioterapia

La radioterapia sfrutta la capacità delle radiazioni di essere concentrate in zone abbastanza piccole permettendo di distruggere le cellule malate con una notevole precisione. Le radiazioni vengono generalmente somministrate per periodi di tempo brevi e distanziati di 24 ore, permettendo di ridurre le masse tumorali in modo efficace e riducendo l'impatto degli interventi chirurgici. Le cellule cancerose vengono irradiate selettivamente e dall'interno, interessando in minima parte i tessuti circostanti.

In radioterapia vengono impartite dosi di parecchi sievert ad alcune zone del corpo. Queste dosi, mortali se date a tutto il corpo, inserite in una piccola zona

interessata da un tumore, servono invece ad ucciderne le cellule. Un tempo questi metodi erano molto invasivi per il paziente, oggi invece si riesce a sagomare la zona da distruggere con elevata precisione, tanto che l'invasività è divenuta molto bassa. La probabilità di provocare tumori con l'irraggiamento è di qualche punto percentuale, ma si deve considerare che queste terapie vengono somministrate a persone che hanno già un tumore e che quindi non hanno altre probabilità di sopravvivenza senza radioterapia.

#### *3.1.1.1. Boroterapia con neutroni*

Nella boroterapia, in inglese BNCT - Boron Neutron Capture Therapy -, si sottopone ad un flusso neutronico l'organo malato a cui è stato somministrato un isotopo del boro. Il metodo si basa su una particolare reazione che avviene quando il Bo-10 (isotopo non radioattivo, facilmente disponibile e avente elevata sezione d'urto) viene irradiato con neutroni termici per fare in modo che acquisti un neutrone diventando Bo-11, il quale decade dando come prodotti degli ioni di litio Li-7 e l'elio He-4. I prodotti di questa reazione cedono energia all'interno della cellula tumorale, bruciandola senza provocare danno alle cellule vicine prive di boro.

Negli Stati Uniti e in Germania la boroterapia viene impiegata utilizzando i reattori nucleari a fissione per generare i flussi neutronici richiesti.

#### 3.1.2. Radiodiagnostica

L'uso delle radiazioni nella diagnostica permette di ricostruire immagini molto buone di parti interne del corpo umano e di particolari dei diversi organi con livelli di accuratezza e di dettaglio molto elevati. Vi è la possibilità di effettuare diagnosi estremamente accurate di stati patologici altrimenti non verificabili senza intervenire chirurgicamente. Considerando che le dosi vengono date a soggetti che necessitano di una diagnosi, l'impatto di queste pratiche è solitamente basso e può arrivare al massimo fino a 20 mSv, con una probabilità su mille di tumore nella peggiore delle ipotesi.

### *3.1.2.1. Radiografia*

La radiografia riveste un ruolo fondamentale nello studio di patologie inerenti alcuni settori del corpo umano, in particolare del cuore, dell'apparato respiratorio, del tubo digerente, del sistema renale e delle ossa nel caso di fratture. La parte del corpo da analizzare viene studiata con una macchina generatrice di raggi X; l'operatore si reca in una stanza attigua per ripararsi dalle radiazioni, le quali nonostante la singola dose sia molto limitata, col tempo finirebbero per accumularsi e risultare nocive. Le radiazioni infatti esercitano un'azione potenzialmente dannosa su zone anatomiche sensibili, le cui cellule sono attivamente in crescita; oggi l'utilizzo delle radiografie è più limitato e si usano più precauzioni di un tempo.

Le diversità di assorbimento delle radiazioni esistenti tra i diversi tessuti del corpo, determinano il contrasto che contraddistingue l'immagine nella pellicola radiografica. In radiologia si adoperano spesso anche dei mezzi di contrasto che danno rilievo ai contorni dell'organo osservato, rendendone più semplice l'analisi. La radiografia è vantaggiosa perché è un esame facile e veloce da realizzare ed è effettuabile in tutte le strutture sanitarie come primo strumento di indagine diagnostica.

### *3.1.2.2. Tomografia Assiale Computerizzata (TAC)*

La TAC è un esame diagnostico che combina i tradizionali raggi X con la tecnologia del computer. Ciò consente di ottenere l'immagine radiologica tridimensionale di una sezione trasversale del corpo. Attualmente si stanno imponendo due nuove tecniche: la TAC spirale e la TAC multistrato. In un tempo molto minore, questi apparecchi forniscono, rispetto alle tecniche tradizionali, un numero molto più elevato di immagini, migliorando l'affidabilità dell'interpretazione diagnostica. Durante l'esame il lettino su cui il paziente è sdraiato viene fatto scorrere all'interno di un'apposita apparecchiatura, mentre un tubo, fonte dei raggi X, ruota attorno alla parte da esaminare e raccoglie, attraverso un particolare sistema elettronico di registrazione, centinaia di immagini che vengono elaborate al computer e ricostruite in tre dimensioni.

La TAC evidenzia anche minime differenze di densità tra i differenti tessuti di un organo, permettendo di visualizzare anche strutture localizzate molto in profondità. Il principale campo d'azione di questa tecnologia rimane lo studio dei tumori e la dose di radiazione ionizzanti è superiore a quella della radiografia tradizionale.

#### *3.1.2.3. Tomografia Computerizzata (TC)*

La TC è una metodica diagnostica per immagini, che sfrutta radiazioni ionizzanti a raggi X e consente di riprodurre sezioni corporee del paziente ed elaborazioni tridimensionali per le quali è necessario il supporto di un computer. A differenza della TAC, che consente scansioni assiali, la TC permette di visualizzare immagini trasversali e ricostruzioni delle immagini su ogni piano, non solo su quello assiale.

#### *3.1.2.4. Scintigrafia*

La scintigrafia consiste nella visualizzazione della distribuzione dell'organismo, grazie ad un isotopo radioattivo (il più usato è il tecnezio) somministrato per via endovenosa, in grado di fissarsi su determinati organi o tessuti da esaminare. La radioattività di tali isotopi è innocua per l'organismo umano; una volta raggiunto l'organo bersaglio, le radiazioni emesse dall'isotopo fanno apparire una serie di puntini brillanti sullo schermo di un rivelatore a scintillazione posto sulla superficie del corpo. Tali punti registrati su un grafico detto scintigramma, disegnano la mappa della regione corporea interessata. Questo metodo consente osservare e valutare la forma e la grandezza di un organo individuando lesioni in fase precoce, altrimenti non rilevabili con altri esami. La quantità di radioattività iniettata è molto piccola e le sostanze impiegate non sono nocive.

#### *3.1.2.5. Angiografia*

L'angiografia è una tecnica di indagine radiologica che permette lo studio dei vasi sanguigni. Con l'iniezione del mezzo di contrasto contenente iodio nel

sistema circolatorio e la ripresa radiografica delle immagini si può verificare l'anomalo afflusso di sangue in una o più arterie nei minimi dettagli.

#### *3.1.2.6.Mammografia*

La mammografia è un esame radiologico che, utilizzando raggi X, consente una diagnosi precoce del cancro al seno molto prima che esso sia sufficientemente sviluppato da essere percepibile alla palpazione. I bassi dosaggi di radiazioni consentono la ripetizione routinaria dell'esame senza rischi.

#### *3.1.2.7.Mineralometria Ossea Computerizzata (MOC)*

La MOC è una tecnica diagnostica che permette l'accertamento del grado di mineralizzazione delle ossa, perciò costituisce la principale metodica per la diagnosi di osteoporosi, malattia dello scheletro che provoca una riduzione di calcio e altri minerali nelle ossa, determinando nel paziente che ne è affetto una maggiore esposizione alle fratture. Nella MOC una sorgente radioattiva emette un fascio di fotoni che perde energia quando attraversa i tessuti. Il metodo si basa sul calcolo della massa minerale media di un osso misurando la diversa intensità con cui vengono arrestati i fotoni emessi da un isotopo radioattivo come l'americio o lo iodio.

#### *3.1.2.8.Teleradiografia*

La teleradiografia consente di misurare le dimensioni del cuore. La persona esaminata e la fonte di raggi X devono essere ad una distanza minima di due metri, in modo tale da permettere un percorso parallelo dei raggi per valutare meglio le cavità cardiache. Questa tecnica è ormai in disuso e viene sempre più sostituita dall'ecocardiogramma.

#### *3.1.2.9.Radioscopia*

La radioscopia è un'indagine radiografica che permette di vedere gli organi interni in movimento o di seguire gli spostamenti di uno strumento

introdotto nel corpo su un intensificatore di immagini. Nonostante una notevole esposizione del paziente e dell'operatore a radiazioni ionizzanti, la radioscopia rileva immagini a scarso contenuto di informazione perciò risulta quasi completamente abbandonata.

#### *3.1.2.10. Risonanza Magnetica Nucleare (RMN)*

La RMN è, dal punto di vista tecnologico, molto più recente rispetto alla TAC ed è tuttora in piena evoluzione. Essa è innocua in quanto non vengono utilizzati raggi X e inoltre ha il vantaggio di fornire immagini dettagliate sia del piano trasversale del corpo sia dei piani sagittali e frontali, ottimizzando la visualizzazione dell'area corporea in esame. A volte è necessario utilizzare un mezzo di contrasto. Il paziente deve essere collocato all'interno di un macchinario dove viene irradiato da un campo magnetico di altissima intensità. Le forze generate nel campo permettono ai momenti magnetici delle molecole del paziente di allinearsi nella direzione del campo esterno alterando temporaneamente i nuclei; quando le onde radio vengono interrotte danno luogo a segnali che vengono trasmessi a computer e trasformati in immagini tridimensionali.

Non ci sono rischi di radiazioni, né effetti collaterali e l'indagine può essere usata per la diagnosi di patologie che interessano organi e tessuti del corpo. I macchinari sono molto costosi e per questo poco diffusi.

#### *3.1.2.11. Tomografia a Emissione di Positroni (PET)*

La PET è una tecnica di medicina nucleare che permette di localizzare, all'interno del cervello o di altri organi, una sostanza marcata con un radioisotopo che emette positroni, precedentemente somministrata al paziente. Il positrone emesso si scontra con un elettrone e a seguito della collisione si ha la scomparsa delle due particelle con produzione di fotoni gamma che vanno in direzioni opposte. Questi fotoni possono venir rilevati con il tomografo PET-CT, che rivela i fotoni in coincidenza.

La PET riesce a riconoscere le cellule che si dividono rapidamente (cellule tumorali) nel contesto di altre cellule a basso indice di proliferazione (cellule normali) e recentemente sta acquisendo un ruolo clinico sempre più rilevante. L'esame permette di seguire le attività fisiologiche del cervello, del cuore, di infiammazioni ed è utile nelle analisi di tumori del pancreas e del fegato. La PET è anche di aiuto nelle forme depressive dell'anziano, nelle fasi precoci dell'Alzheimer e nelle epilessie. Infine permette di diagnosticare un cancro e di riconoscere i tumori maligni.

### *3.1.2.12. Tomografia Computerizzata a Emissione Singola di Fotoni (SPECT)*

La SPECT è una tecnica di immagine scintigrafica che impiega piccole dosi di tracciante per misurare processi biologici e biochimici nel cervello o in altri organi. Grazie alla SPECT si possono ricostruire al computer le immagini, acquisite da una camera rotante attorno al paziente, relative alla distribuzione di una sostanza radioattiva.

L'indagine serve a diagnosticare malattie delle coronarie e riconosce molte cardiopatie e affezioni del fegato.

### 3.1.3. Applicazioni industriali

Intensi fasci di raggi X e raggi  $\gamma$  vengono impiegati per radiografare componenti meccanici, per assicurare la qualità delle fusioni e delle saldature e per verificare l'integrità di componenti impiantistici di elevato spessore ai fini della sicurezza. Sistemi di misura e di analisi on-line sfruttano l'emissione di radiazioni beta e l'attivazione neutronica. Emettitori di particelle beta sono diffusamente utilizzati nell'industria cartaria per la misurazione dello spessore dei fogli di carta durante il processo di fabbricazione. Sorgenti di neutroni sono impiegate presso gli impianti termoelettrici per quantificare in tempo reale il contenuto di silicio, ferro, alluminio, zolfo e calcio nel carbone, onde valutare preventivamente l'emissione di inquinanti. La rilevazione di traccianti dispersi nell'olio dei motori di nuova progettazione consentono, in fase di ingegnerizzazione, di quantificarne il consumo d'olio. Il flusso neutronico di un

reattore nucleare può servire a produrre materiali semiconduttori per l'industria elettronica o ad alimentare processi di radiografia. L'irraggiamento con intensi fasci di neutroni si rende utile a conferire ai materiali proprietà superficiali diverse da quelle iniziali. Tipiche sono le applicazioni per la produzione di materiali polimerici usati per isolanti elettrici, nastri adesivi, pneumatici e lenti a contatto. In molti casi le radiazioni consentono di sintetizzare prodotti chimici che richiederebbero altrimenti lunghi, costosi e inquinanti trattamenti.

#### 3.1.4.Applicazioni nel campo della sterilizzazione

Una delle applicazioni più comuni è la sterilizzazione di prodotti medici e alimentari, per uccidere eventuali parassiti dei cereali, per conservare più a lungo i cibi o per trattare rifiuti potenzialmente inquinati da batteri. Le dosi impiegate vanno dalle poche migliaia di sievert per il trattamento dei cibi ai milioni di sievert per la sintesi chimica. Per uccidere un uomo bastano solitamente 4 sievert, quindi si capisce che le dosi usate sono enormi rispetto a qualsiasi altra applicazione. Per sterilizzare è necessario uccidere tutti i microrganismi, i quali essendo molto semplici, sono molto resistenti alle radiazioni; servono circa 1000 sievert per avere una probabilità del 50% di uccidere un batterio.

#### 3.1.5.Applicazioni biologiche e agroalimentari

L'uso delle radiazioni ha permesso lo studio e lo sviluppo di nuove tecniche antiparassitarie e di fertilizzazione che sono oggi estesamente impiegate in agricoltura e nella prevenzione sanitaria.

La liberazione di insetti precedentemente sterilizzati con le radiazioni consente un efficace controllo delle mosche e di altri parassiti, minimizzando contemporaneamente l'uso di antiparassitari e insetticidi; la tecnica prevede l'allevamento degli insetti maschi e la loro sterilizzazione con raggi gamma prima di essere rilasciati per riprodursi. La competizione con gli insetti maschi non sterilizzati porta ad una rapida riduzione della popolazione.

Per quanto riguarda l'industria agroalimentare si sfruttano le radiazioni per distruggere insetti, muffe e batteri nelle derrate o per finalità antigerminative. Inoltre l'uso di traccianti radioattivi mescolati al fertilizzante consente di seguire il processo di assorbimento e di metabolizzazione da parte dei vegetali e di quantificarne il rilascio, per evitare poi l'impiego di dosi eccessive di sostanze chimiche.

#### 3.1.6.Applicazioni ambientali

Le radiazioni hanno un campo di applicazione molto proficuo nello studio e nella protezione dell'ambiente. Mescolando ai combustibili piccole quantità di traccianti è possibile verificare l'efficienza dei sistemi di depurazione dei fumi. L'uso dei traccianti radioattivi consente di studiare inoltre la mappatura delle falde acquifere e delle risorse idriche sotterranee, di analizzare e misurare l'accumulo dei sedimenti sul fondo marino, di seguire il corso delle correnti oceaniche e di misurare il tasso di accumulo dei ghiacci nelle calotte polari.

#### 3.1.7.Applicazioni in archeologia e antropologia

Le tecniche di datazione mediante l'uso di radiazioni consentono di determinare l'età di un reperto di origine organica vegetale o animale (ad esempio ossa e mummie) misurando il suo contenuto di C-14. Gli organismi viventi, infatti, assumono e metabolizzano carbonio dall'ambiente finché sono in vita e ne cessano l'assunzione dopo la morte; il C-14 decade con un tempo di dimezzamento di 5568 anni e la misura della sua percentuale residua permette di risalire all'età del reperto. Una tecnica di datazione alternativa è la cosiddetta termoluminescenza, che misura l'età dei manufatti ceramici. In essi sono inglobati dei radioisotopi naturali contenuti nelle argille e i successivi processi di decadimento determinano l'imprigionamento di parte dell'energia radioattiva che si manifesta con una debole luminescenza all'atto del riscaldamento del manufatto. La quantità di energia luminosa liberata è proporzionale al tempo trascorso dal momento della cottura.

### 3.1.8.Applicazioni in geologia e prospezione mineraria

La presenza di radioisotopi a vita lunga nei minerali consente di datare le formazioni geologiche, ricavando informazioni preziose per la ricerca di minerali. Un metodo di datazione delle rocce si basa sul decadimento dell'uranio e del torio, un altro metodo invece sulla determinazione dei rapporti tra le concentrazioni degli elementi iniziali e finali delle serie radioattive.

La stratigrafia per attivazione neutronica è una tecnica usata nell'industria petrolifera per determinare la composizione degli strati geologici attraversati da una perforazione di sondaggio.

### 3.1.9.Applicazioni nel campo della sicurezza

Le radiazioni sono utili per il controllo dei bagagli negli aeroporti effettuato con stazioni radiografiche a raggi X, per rilevare il fumo in impianti antincendio a camera di ionizzazione e in medicina legale per determinare la presenza in un campione di parecchi elementi, tra i quali l'arsenico.

### 3.1.10.Applicazioni nel campo della ricerca

La ricerca scientifica e tecnologica usano molto spesso le radiazioni come elemento di studio e indagine. Ad esempio si fanno ricerche sulla composizione della materia impiegando acceleratori e rilevatori di enormi dimensioni e si impiegano traccianti radioattivi per studiare nel dettaglio i meccanismi che presiedono ai processi chimici, fisici e biologici seguendo opportunamente gli atomi e le molecole marcati.

## **3.2.Impieghi dei reattori nucleari**

I reattori nucleari, oltre alla produzione di energia, trovano impiego in molti altri campi. Questo capitolo inizialmente mette in luce i principali impieghi marini dei reattori nucleari che producono energia necessaria per la propulsione di navi e sottomarini e successivamente descrive le numerose applicazioni non elettriche degli stessi.

### 3.2.1.Applicazioni marine

Il principale vantaggio della propulsione nucleare consiste in una prolungata autonomia e nel fatto di non aver bisogno di aria per funzionare; i motori diesel infatti richiedono aria per la combustione.

Gli svantaggi sono in primo luogo gli alti costi di progettazione e produzione e poi la gestione delle scorie e del decommissioning dell'unità a fine vita; è sempre necessario garantire tutti gli aspetti inerenti la sicurezza degli impianti.

La propulsione nucleare si è rivelata utile nei sottomarini militari, mezzi navali costruiti per operare prevalentemente sott'acqua; in questi casi il reattore consente un'autonomia subacquea di diversi mesi con buone velocità e operando a notevoli profondità. L'energia prodotta consente inoltre di generare ossigeno e acqua potabile dall'acqua di mare.

Anche la portaerei utilizza la propulsione nucleare. Questo tipo di nave militare è dotata di installazioni per il decollo, il rifornimento, il ricovero e il trasporto di aerei e grazie alla produzione di energia nucleare può imbarcare fino a 95 aeroplani e 6000 uomini di equipaggio garantendo una velocità di 30 nodi e oltre 800.000 miglia di autonomia.

Per quanto riguarda la propulsione nucleare civile, essa è risultata molto conveniente nel mare Artico Russo, zona difficile per le possibilità di rifornimento e le difficoltà nel rompere ghiacci spessi anche tre metri. In tali condizioni di esercizio le navi rompighiaccio a propulsione nucleare si sono dimostrate insostituibili e indispensabili; la propulsione è affidata a due reattori ad acqua pressurizzata.

### 3.2.2.Applicazioni non elettriche

#### *3.2.2.1.Ricerca*

Sono operativi, in 54 paesi, 280 piccoli reattori nucleari a scopo di ricerca, formazione e per la produzione di radiazioni o isotopi radioattivi. Questi reattori operano ad una potenza molto inferiore rispetto ai reattori commerciali. Inoltre i reattori di ricerca sono molto più semplici e sfruttano temperature più

basse, utilizzano meno combustibile e producono una quantità molto minore di prodotti di fissione. D'altra parte richiedono un combustibile con arricchimenti più elevati. Prevalentemente sono reattori del tipo termico con la presenza di un moderatore; il nocciolo richiede un fluido refrigerante e la maggior parte dei reattori sono dotati di un riflettore per ridurre le perdite di neutroni dal nocciolo. Alcuni reattori sono utilizzati per produrre diversi tipi di isotopi radioattivi, impiegati in medicina, nell'industria e in altre applicazioni. Dal nocciolo possono anche venire estratti fasci di neutroni da utilizzare in esperimenti di fisica. Il reattore nucleare di ricerca più utilizzato è il reattore a piscina, così chiamato perché una grande vasca d'acqua funge da moderatore.

#### *3.2.2.2.Cogenerazione*

La cogenerazione permette di sfruttare il calore prodotto nella generazione di elettricità. In applicazioni come la desalinizzazione, l'estrazione, la raffinazione, la produzione di idrogeno, si sfruttano le alte temperature raggiungibili dai reattori nucleari.

#### *3.2.2.3.Desalinizzazione*

La desalinizzazione è usata per produrre acqua potabile da fonti che contengono quantità di solidi disciolti in essa. Per la produzione di acqua potabile, la desalinizzazione risulta particolarmente costosa, richiedendo grosse quantità di energie; proprio per questa ragione è spesso affiancata da reattori nucleari che producono calore ed elettricità in grandi quantità e a bassi costi. Tuttavia la stragrande maggioranza di impianti di desalinizzazione usano combustibili fossili, poiché l'uso del nucleare presuppone l'esistenza di un programma nucleare.

#### *3.2.2.4.Produzione di idrogeno*

L'idrogeno non è considerabile come una fonte di energia primaria, ma come un vettore energetico da produrre artificialmente poiché non esiste libero e isolato in natura. Esso si può produrre dal metano per via termica e dall'acqua

per via elettrolitica o radio litica; in tutti i casi è necessario un apporto di energia esterno ed è considerato conveniente produrlo solo se si riescono a mantenere bassi i costi e l'impatto ambientale. I reattori nucleari ad alta temperatura riescono in questo intento.

### **3.3. Impieghi dell'energia nucleare**

Le applicazioni dell'energia nucleare riguardano sostanzialmente due aree: l'impiego spaziale e l'impiego militare.

Le applicazioni spaziali riguardano i motori di spinta per razzi e le sorgenti energetiche per alimentare basi, satelliti e sonde tra cui i generatori termoelettrici a radioisotopi (RTG) e i reattori nucleari. Recentemente si è riscontrato un incremento di interesse e di finanziamenti per sviluppare sistemi nucleari per l'esplorazione spaziale, soprattutto la NASA (National Aeronautics and Space Administration) che sfrutta i reattori come propulsori per fornire energia ad altri sistemi per missioni che richiedono alti livelli di potenza per lunghi periodi di tempo.

Le applicazioni militari consistono in ordigni nucleari di fissione e di fusione, i quali sfruttando le reazioni nucleari, producono molta energia e sono molto distruttivi, rispetto alle armi convenzionali. Le armi a fissione sono le uniche ad essere state impiegate, al termine della seconda guerra mondiale contro le città di Hiroshima (bomba all'uranio) e Nagasaki (bomba al plutonio).

#### **3.3.1. Applicazioni spaziali**

##### ***3.3.1.1. Generatori termoelettrici a radioisotopi (RTG)***

Un RTG è un generatore di energia basato sulla conversione termoelettrica o termoionica del calore prodotto dal decadimento di alcuni isotopi radioattivi. Il sistema è costituito di due parti: una fonte di calore e un sistema per la conversione dello stesso in elettricità.

Nella prima parte si usa il calore di decadimento di un radioisotopo come il Pu-238; il calore è poi trasformato in elettricità da un convertitore termoelettrico

che sfrutta l'effetto Seebeck, un principio termoelettrico per il quale una forza elettromotrice è prodotta dalla diffusione di elettroni attraverso l'unione di due differenti materiali che formano un circuito quando i capi del convertitore si trovano a temperature differenti.

Ogni RTG è costituito da barre di un radioisotopo, distribuite in piccole e indipendenti unità modulari, ognuna con il proprio scudo termico e guscio d'impatto. I generatori RTG vengono progettati e testati accuratamente e da anni sono utilizzati in modo sicuro nel campo dell'esplorazione planetaria.

### *3.3.1.2.Reattori nucleari spaziali*

I reattori di questo tipo consentono di sfruttare l'energia nucleare nello spazio. Tali sistemi sono preferibili ai generatori RTG perché producono potenze superiori. Il reattore viene lanciato da terra a nocciolo spento e attivato nello spazio con degli appositi telecomandi in orbite oltre gli 800 km, tali da garantire il rientro solo dopo diversi secoli, quando il livello di radioattività è fortemente diminuito.

### 3.3.2.Applicazioni militari

#### *3.3.2.1.Armi a fissione nucleare: la bomba atomica*

Per quantificare la potenza liberata dagli ordigni nucleari si usano i kiloton (kton) e i megaton (Mton) rispettivamente pari a mille e un milione di tonnellate equivalenti di tritolo.

Costruire una bomba nucleare, detta anche bomba A, richiede notevoli capacità industriali. E' necessario trattare il materiale fissile arricchendo ad altissime percentuali (fino al 90%) l'U-235 o separando chimicamente il Pu-239 dal combustibile esausto dopo il suo utilizzo nel reattore. Successivamente è necessario assemblare la bomba: le reazioni devono avvenire molto velocemente, devono cioè finire prima che il calore generato distrugga meccanicamente il nucleo esplodente; l'innesco deve essere molto rapido per consentire un numero elevato di reazioni nel minor tempo possibile, perciò è

necessario un involucro robusto e pesante capace di resistere a lungo alla pressione esercitata dall'energia in fase di sviluppo e che possa anche fungere da riflettore dei neutroni per ridurre le perdite. All'interno dell'involucro si trova una determinata quantità di uranio o plutonio, tale da essere nel complesso superiore alla massa critica ma disposta in modo tale da non raggiungere questo valore prima di essere innescata. L'innescò è formato da un esplosivo tradizionale che spara la carica nucleare e ciò rende compatta la massa rendendola critica. Vi sono essenzialmente due tecniche dal punto di vista ingegneristico per soddisfare queste esigenze:

- il sistema a blocchi separati (fig. 6), nel quale si ha un involucro cilindrico alle cui estremità si trovano due masse di uranio che non interagiscono tra di loro. Al momento dell'esplosione, una carica convenzionale spara entrambe le masse una contro l'altra a grandissima velocità creando la pressione necessaria a superare la criticità. Questi sistemi, causa la loro scarsa efficienza, non vengono più costruiti;
- il sistema a implosione (fig. 7), dove una massa sferica di uranio o plutonio non critica e non del tutto compattata è circondata da uno strato di esplosivo convenzionale, che quando esplose libera energia. Quest'ultima viene spesa per aumentare la densità della massa di combustibile che si ritrova ad essere supercritico e fortemente compresso.

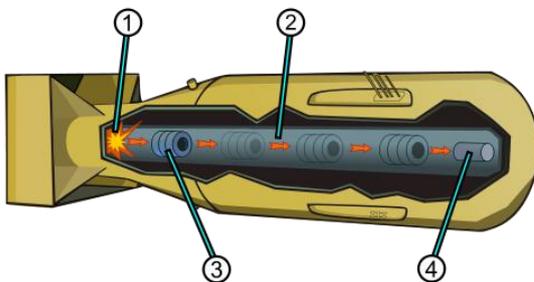


Figura 6. Sistema a blocchi separati.

- 1) Esplosivo
- 2) Canna
- 3) Proiettile di uranio
- 4) Obiettivo

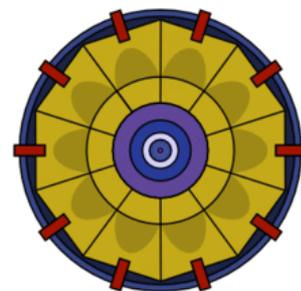


Figura 7. Sistema a implosione.

Il primo effetto chiaramente visibile di un'esplosione nucleare è il cosiddetto fungo atomico (fig. 8), una colonna di vapore, residui e detriti che si solleva per molti chilometri dal luogo dell'esplosione. L'energia liberata si ripartisce in tre diversi modi: radiazioni, onda d'urto e onda di calore. Le radiazioni vengono emesse all'atto dell'esplosione e insieme ai neutroni irradiano e contaminano le zone circostanti. La radioattività va attenuandosi col tempo, ma può permanere a livelli pericolosi anche per decenni, rendendo la zona inabitabile. Sempre nell'istante dell'esplosione si forma una elevatissima temperatura che vaporizza tutte le sostanze costituenti la bomba e genera una notevolissima pressione che dà origine ad una forza di espansione verso l'esterno; questo fenomeno è tipico dell'onda d'urto e danneggia meccanicamente cose e persone. L'onda di calore invece, si propaga più lentamente, vaporizzando i materiali vicini all'epicentro e incendiando quelli più lontani. Infine se l'esplosione avviene ad alta quota diventa importante considerare anche l'impulso elettromagnetico che può paralizzare le comunicazioni in un raggio di parecchie centinaia di chilometri.

Figura 8. Fungo atomico.



### *3.3.2.2.Armi a fusione nucleare: la bomba a idrogeno*

Il processo di fusione termonucleare è stato applicato alle armi nucleari attraverso la bomba a idrogeno detta anche bomba H. In sostanza si tratta di far reagire una massa di deuterio e litio in modo da ottenere la fusione. Avvengono così due processi contemporaneamente: la fusione del deuterio con se stesso e la fusione tra deuterio e trizio dopo che quest'ultimo è stato prodotto dal litio. La bomba H deve avere come innesco la bomba A in quanto occorre raggiungere temperature di centinaia di milioni di gradi. La bomba a idrogeno, a parità di massa, produce un'energia molto superiore alla bomba atomica e inoltre, mentre la bomba A possiede una massa critica al di sotto della quale la reazione non può avere luogo, nella bomba H qualsiasi quantità di deuterio è in grado di reagire se portata alla giusta temperatura.



# CAPITOLO 4

## Sistemi per la produzione elettrica

### 4.1.Reattori nucleari a fissione

Un reattore nucleare è costituito in linea generale dalle seguenti parti fondamentali:

- un nocciolo, che forma la parte centrale del reattore entro il quale si trova il materiale fissile e dove avviene la reazione a catena;
- un sistema di refrigerazione con refrigerante gassoso o liquido, formato da un insieme di tubi che attraversano il nocciolo;
- un moderatore di grafite, acqua o berillio, che evita la dispersione dei neutroni all'esterno del nocciolo;
- dei canali per esperienze, ossia delle aperture che giungono fino al nocciolo, necessarie per introdurre oggetti da irradiare o estrarre un fascio di neutroni e il combustibile esausto;
- numerosi strumenti adatti a misurare la densità dei neutroni e la temperatura entro il nocciolo.

Questi elementi, sia pure con molte varianti, sono comuni a tutti i tipi di reattori, che d'altra parte si differenziano tra loro sotto diversi aspetti. I reattori nucleari a fissione, quindi, possono essere classificati in relazione a varie loro caratteristiche, in primo luogo lo scopo per il quale il reattore è realizzato; in questo caso si possono avere dei reattori di potenza, il cui obiettivo è produrre notevoli quantità di energia calorifica estratta dal reattore e impiegata in un impianto termoelettrico, dei reattori di ricerca, destinati a produrre neutroni per esperienze e infine dei reattori autofertilizzanti e convertitori, utili a produrre elementi fissili partendo da materiali fertili. Ulteriori criteri di classificazione sono l'energia media dei neutroni utilizzati per la fissione (reattori veloci, intermedi e termici), il tipo di combustibile impiegato

(generalmente uranio o plutonio), la geometria del reattore (reattori omogenei se il materiale fissile è mescolato con il moderatore o reattori eterogenei se il combustibile è distribuito secondo un reticolo ben definito), la tipologia di moderatore impiegato (acqua, grafite o berillio) e la tipologia di refrigerante (gassoso o liquido).

## **4.2.Reattori di potenza**

Come visto in precedenza, lo scopo dei reattori di potenza è la produzione di calore da utilizzare principalmente per la produzione di energia elettrica. Questo tipo di impianto nucleare (fig. 9) è un sistema nel quale l'energia rilasciata nelle reazioni nucleari di fissione, viene trasferita dal combustibile nucleare ad un fluido termovettore refrigerante, che provvede al trasferimento verso i gruppi turboalternatori, all'interno dei quali avviene la conversione dell'energia termica in energia meccanica e successivamente in energia elettrica. La sorgente di energia del reattore è il combustibile presente nel nocciolo, contenuto da un recipiente in pressione e disposto in centinaia di parti modulari verticali dette elementi di combustibile (fig. 10). Spesso l'elemento di combustibile è una lunga scatola metallica a sezione quadrata o esagonale, contenente numerose barrette cilindriche costituite dal materiale combustibile in forma di pastiglie e incamiciato da una sottile guaina. Le barrette sono assemblate in reticoli regolari mediante griglie distanziatrici e piastre terminali forate; inoltre tutte le barrette sono lambite dal fluido refrigerante e sono fondamentali nell'assorbimento dei neutroni in eccesso liberati dalla reazione di fissione: ciò evita che la reazione stessa diventi incontrollabile con la liberazione di enormi quantitativi di energia che in casi estremi portano alla fusione del nocciolo, con la dispersione nell'ambiente di materiali radioattivi. Per diminuire l'energia cinetica dei neutroni generati dalle fissioni e per ottenere di conseguenza elevate sezioni d'urto, viene utilizzato un moderatore. Una volta raggiunta la condizione di criticità, il reattore possiede una massa critica tale che la reazione di fissione a catena si autosostiene in maniera stabile. Spesso accade che, anche a reattore spento, l'afflusso del

liquido refrigerante deve continuare per abbassare la temperatura del nocciolo e continuare a dissipare il calore residuo prodotto dalla radioattività del materiale combustibile. Tutti questi elementi appena descritti formano l'isola nucleare e sono racchiusi per questioni di sicurezza dentro all'edificio di contenimento primario (vessel), costruito in calcestruzzo e rivestito internamente da una parete in acciaio per assicurare la tenuta stagna.

Figura 9. Schema di un reattore nucleare.

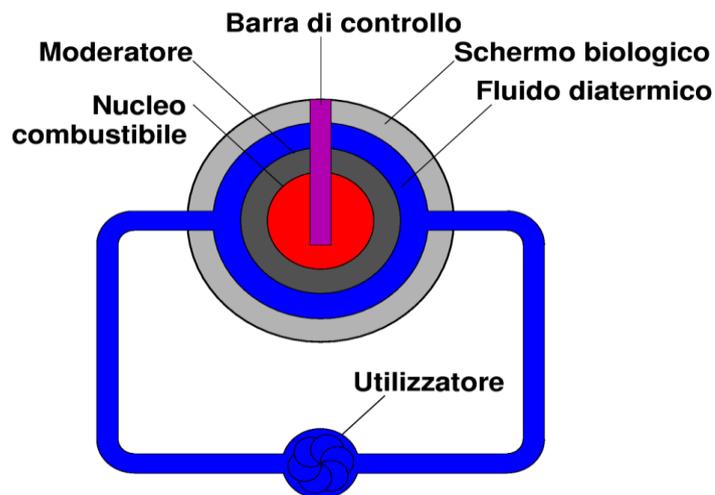


Figura 10. Elementi di combustibile.



I reattori nucleari di potenza si possono ulteriormente classificare secondo quattro generazioni, in base all'epoca in cui sono stati costruiti e secondo diverse concezioni tecnologiche o classi dette filiere.

#### 4.2.1. Generazioni di reattori nucleari

La prima generazione include i prototipi e i reattori destinati alla produzione di energia elettrica o plutonio per armi nucleari, progettati e costruiti prima degli anni '70. Sono caratterizzati da bassa potenza termica.

La seconda generazione comprende principalmente reattori costruiti e messi in funzione a partire dagli anni '70 e '80 ed ancora operativi. Queste prime due generazioni costituiscono i cosiddetti reattori provati, dei quali è stata verificata la stabilità operativa per usi civili e commerciali.

I reattori di terza generazione sono derivanti dall'ottimizzazione, in termini di economia e sicurezza, dei reattori di seconda generazione. Non apportano quindi sostanziali differenze concettuali di funzionamento né riguardo ai fluidi refrigeranti, né alla tipologia di combustibile utilizzato. Alcuni progetti industriali più avanzati, ma allo stesso tempo meno rivoluzionari rispetto ai prototipi di reattori di quarta generazione, e che conservano elementi di tipo evolutivo vengono denominati di "generazione III +".

Infine la quarta generazione comprende sistemi nucleari innovativi che raggiungeranno una maturità tecnica dopo il 2030. Tali sistemi sono concepiti in modo da provvedere alla fornitura di energia in maniera molto competitiva da un punto di vista economico, estendendo e migliorando la sicurezza e tenendo in considerazione la minimizzazione delle scorie, l'uso razionale delle risorse naturali, la capacità di produrre direttamente idrogeno, l'affidabilità e la resistenza alla proliferazione. Sinteticamente quindi, i requisiti base dei reattori di quarta generazione si possono riassumere in sostenibilità, sicurezza, affidabilità ed economicità.

#### 4.2.2. Filiere di reattori nucleari

Le principali filiere di reattori nucleari, che di seguito vengono analizzate, fanno riferimento ad impianti di prima e seconda generazione, in quanto le centrali di terza e quarta non sono altro che uno sviluppo successivo delle stesse tecnologie con dei miglioramenti radicali solo in termini di costi e di sicurezza ma non di tecnologia di funzionamento.

#### 4.2.2.1. Reattori ad acqua leggera (LWR)

I reattori ad acqua leggera comprendono due sottocategorie di reattori di questo tipo, ovvero i reattori ad acqua pressurizzata (PWR) e i reattori ad acqua bollente (BWR). Sono i più diffusi e in totale forniscono l'88% della potenza mondiale.

I PWR (fig. 11) sono reattori termici in cui l'acqua ha la funzione di refrigerante e moderatore. Essa esce dal nocciolo a circa 330 °C e viene inviata mediante fasci di tubi in un generatore di vapore, dove l'acqua di un circuito secondario viene portata nella condizione di vapore surriscaldato ed espansa in un turboalternatore. In questi reattori l'acqua viene mantenuta allo stato liquido. Il circuito primario comprende tubazioni, pompe di circolazione, organi di regolazione ed il pressurizzatore, il quale vincola ad un valore costante la pressione del circuito idraulico. Il pressurizzatore è composto da un contenitore dove l'acqua liquida è mantenuta in equilibrio con il suo vapore alla temperatura adatta.

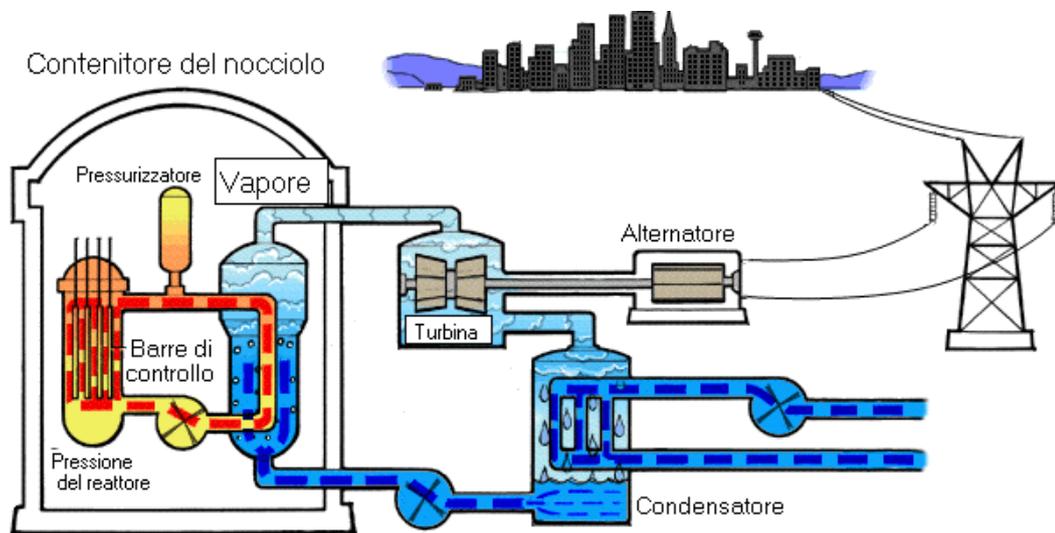


Figura 11. Schema di una centrale PWR. Il calore sviluppato dalla reazione di fissione all'interno del reattore viene trasferito, tramite il fluido refrigerante, ad un flusso d'acqua che genera vapore saturo, il quale alimenta la turbina che produce elettricità mediante un generatore.

I BWR sono reattori termici che usano anch'essi l'acqua come refrigerante e moderatore. La differenza fondamentale dai reattori di tipo PWR sta nel fatto che i BWR utilizzano l'acqua in ebollizione per creare vapore all'interno del reattore, eliminando quindi la necessità di avere dei generatori di vapore stesso. In questi reattori l'acqua cambia stato, passando da liquido a vapore; quest'ultimo attraversa la turbina accoppiata ad un generatore e si produce così l'elettricità da immettere nella rete. La turbina è seguita da un condensatore dove il vapore viene condensato mediante l'acqua di raffreddamento, fornendo così il liquido da reimmettere nel reattore.

#### *4.2.2.2.Reattori ad acqua pesante (HWR)*

I reattori HWR sono stati sviluppati prevalentemente in Canada con il nome di CANDU e impiegano l'acqua pesante in pressione come moderatore e usano come combustibile l'uranio naturale. Il reattore CANDU impiega un sistema di tubi in pressione orizzontali contenenti il combustibile, per permettere la ricarica durante l'esercizio, senza la necessità di spegnere il reattore per il ricambio del combustibile esaurito. L'acqua pesante è pompata attraverso i tubi in pressione per asportare il calore prodotto dalla reazione di fissione, rimanendo allo stato liquido e scambiando il calore in generatori di vapore, in analogia a quanto avviene nei reattori PWR. Essa è anche utile per la moderazione dei neutroni in un contenitore a bassa pressione a forma di cilindro, chiamato calandria, che circonda la zona ad alta pressione.

#### *4.2.2.3.Reattori a gas (GCR)*

Il GCR, denominato anche MAGNOX (fig. 12), è un reattore che impiega anidride carbonica in pressione come fluido refrigerante e termovettore. Il moderatore è costituito principalmente da grafite. Viene adottato un ciclo indiretto con la presenza di uno scambiatore di calore per produrre vapore acqueo che agisce come fluido motore da espandere in turbina. Il combustibile utilizzato risulta uranio naturale metallico con una guaina realizzata in leghe di magnesio dotate di bassa sezione di cattura neutronica. Le temperature

raggiungibili sono modeste, di conseguenza anche i rendimenti globali di conversione. L'impianto è economico per l'uso di materiali poco pregiati e abbondanti, nonostante le notevoli dimensioni ed il limitato rendimento; inoltre svincola dalla necessità di disporre di sistemi di arricchimento del combustibile o di dipendere dalle importazioni di materiale.

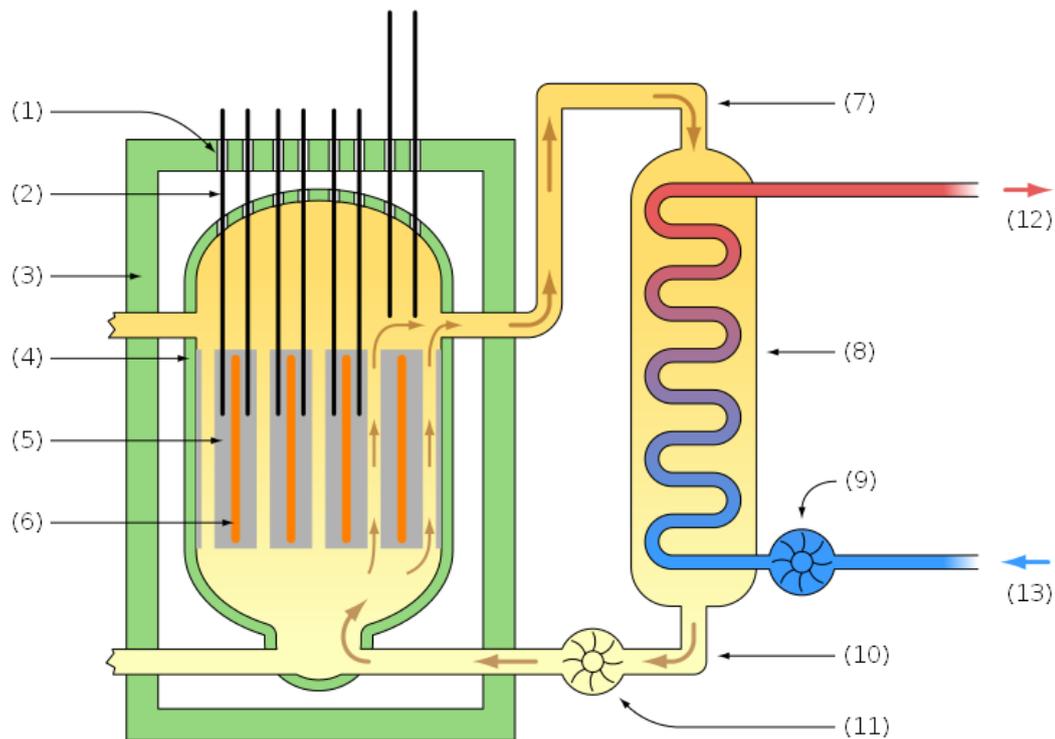


Figura 12. Schema di un reattore MAGNOX.

- |                             |                              |                             |
|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 1) Meccanismo di controllo  | 6) Barre di combustibile     | 11) Circolatore             |
| 2) Barre di controllo       | 7) Condotto gas caldo        | 12) Uscita vapore           |
| 3) Edificio del reattore    | 8) Condensatore              | 13) Acqua di raffreddamento |
| 4) Contenitore del nocciolo | 9) Pompa                     |                             |
| 5) Moderatore di grafite    | 10) Condotto gas raffreddato |                             |

#### 4.2.2.4. Reattori avanzati a gas (AGR)

Nei reattori del tipo AGR si rinuncia all'impiego di uranio naturale in favore di arricchimenti che vanno fino al 2,5%, utilizzando ossido di uranio ceramico e guaine in acciaio inossidabile. In tal modo il combustibile e la guaina possono sopportare maggiori temperature e di conseguenza il rendimento

globale può raggiungere il 40%, contro il 33% dei reattori GCR. Anche in questi reattori il moderatore è formato da grafite.

#### *4.2.2.5. Reattori a gas ad alta temperatura (HTGR)*

I reattori HTGR sono caratterizzati da elevate temperature di funzionamento: fino a 900 °C per il refrigerante e oltre i 1200 °C per il combustibile. Il nocciolo è perciò interamente in materiale ceramico e refrigerato da elio, mentre il combustibile è costituito da microsfele di ossidi o carburi di uranio e torio, inguainati in strati concentrici di carbonio e carburo di silicio. Le microsfele sono immerse in una matrice a sua volta incapsulata in contenitori di grafite a forma di tubi o di sfere e lambiti dall'elio refrigerante. Il ciclo termico di questo reattore, che è simile a quello degli altri tipi a gas, comprende come elementi fondamentali gli scambiatori di calore entro i quali il gas provoca l'evaporazione dell'acqua che aziona i turbogeneratori. Il gas uscente ad elevatissima temperatura consente rendimenti termodinamici molto alti e inoltre la possibilità di fornire calore di processo in alcuni settori industriali come per la produzione di ferro, acciaio e idrogeno. Il moderatore è costituito principalmente da grafite.

#### *4.2.2.6. Reattori di progetto russo (RBMK, VVER)*

I reattori di progettazione russa più diffusi appartengono principalmente alle due filiere indicate dalle sigle RBMK o reattori a canali di potenza elevata e VVER o reattori ad acqua in pressione. La costruzione e l'esercizio dei reattori russi ai tempi dell'Unione Sovietica aveva diverse carenze, legate soprattutto alla mancanza di un sistema di gestione qualità, ad un sistema organizzativo con molte deficienze, alla mancanza di un sistema di apprendimento e di un'autorità di sicurezza indipendente. Oggi, rispetto agli anni passati, sono disponibili maggiori informazioni su tali impianti, grazie ai numerosi programmi di assistenza dei paesi occidentali nei confronti dei paesi dell'est europeo, iniziati dopo il disastro di Chernobyl.

I reattori RBMK sono moderati a grafite e refrigerati ad acqua leggera bollente, incanalata in un sistema di tubi in pressione entro cui sono collocati gli elementi di combustibile e in alcuni casi anche le barre di controllo. Tubi e recipienti collettori distribuiscono l'acqua in pressione all'ingresso dei singoli canali e, all'uscita degli stessi, raccolgono la miscela bifase da cui viene separato il vapore surriscaldato, il quale sarà poi inviato direttamente all'espansione in turbina. A valle del condensatore e delle pompe, l'acqua è nuovamente convogliata nel circuito primario del reattore attraverso scambiatori rigenerativi e pompe di alimento. Il reattore è circondato da schermi biologici in cemento e sabbia ed anche la parte superiore è chiusa da una spessa lastra di cemento. Il reattore RBMK è considerato insicuro, in quanto è molto difficile rendere stabile il flusso neutronico e poiché è praticamente assente un vero sistema di contenimento.

I reattori VVER, invece, sono refrigerati e moderati ad acqua leggera in pressione. Essi hanno un sistema primario con sei circuiti di refrigerazione, ognuno con valvole di isolamento, pompa di circolazione e generatore di vapore. Il turbo gruppo di ogni reattore è costituito da due turbine e il pressurizzatore è collegato alla gamba calda di uno dei sei circuiti ed è fornito di due valvole di sicurezza. Gli elementi di combustibile hanno sezione esagonale e le barre di controllo sono sostanzialmente identiche a quelle di combustibile. Anche questi tipi di reattore però, presentano delle carenze progettuali importanti, quindi sono considerati anch'essi poco sicuri.

### **4.3.Reattori di ricerca**

I reattori da ricerca vengono utilizzati per numerosi scopi tecnici e scientifici nel campo delle prove tecnologiche, della fisica, per l'addestramento del personale e anche per studiare le condizioni di funzionamento di una determinata categoria di reattori. Essi in genere richiedono alti flussi di neutroni termici o veloci, ampio spazio disponibile per le sperimentazioni, mentre non è importante la temperatura di uscita del fluido refrigerante, in quanto il calore viene dissipato nell'ambiente. Fra le ricerche fisiche si possono citare gli studi

sulla riflessione, rifrazione e polarizzazione dei neutroni, l'influenza della temperatura sulla cinetica dei reattori o le misure di energia dei neutroni. Altre importanti ricerche scientifiche si possono compiere in chimica, medicina o biologia, sia direttamente sul reattore sia utilizzando gli isotopi radioattivi che esso consente di produrre. L'ingegneria nucleare si vale dei reattori da ricerca ad esempio per lo studio della purezza dei materiali, per lo studio della resistenza alla corrosione, per il danneggiamento del combustibile ed il suo consumo massimo e infine per lo studio dei dispositivi di protezione. Questa varietà di compiti mostra come siano necessari diversi tipi di reattori e questo rende difficile un'accurata classificazione. I più importanti sono il reattore omogeneo acquoso, dotato di molti fori che consentono di far uscire neutroni e di introdurre materiali da irraggiare, il reattore a piscina, costituito da una vasca ripiena d'acqua che funge da refrigerante e moderatore e un nocciolo disposto in una scatola metallica fissata in alto e infine il reattore MTR, formato da un serbatoio principale entro il quale si trovano gli elementi di combustibile, dal quale l'acqua di raffreddamento viene fatta circolare attraverso un sistema di pompe in serbatoi ausiliari e in un evaporatore.

#### **4.4.Reattori convertitori e autofertilizzanti**

Il fenomeno della conversione, ossia della produzione di materiali fissili a partire da elementi fertili, si verifica in qualsiasi reattore: esso infatti dipende dall'assorbimento dei neutroni da parte dell'uranio. Tuttavia generalmente tale fenomeno è molto limitato e non ha grande importanza pratica, però vi sono dei reattori particolarmente progettati in modo da esaltare questa reazione così da ottenere quantità non trascurabili di nuovo materiale fissile.

I reattori del tipo FBR o reattori veloci autofertilizzanti, utilizzando materiale fertile, producono più fissile di quanto se ne consumi: presentano cioè un fattore di conversione maggiore di uno. Si definisce tempo di raddoppio (generalmente 15 o 20 anni) il tempo in cui il reattore produce una quantità di combustibile doppia rispetto a quella originaria. Nei reattori FBR non esistono moderatori e le fissioni sono provocate da neutroni veloci, non rallentati; inoltre

occorre che l'arricchimento del combustibile sia elevato. Per il raffreddamento del nocciolo si predilige utilizzare del sodio liquido, che consente di ottenere in uno scambiatore di calore, vapore ad alta pressione e temperatura. Si adottano tre circuiti idraulici per il trasferimento di potenza alla turbina: nel primario il sodio asporta calore al nocciolo e lo trasferisce al sodio del circuito secondario, il quale trasferisce ulteriormente energia al generatore di vapore del circuito terziario che comprende la turbina a vapore. Il nocciolo infine è caratterizzato da una parte centrale in cui avvengono le reazioni di fissione e da un mantello radiale periferico in cui hanno luogo le reazioni di fertilizzazione.

#### **4.5.Reattori nucleari a fusione**

La fusione nucleare controllata appare come la futura fonte ottimale, sotto vari punti di vista, per la produzione di energia elettrica. Nonostante gli innumerevoli sforzi economici e scientifici, attualmente non si è ancora individuata un'unica strada sicura che porti alla possibilità di sfruttare industrialmente questo processo che avviene in natura nelle stelle; per questa ragione la fusione è ancora in una fase di ricerca e sviluppo. La fusione è una fonte energetica basata sulla formazione di nuclei ottenuti facendo reagire tra loro nuclei più leggeri all'interno di un gas ionizzato detto plasma, ma sono necessarie altissime temperature. Se l'energia prodotta da fusione divenisse una sorgente sufficientemente economica avrebbe sicuramente un numero significativo di aspetti positivi rispetto a forme più tradizionali di produzione. I vantaggi più universalmente riconosciuti sarebbero l'abbondanza di combustibile, l'assenza di rischi di incidente nucleare, di inquinamento dell'aria, di rifiuti nucleari e di proliferazione per armamenti nucleari. Infatti il deuterio può essere estratto direttamente dall'acqua, il trizio si può generare facendo interagire il litio con i neutroni prodotti dalla reazione stessa, l'unico tipo di scoria sarebbe l'elio, materiale non radioattivo e le centrali a fusione non produrrebbero energia tramite combustibili fossili perciò non inquinerebbero l'ambiente e l'atmosfera. Per gli impianti a fusione sono in corso principalmente due programmi, l'ICF o energia da fusione inerziale e l'MFE o energia da fusione

magnetica, ma in entrambi i casi il funzionamento avviene analogamente: una miscela di deuterio-trizio viene immessa nella camera a vuoto del reattore e portata alle condizioni di fusione; successivamente i neutroni, grazie alla loro energia, vengono assorbiti in un mantello circostante costituito da un moderatore e raffreddato da un metallo liquido come il litio. L'energia dei neutroni viene dissipata attraverso molte collisioni con i nuclei del mantello, creando così grandi quantità di calore che viene rimosso da un refrigerante, il quale lo trasporta ad uno scambiatore di calore e quindi ad un impianto che genera energia elettrica con l'uso di turbine a vapore. Inoltre i neutroni interagiscono con il litio per generare trizio, il quale viene separato per essere reimpresso nel reattore sotto forma di combustibile. La fusione nucleare dunque è una fonte energetica alternativa a quelle attuali e con potenziali vantaggi in termini di emissioni, sicurezza e disponibilità di combustibile, ma per raggiungere la maturità e poter dimostrare la sua competitività anche in termini economici richiede lo sviluppo di tecnologie innovative in molti settori, con un approccio multidisciplinare che ha già portato a progressi e risultati in questo campo.

# CAPITOLO 5

## Sicurezza nucleare

### 5.1.Obiettivi ed elementi di sicurezza nucleare

La sicurezza è una priorità essenziale nella progettazione, nello sviluppo, nella disattivazione e nell'esercizio delle installazioni nucleari. Gli obiettivi di sicurezza per i reattori nucleari consistono nell'assicurare condizioni tali da soddisfare principi di protezione multipli, diversificati e ridondanti. Durante le normali operazioni gli impianti devono garantire margini di sicurezza adeguati per prevenire incidenti e consentire alla popolazione e ai lavoratori di non ricevere radiazioni superiori ai limiti stabiliti, evitando così conseguenze negative sulla salute delle persone e sull'ambiente. Nel corso del tempo si sono create delle reti internazionali di scambio di informazioni ed esperienza inerenti il tema della sicurezza nucleare: degli esempi sono il WANO (World Association of Nuclear Operators), grazie al quale anche gli operatori meno esperti nella gestione di impianti nucleari possono seguire l'esempio e le pratiche messe a punto da altri esercenti più esperti, oppure il WENRA (Western European Nuclear Regulators Association), il quale oltre allo scambio di informazioni ha come scopo l'armonizzazione dei criteri di sicurezza e protezione dei paesi aderenti.

Sin dai primi tempi del nucleare si è cercato di adottare dei principi generali di sicurezza per aumentare l'affidabilità della tecnologia nucleare: si cerca di individuare gli incidenti con metodi statistici deterministici o probabilistici per una maggiore prevenzione, si adotta la garanzia della qualità che consente progressi verso l'ottenimento di prodotti più conformi alle specifiche richieste, si rafforza la difesa in profondità (creazione di vari livelli di difesa indipendenti l'uno dall'altro) e la cultura di sicurezza e infine in alcuni casi si preferisce l'uso di sistemi semplici piuttosto che complessi.

In ogni paese è istituita l'Autorità di Sicurezza Nazionale (ASN), un'agenzia statale indipendente che svolge la funzione di regolamentazione e controllo delle attività connesse con l'uso pacifico dell'energia nucleare. Al fine di svolgere il proprio ruolo l'ASN definisce indirizzi, obiettivi, criteri di sicurezza e svolge attività di valutazione e controllo, definendo regolamentazioni e guide tecniche, imponendo limiti e condizioni per l'esercizio, effettuando ispezioni e potendo richiedere sanzioni per l'esercente. In Italia l'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici (APAT), svolge le funzioni di ASN.

## **5.2.Decomissioning**

Il decommissioning di un impianto nucleare fuori esercizio è definito come l'insieme di tutte le attività necessarie per porre l'impianto in condizioni tali da non costituire un pericolo né per la popolazione né per l'ambiente circostante e per rilasciare il sito senza vincoli di tipo radiologico; rappresenta la parte finale del ciclo di una installazione nucleare e la presenza di materiale radioattivo o fissile richiede precauzioni specifiche di decontaminazione con procedure di stoccaggio e trasporto molto costose. Il decommissioning include insieme le fasi di declassamento, decontaminazione e smantellamento di un impianto nucleare e ha come principali obiettivi la sistemazione del combustibile nucleare esaurito, la minimizzazione e lo stoccaggio dei rifiuti, la riduzione delle dosi impegnate, la rimozione del materiale radioattivo, la completa demolizione dell'impianto e la restituzione del sito per altri usi. Da un punto di vista gestionale viene sempre più ricercata una razionalizzazione e una sistematicità tale da ridurre progressivamente i costi di queste attività di smantellamento e oggi sono disponibili tecnologie ormai mature per svolgerle con successo. Generalmente le centrali di prima e seconda generazione hanno avuto una vita media di 22 anni, contro i 30 previsti, mentre si presuppone che le centrali di terza generazione abbiano un periodo operativo di oltre 40 anni.

### 5.2.1.Stadi del decomissioning

Al fine di poter confrontare le attività di decomissioning svolte nelle diverse parti del mondo, nel 1995 la IAEA ha suggerito di dividere il processo in tre stadi, definiti da due parametri quali lo stato fisico e radiologico dell'impianto e il grado di sorveglianza richiesto per quello stato:

- storage with surveillance: si fornisce una prima barriera alla contaminazione attuando il drenaggio dei liquidi radioattivi, disconnettendo i sistemi operativi, bloccando e sigillando valvole e interruttori e mantenendo costantemente sotto controllo l'atmosfera interna. Questa prima fase richiede mediamente 5 anni, periodo nel quale la radioattività decade;
- restricted site release: fase in cui si rimuovono e si decontaminano le attrezzature e le parti di impianto facilmente smantellabili, lasciando intatto il nocciolo del reattore;
- unrestricted site use: ultima fase nella quale il reattore viene completamente smantellato e tutti i componenti che presentano una residua radioattività vengono rimossi così da permettere il rilascio del sito senza alcuna restrizione o sorveglianza ulteriore.

Questi tre stadi possono essere eseguiti rapidamente in successione oppure possono richiedere molto tempo in modo da permettere una significativa riduzione del livello di radioattività.

### 5.2.2.Strategie di decomissioning

#### *5.2.2.1.Smantellamento immediato (DECON)*

L'opzione DECON prevede che decomissioning inizi subito dopo la cessazione definitiva dell'attività dell'impianto e prosegua fino al rilascio del sito entro alcuni anni. Questa strategia implica il tempestivo completamento dello smantellamento dell'impianto e comporta la rimozione dei rifiuti radioattivi dalla struttura per essere stoccati e smaltiti definitivamente in un altro sito idoneo. Il sistema DECON ha dalla sua il costo minore e la possibilità di riutilizzare il sito

per altri scopi nel giro di pochi anni, di contro invece la maggior dose di radiazione per i lavoratori, il maggior investimento iniziale e la necessità di molto spazio per i rifiuti radioattivi.

#### *5.2.2.2.Custodia protettiva passiva (SAFESTOR)*

Secondo il metodo SAFESTOR l'impianto è posto in condizioni di sicurezza passiva e si pospone lo smantellamento vero e proprio dell'isola nucleare per 40-60 anni. Nel corso del periodo di custodia l'impianto rimane intatto, ma vengono allontanati il combustibile e i liquidi contaminati. Inoltre il decadimento naturale riduce la quantità di materiali radioattivi da trattare e smaltire nel corso delle successive attività di decommissioning. La strategia SAFESTOR ha come vantaggi la riduzione delle dosi assorbite per la popolazione e il minor spazio necessario per i rifiuti, mentre presenta alcune controindicazioni come l'indisponibilità del sito per altri usi, l'esigenza di maggior manutenzione e sorveglianza e infine il maggior costo totale per la decontaminazione e lo smantellamento finale.

#### *5.2.2.3.Incapsulamento (ENTOMB)*

Con la strategia ENTOMB, le strutture, i sistemi e i componenti radioattivi sono racchiusi in una struttura resistente e durevole nel lungo periodo, come per esempio il calcestruzzo, che viene sigillata e refrigerata per assicurare che la radiazione residua non costituisca un pericolo ingestibile. L'edificio risultante viene poi sottoposto ad un programma di manutenzione e supervisione permanente finché il decadimento delle sostanze radioattive non consente l'eliminazione dei controlli normativi. Si tratta di una metodologia utilizzata solo quando si presenta come l'unica soluzione possibile, come è avvenuto nel caso di Chernobyl in seguito al disastro dell'aprile del 1986.

### 5.3.Incidenti nucleari

L'analisi e il riciclo delle passate esperienze ha significativamente contribuito ad evitare le condizioni progettuali e operative che hanno reso possibile gli incidenti avvenuti, grazie allo sviluppo di criteri e pratiche di sicurezza sempre più all'avanguardia. Specie dopo il disastro di Chernobyl è divenuto ben chiaro a tutti che un incidente in un singolo impianto, in un paese anche molto lontano, può avere anche notevoli effetti a distanza.

#### 5.3.1.Stati Uniti: Three Mile Island

Il primo grave incidente ad una centrale elettronucleare accadde il 28 marzo 1979 a Three Mile Island negli Stati Uniti. L'impianto è localizzato in Pennsylvania, sull'isola di Three Mile Island a ridosso del fiume Susquehanna, ed è costituito da due unità indipendenti denominate TMI-1 e TMI-2, entrambe del tipo ad acqua leggera in pressione (PWR) per una potenza complessiva di 1700 MW. Un malfunzionamento della valvola di sfioro del pressurizzatore è stata la causa principale dell'incidente di TMI-2.

##### *5.3.1.1.Eventi*

L'incidente inizia alle ore 4:30 del 28 marzo 1979. L'unità TMI-1 è ferma per il normale ricambio di combustibile mentre l'unità TMI-2 funziona al 97% della potenza nominale. Il circuito dell'aria compressa per la rimozione dei filtri è lo stesso utilizzato per l'azionamento delle valvole sulle condotte di alimentazione secondaria dei generatori di vapore. A causa del malfunzionamento di una valvola nel circuito dell'aria compressa, l'acqua di lavaggio penetra in tale circuito, provocando automaticamente la chiusura delle valvole di alimentazione secondarie dei generatori di vapore. Si arrestano così i turboalternatori ormai privi di vapore, l'acqua del circuito primario non viene più refrigerata e continuando a circolare nel nocciolo, ne aumenta la temperatura e il volume. Dopo qualche secondo la pressione raggiunge il valore di soglia, così viene attivato il sistema per lo spegnimento rapido del nocciolo e si apre la valvola di sfioro del pressurizzatore per evacuare vapore dal circuito primario in

modo tale da far tornare la pressione a livelli normali. Successivamente la valvola dovrebbe chiudersi, invece per un malfunzionamento meccanico rimane aperta e il refrigerante continua ad uscire; gli operatori sono indotti in errore dall'accensione della spia luminosa che segnala l'attivazione del comando di chiusura della valvola. Poco dopo vengono attivate le pompe del sistema ausiliario di refrigerazione del generatore di vapore, per asportare calore all'acqua del circuito primario; il personale però si accorge solo dopo qualche minuto che due valvole erano chiuse e l'acqua così non poteva circolare. Nel frattempo il nocciolo continua a generare potenza senza essere refrigerato e perdendo acqua dal pressurizzatore, fino ad essere allagato dai sistemi di emergenza di raffreddamento, in seguito anche ad un abbassamento repentino della pressione. Gli operatori si trovano in grande difficoltà poiché non era mai accaduto che la pressione diminuisse e il livello dell'acqua fosse così alto; in realtà la pressione diminuisce per la fuga dal pressurizzatore ed il nocciolo resta sempre meno refrigerato. Solo dopo ore viene segnalata l'emergenza generale, grazie al suono degli allarmi di radioattività e ad un'esplosione del contenitore primario che ha fatto temere il peggio.

### *5.3.1.2. Considerazioni e conseguenze*

Le cause principali dell'incidente sono il guasto di una valvola, il cattivo stato di manutenzione e alcuni errori umani. L'incidente ha preoccupato tutto il mondo e ha causato un danno economico che si aggira intorno ai 2 miliardi di dollari, ma non ha avuto conseguenze sull'ambiente esterno, se non il disagio e l'apprensione delle popolazioni vicine. La dose massima misurata all'esterno della centrale è stata di 0,8 mSv e per confronto basta pensare che la dose annuale media causata dal fondo naturale, per un italiano, oscilla tra i 0,5 e i 2,4 mSv. Per fronteggiare l'emergenza il Governatore della Pennsylvania ha invitato la popolazione entro 16 km da Three Mile Island a non uscire di casa per ripararsi da eventuali nubi radioattive, ha fatto chiudere le scuole per 10 giorni e ha invitato le donne in attesa e i bambini ad allontanarsi dalla zona colpita. Sono state fornite inoltre delle fiale di ioduro di potassio stabile il quale

permette di non assimilare la radioattività. In ogni caso tutte queste iniziative prudenziali si dimostrarono poi eccessive.

### 5.3.2.Ucraina: Chernobyl

Il 26 aprile 1986 la centrale ucraina di Chernobyl subì il più grave disastro dell'era dell'utilizzazione pacifica dell'energia nucleare a causa di carenze tecnologiche e di inammissibili errori umani. Oltre ai notevolissimi danni alle persone e all'ambiente, l'incidente ha provocato un radicale mutamento nella filosofia della progettazione e della sicurezza nei reattori nucleari. La centrale sorge vicino alle città di Pryat e Chernobyl, a circa 130 km dalla capitale Kiev e dista 16 km dal confine con la Bielorussia. L'impianto è costituito da 4 reattori RBMK da 1000 MW ciascuno.

#### *5.3.2.1.Eventi*

Quel tragico giorno era programmato uno spegnimento della quarta unità per la normale manutenzione. In concomitanza i tecnici avevano deciso di condurre un esperimento per studiare il comportamento di un turboalternatore, con lo scopo di verificare se in mancanza di alimentazione di vapore alla turbina, il moto inerziale di arresto del turboalternatore fosse in grado di produrre potenza elettrica sufficiente per il funzionamento dei sistemi di emergenza. Il programma di lavoro non aveva ricevuto le approvazioni richieste e l'esperimento era affidato alle responsabilità di un tecnico non specializzato nella conduzione di impianti nucleari.

Dopo aver spento il reattore e aver diminuito la potenza con la disattivazione del turboalternatore, in violazione alle norme di sicurezza, viene isolato il sistema di refrigerazione di emergenza, per evitare che possa intervenire automaticamente durante l'esperimento, e viene disattivato il sistema di regolazione, provocando così uno sbilanciamento del reattore. Come se non bastasse i tecnici disinseriscono più barre di controllo del previsto all'interno del nocciolo e mettono il reattore in condizioni tali per cui non si spenga automaticamente vista l'emergenza. Successivamente il computer

avvisa che il reattore non è più controllabile, ma nonostante ciò gli operatori iniziano l'esperimento chiudendo la valvola di ammissione del vapore al turboalternatore. Il nocciolo non è più raffreddato e si ha una produzione di vapore con rarefazione dell'acqua e aumento del flusso neutronico e della potenza. Solo in questo momento i tecnici si rendono conto dello stato di pericolo e azionano il sistema di emergenza che inserisce le barre di controllo, precedentemente disattivate, nel nocciolo. Dopo pochi secondi si avvertono forti urti, le barre non riescono a penetrare nel nocciolo, la potenza diverge e due esplosioni, dovute all'eccessiva pressione del vapore e alla reazione tra idrogeno e ossigeno, demoliscono l'edificio e scoperchiano il nocciolo esponendolo all'atmosfera. Vengono così proiettati nell'ambiente vapori, gas e frammenti incandescenti di combustibile i quali sono trasportati dal vento. La grafite brucia con l'aria raggiungendo temperature elevatissime e l'effetto camino dell'incendio solleva fino a qualche chilometro di polveri e ceneri radioattive. Nei giorni successivi furono scaricati nel nocciolo migliaia di tonnellate di carburo di boro, dolomite, sabbia, argilla e piombo per cercare di assorbire neutroni e calore e per schermare le radiazioni; il fuoco fu spento ma nel nocciolo, ricoperto da una coltre isolante, aumentò la temperatura e conseguentemente il rilascio radioattivo. Inoltre 400 operai lavorarono per oltre 15 giorni per costruire un basamento di rinforzo in calcestruzzo con un sistema di refrigerazione che limitava i danni nel sottosuolo e nelle falde.

#### *5.3.2.2. Considerazioni e conseguenze*

Le cause del disastro sono da imputare sia ad errori umani, sia a cause tecniche. Le principali carenze progettuali riguardano l'instabilità del reattore a potenza contenuta, la bassa velocità di inserimento delle barre nello spegnimento, la mancanza di un'adeguata struttura di contenimento del nocciolo e la presenza di grafite che brucia in aria. Il particolato pesante dispersosi nell'aria dopo l'incidente si è depositato entro un raggio di 100 km dalla centrale, mentre quello più leggero è stato trasportato per un raggio più ampio ed ha interessato tutto l'emisfero settentrionale. I paesi più contaminati

furono la Scandinavia, l’Austria, la Svizzera e la Germania meridionale, dove il passaggio della nube radioattiva coincise con precipitazioni atmosferiche. La radioattività in Italia raddoppiò in quei giorni e la popolazione fu invitata a lavare accuratamente frutta e verdura, a non bere acque piovane, ad evitare verdure a foglia larga, ad utilizzare latte in polvere o a lunga conservazione e a non nutrire il bestiame con il foraggio fresco. Oltre a 3 operatori morti immediatamente nell’esplosione per traumi e ustioni, nei giorni seguenti all’incidente 28 di 237 operatori ricoverati per sintomi da radiazione acuta morirono entro tre mesi, per un totale di 31 morti. Le operazioni di evacuazione procedettero fino al 1991, mentre del personale tecnico e militare decontaminò la regione circostante la centrale con operazioni di lavaggio e rimozione di suolo irradiato. Il reattore necessitava di essere isolato al più presto possibile assieme ai detriti dell’esplosione, così fu progettata la realizzazione di un sarcofago di contenimento (fig. 13) per far fronte all’emergenza (metodo di decommissioning dell’incapsulamento). Alla popolazione fu somministrato iodio stabile, fu concesso un compenso in denaro ed il controllo medico periodico gratuito; gli effetti sanitari tardivi consistono ancora oggi, nei paesi di Ucraina e Bielorussia, nella comparsa di leucemie e tumori alla tiroide e nella nascita di esseri viventi con malformazioni congenite provocate appunto dalle radiazioni.

Figura 13. Sarcofago a Chernobyl.



### 5.3.3.Giappone: Fukushima

Il disastro di Fukushima comprende una serie di quattro distinti incidenti occorsi presso la centrale nucleare omonima a seguito del terremoto e del maremoto del Tohoku dell'11 marzo 2011. Le maggiori preoccupazioni riguardano quattro dei sei reattori dell'impianto di Fukushima Dai-ichi, in particolare il quarto reattore, il cui edificio è stato quello maggiormente danneggiato dalle esplosioni di idrogeno e nel quale le barre di combustibile a rischio fusione non sono quelle in uso all'interno del recipiente in pressione detto anche vessel, ma quelle stoccate nelle vasche del combustibile esausto, che si trovano quindi al di fuori della struttura di contenimento primaria del reattore. Allo stato attuale sembra che il danno maggiore all'impianto nucleare sia stato inflitto dallo tsunami che ha succeduto il terremoto: l'acqua dell'onda anomala avrebbe infatti messo fuori uso i sistemi elettrici che governano i sistemi di raffreddamento dei reattori della centrale, innescando così la crisi e gli eventi occorsi.

#### *5.3.3.1.Eventi*

Nella giornata dell'11 marzo, dopo il terremoto e il conseguente tsunami, emerse una situazione molto grave entro le zone nucleari dei primi tre reattori di Fukushima, gli unici in funzione, nei quali il reattore era stato fermato automaticamente con successo, ma i generatori diesel avevano subito numerosi danni, lasciando quindi i tre reattori senza energia elettrica per alimentare il sistema di refrigerazione utile a dissipare il calore residuo. Ciò portò la Tepco, società che gestiva l'impianto, a comunicare immediatamente la situazione di emergenza per permettere alle autorità di far evacuare la popolazione residente nelle zone limitrofe. Dopo alcune ore i reattori furono provvisti di generatori mobili in sostituzione di quelli danneggiati e il giorno dopo, a causa del malfunzionamento del sistema di refrigerazione, si constatò all'interno del primo reattore, una pressione interna troppo elevata che provocò una forte esplosione.

Nei primi momenti dell'incidente il secondo reattore non risultava in stato di serio danneggiamento. Dopo tre giorni però, fallito l'intervento di pompaggio di acqua marina e acido borico per raffreddare il reattore e bloccare la reazione a catena, le barre di combustibile si trovarono completamente scoperte e molto probabilmente per questa mancanza di refrigerante si riscontrarono gravi danni al nocciolo e un livello di pressione in aumento. Il 15 marzo si registrò un'altra esplosione.

Per quanto riguarda il terzo reattore dell'impianto di Fukushima, destava particolare preoccupazione il fatto che in esso venisse usato anche del plutonio come combustibile nucleare. In questo reattore, fallita l'operazione di pompaggio d'acqua marina, per alleviare la pressione interna si sono eseguiti degli interventi di rilascio del gas; il 14 marzo tuttavia la situazione diventò incontrollabile e portò ad una terza esplosione dovuta alla fuga di idrogeno, seguita dallo sprigionarsi di fumo bianco: una larga sezione del tetto dell'edificio del reattore venne scagliata verso l'alto e ricadde su altre strutture della centrale. L'area fu evacuata a causa dell'aumento della radioattività misurata.

La quarta ed ultima esplosione avvenne nel reattore quattro, con un conseguente danneggiamento dell'edificio contenente il nocciolo e un incendio nella vasca del combustibile esausto.

#### *5.3.3.2. Considerazioni e conseguenze*

Immediatamente dopo le quattro esplosioni verificatesi la Tepco comunicò l'esistenza di una piccola, ma non nulla, probabilità che la massa di carburante esposto potesse raggiungere la criticità, con potenziali conseguenze disastrose dovute al rilascio prolungato di materiale radioattivo nell'ambiente. Nei giorni successivi all'evento, in seguito alle difficoltà nel ripristino dei sistemi di raffreddamento dei reattori coinvolti e nell'urgenza di doverli refrigerare, viene presa la decisione di inondare d'acqua marina l'esterno dei reattori stessi tramite idranti ed elicotteri. La centrale non rientrerà più in funzione. Le conseguenze principali dell'incidente alla centrale giapponese riguardano l'ambiente con la rilevazione di sostanze radioattive nel latte e negli spinaci,

con la presenza di iodio, cesio e cobalto nei canali di scarico dei primi quattro reattori e con i livelli di radioattività raggiunti in mare, 4400 volte superiori ai limiti ammessi. Inoltre il totale della popolazione evacuata fu di oltre 180.000 persone e si prevede che solo nel 2016 i livelli di radioattività presenti nelle zone vicine alla centrale scenderanno al di sotto della soglia di sicurezza. L'incidente di Fukushima ha sollevato discussioni in vari stati del mondo inerenti al proseguo o meno dell'utilizzo dell'energia nucleare o della continuazione dei suoi programmi di sviluppo: a metà maggio 2011 il primo ministro giapponese decise di abbandonare i piani per la costruzione di 14 nuovi reattori a fissione; circa un mese prima, in Italia, il quarto governo Berlusconi abrogava le disposizioni di legge approvate nel biennio 2008-2010 con le quali era stato deliberato di ritornare ad edificare impianti atomici sulla nostra penisola e sulle quali pendeva un referendum, tenutosi ugualmente, che confermò la volontà dei cittadini italiani di non utilizzare impianti nucleari per la produzione di energia.

# CAPITOLO 6

## Costi dell'energia nucleare

### 6.1. Questioni economiche

Nel mercato dell'energia elettrica, la valutazione dei costi di produzione e di ritorno dell'investimento assume un'importanza primaria. A differenza degli impianti termoelettrici tradizionali, gli impianti nucleari presentano un costo di produzione fortemente dipendente dalle spese di investimento ed è evidente che ciò è dovuto alla grande dimensione degli impianti, agli alti costi delle tecnologie coinvolte e alla maggior durata del periodo di costruzione. I costi del nucleare tuttavia, sono facilmente controbilanciati da una minore incidenza del prezzo del combustibile, la cui provenienza è associabile ad aree geopolitiche molto stabili; inoltre bisogna considerare che le centrali nucleari sono in grado di generare scorte per diversi anni. Di contro, per il settore elettronucleare, va aggiunto un elemento penalizzante rappresentato dalla maggior attenzione per la sicurezza: questo aspetto, da un punto di vista puramente economico, contribuisce ad un ulteriore aumento dei costi di investimento a causa dell'allungamento degli iter autorizzativi, dei tempi di costruzione e del rischio di rallentamenti nella gestione dell'impianto rispetto a quanto preventivato.

### 6.2. Analisi dei costi

L'analisi dei costi di un impianto nucleare fa riferimento alle seguenti principali voci di costo:

- costo del capitale, sostenuto durante il periodo di costruzione dell'impianto, quando hanno luogo gli esborsi per l'acquisto del macchinario e le attività di ingegneria. Questo tipo di costo viene distribuito lungo l'intero periodo di costruzione (5-7 anni), ossia prima

che l'impianto entri in servizio, quindi influisce sui flussi di cassa quando l'avviamento della produzione non è ancora iniziato;

- costo del combustibile, che si divide in costi di acquisto del minerale e arricchimento e in costi per la chiusura del ciclo del combustibile relativi al trattamento del materiale esaurito e il suo riprocessamento. Le fasi di approvvigionamento ed arricchimento del minerale hanno una maggiore incidenza, soprattutto in tempi moderni, considerato anche il fatto che il prezzo dell'uranio è continuamente in ascesa (10 \$/lb nel 2002, 130 \$/lb nel 2007) a causa della maggiore domanda e della conseguente riduzione di scorte dei produttori;
- costi di esercizio e manutenzione (O&M), i quali includono i restanti costi di produzione. Si distinguono in costi O&M fissi, come ad esempio il costo del personale, e costi O&M variabili, dipendenti dell'effettiva produzione dell'impianto durante il periodo di tempo considerato;
- costi di smaltimento delle scorie radioattive, una voce di costo operativo molto importante, che dipende strettamente dal metodo di smaltimento utilizzato. I maggiori livelli di sicurezza adottabili sono raggiungibili con l'uso di depositi geologici di stoccaggio, i quali però hanno costi ingenti oltre che tempi di realizzazione molto lunghi: un esempio citato spesso dai critici del nucleare è il deposito dello Yucca Mountain negli Stati Uniti, che non è stato ancora terminato e fino ad ora ha avuto un costo di oltre 8 miliardi di dollari;
- costi per il decommissioning, sostenuti al termine della vita operativa dell'impianto nucleare;
- altri costi connessi al funzionamento dell'impianto nucleare come i costi di incremento del capitale che considerano ulteriori investimenti aggiuntivi e i costi di assicurazione per i rischi derivanti dal malfunzionamento della centrale.

L'economicità dell'energia nucleare dipende anche dai costi delle fonti alternative. In alcuni luoghi, specialmente dove le miniere di carbone sono molto lontane dagli impianti, l'energia atomica è meno costosa; gli stessi paragoni si

possono effettuare con gas e petrolio. Inoltre la localizzazione del sito influenza gli esiti economici dell'impiego del nucleare, infatti in presenza di un alto numero di centrali e di una filiera produttiva già attiva, il costo unitario di generazione di energia risulta essere inferiore. In definitiva il nucleare può essere competitivo ed è considerato come un'opzione realistica e più o meno conveniente in funzione di una serie di variabili, di natura progettuale o finanziaria.



# CAPITOLO 7

## La situazione in Italia e nel mondo

### 7.1. La situazione energetica italiana

L'approvvigionamento dell'energia elettrica in Italia risulta fortemente dipendente dai combustibili fossili. Tale situazione è andata evidenziandosi negli ultimi anni inseguito all'incremento dei fabbisogni energetici. Secondo i dati forniti da TERNA (Rete Nazionale Elettrica), società responsabile in Italia della trasmissione dell'energia elettrica sulle reti ad alta ed altissima tensione, e riferiti all'anno 2005, dei 302,4 TWh della produzione nazionale lorda, 252,4 TWh (84%) sono energia termoelettrica, 42,5 TWh (14%) sono energia idroelettrica e 7,5 TWh (2%) sono energia geotermica, eolica e fotovoltaica. La maggior parte dell'energia elettrica prodotta nel nostro paese si ottiene da idrocarburi come gas e prodotti petroliferi, con gli svantaggi che ne derivano in termini di sicurezza, approvvigionamenti e volatilità dei prezzi. In Italia la produzione da carbone, che a livello mondiale costituisce la fonte più importante per la produzione di energia elettrica, risulta molto bassa; inoltre la produzione da nucleare, che fornisce attualmente il 17% dell'elettricità del mondo, è assente. Queste condizioni incidono pesantemente sulla bolletta elettrica, la più elevata d'Europa, con un aggravio sui cittadini e con evidenti effetti negativi sulla competitività del sistema industriale nazionale: per le imprese che fanno largo consumo di energia elettrica questi oneri hanno una ricaduta importante sul prezzo del prodotto finito, rendendole meno competitive nel mercato internazionale. Si osserva anche che ormai da anni si verifica un aumento del prezzo del petrolio, che si riflette anche sul prezzo del gas e di conseguenza sul costo dell'energia; la nostra penisola è quindi più sensibile degli altri stati a queste oscillazioni, dipendendo fortemente e in misura maggiore rispetto agli altri paesi europei dall'approvvigionamento di combustibili fossili, i quali hanno un ulteriore effetto negativo, ossia la forte

emissione di gas serra. L'Italia è tra i paesi che, nel mondo, importano la maggiore quantità di energia elettrica; questa ci viene fornita prevalentemente dalla Francia e in parte anche dalla Svizzera e dalla Slovenia. Quasi tutta l'energia elettrica è di provenienza nucleare, sono infatti 21 i reattori esteri distanti meno di 200 km dal confine italiano e proprio questa vicinanza risulta particolarmente idonea per agevolare le esportazioni verso il nostro paese. L'Italia ha quindi rinunciato all'utilizzo dell'energia nucleare entro i confini nazionali, facendone una componente importante del proprio mix energetico attraverso le importazioni.

## **7.2.La situazione nucleare italiana**

Nel nostro paese sarebbe giustificabile una riconsiderazione dell'opzione nucleare nell'ambito di una più efficace politica energetica. Le fonti rinnovabili sarebbero comunque incluse nel mix energetico per ridurre la dipendenza dall'estero e dai combustibili fossili, oltre che per ridurre l'inquinamento energetico. D'altra parte, il nucleare non può essere considerato la soluzione unica per risanare in tempi brevi il sistema elettrico nazionale, ma va visto come parte di un investimento strategico i cui benefici si misureranno nel medio-lungo periodo. Nel dopoguerra, quando si delineavano i primi programmi nucleari mondiali, l'Italia si era proposta un ambizioso piano di sviluppo nucleare e il nostro paese deteneva la leadership europea del settore, subendo però una grave battuta d'arresto dopo il disastro di Chernobyl e il referendum del 1987. E' necessario ricordare che nel settore nucleare alcune industrie italiane come APAT, ENEL, SOGIN, ENEA e numerosi Centri di Ricerca Universitari, hanno ottenuto notevoli successi in ambito internazionale, dimostrando di saper gestire sistemi complessi, come appunto quelli nucleari; dunque le capacità non mancano e sarebbe vantaggioso salvaguardare le conoscenze acquisite, non solo per mantenere aperta un'opzione che tutti i paesi industriali avanzati hanno deciso di conservare, ma anche per condurre le attività correlate alla chiusura dei programmi nucleari pregressi. La sistemazione dei rifiuti radioattivi e lo smantellamento degli impianti dismessi, infatti, hanno un orizzonte

temporale che si protrarrà in un lungo futuro e che verrà in ogni caso alimentato dalla continua produzione di rifiuti radioattivi provenienti dalle applicazioni mediche, industriali e di ricerca.

#### 7.2.1. Il referendum del 1987

L'8 novembre 1987 si svolse in Italia un referendum abrogativo, il cui risultato ebbe l'effetto di fermare la produzione di energia elettronucleare e lo sviluppo del programma nazionale. Il disastro di Chernobyl dell'anno precedente ebbe un effetto determinante nel condizionare l'opinione pubblica sul tema e quindi sull'esito referendario. Il referendum non chiedeva esplicitamente un pronunciamento sull'uso dell'energia nucleare, ma era articolato su tre quesiti strettamente connessi che riguardavano:

- l'abrogazione della norma che consentiva di decidere la localizzazione delle centrali;
- l'abrogazione della norma che stabiliva un compenso ai comuni che ospitavano le centrali nucleari;
- l'abrogazione della norma che consentiva all'ENEL di partecipare ad attività internazionali volte alla costruzione e alla gestione di centrali nucleari all'estero.

Formalmente, quindi, l'uscita del nostro paese dal nucleare non è stata decretata dal referendum, ma dalle successive decisioni politiche, che portarono all'arresto delle quattro centrali nucleari esistenti e alla programmazione del loro smantellamento entro il 2025, oltre all'interruzione dei lavori delle nuove unità in costruzione e quasi completate.

#### 7.2.2. La ripresa del dibattito sul nucleare

Il dibattito politico si è riaperto dopo l'impennata dei prezzi del gas naturale e del petrolio tra il 2005 e il 2008 e ha condotto il quarto governo Berlusconi a ripristinare in Italia una capacità nucleare a fini di generazione di energia elettrica. La proposta dell'allora Ministro dello Sviluppo Scajola era quella di costruire una decina di nuovi reattori con l'obiettivo di arrivare ad una

produzione di energia elettrica da nucleare in Italia pari al 25% del totale. Lo scopo era quello di ridurre le emissioni di gas serra, diminuire la dipendenza energetica dall'estero e abbassare il costo dell'energia elettrica all'utente finale.

### 7.2.3. Il referendum del 2011

Nell'aprile del 2010 l'Italia dei Valori presenta una proposta di referendum sul nuovo programma elettronucleare italiano. La Corte Suprema di Cassazione prima e la Corte Costituzionale poi, danno il via libera per il referendum, che si svolge regolarmente nei giorni del 12 e 13 giugno 2011. Il quesito propone dunque l'abrogazione delle nuove norme che consentono di adottare una strategia energetica nazionale che non escluda espressamente la produzione nel territorio italiano di energia elettrica nucleare. Alle urne il quesito viene validamente approvato con una larga maggioranza, determinando così la chiusura definitiva del programma nucleare italiano.

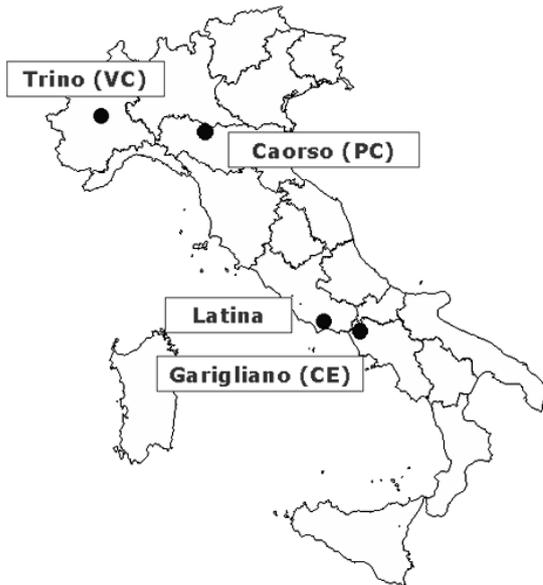
### 7.2.4. Le centrali nucleari in Italia

In Italia, dal 1958 al 1971, sono state costruite e messe in esercizio quattro centrali nucleari (fig. 14), attualmente in fase di smantellamento: Latina, Garigliano (provincia di Caserta), Trino (provincia di Vercelli) e Caorso (provincia di Piacenza).

Centrale	Tipo	Potenza	Inizio costruzione	Inizio esercizio	Fine esercizio
Latina	GCR	210 MW	1958	1963	1986
Garigliano	BWR	160 MW	1959	1964	1978
Trino	PWR	270 MW	1961	1964	1987
Caorso	BWR	860 MW	1971	1978	1986

Tabella 3. Centrali nucleari italiane in fase di smantellamento.

Figura 14. Centrali nucleari sul territorio italiano.



In Italia, parallelamente alla crescita del parco nucleare installato, sono nati numerosi impianti di ricerca e sviluppo, presso le più rinomate università, tra cui anche Padova, dove presso il laboratorio di Legnaro è presente un reattore denominato SN-1. Per quanto riguarda il ciclo del combustibile nucleare e quindi la produzione, l'analisi e il ritrattamento dello stesso sono stati costruiti i seguenti impianti, ora in fase di smantellamento:

- impianto FN (Fabbricazioni Nucleari), situato in provincia di Alessandria con lo scopo di fabbricare il combustibile nucleare;
- impianto EUREX (Enriched URanium EXtraction), presente in provincia di Vercelli, il cui obiettivo era quello di acquisire e sviluppare le tecnologie di ritrattamento del combustibile uranio-plutonio;
- impianti OPEC (OPERazioni Calde) e IPU (Impianto Plutonio), ubicati in provincia di Roma, hanno operato in passato nel campo delle analisi post irraggiamento su elementi di combustibile;
- impianto ITREC (Impianto TRattamento Elementi di Combustibile), sorto in provincia di Matera con l'obiettivo di ritrattare il combustibile uranio-torio.

Per concludere l'argomento bisogna segnalare il grave problema della mancanza di un deposito nazionale per i materiali radioattivi, che si rende necessario per concentrare e mettere in sicurezza i rifiuti provenienti sia dagli

impianti nucleari, sia dalle altre attività che fanno uso della radioattività. Le oltre 500 tonnellate di materiale radioattivo prodotte nel nostro paese ogni anno, sono oggi sistemate provvisoriamente entro depositi temporanei distribuiti su tutta la nostra penisola, talvolta all'interno di strutture non specificamente progettate per questo scopo. Al fine di accelerare la soluzione del problema, la SOGIN a cui è stato affidato il compito di indicare un sito idoneo ad ospitare in via definitiva i rifiuti radioattivi italiani, dopo numerosi studi e analisi, ha maturato la convinzione che il profondo deposito salino di Scanzano Jonico in provincia di Matera, Basilicata, è il più idoneo a questo scopo.

### **7.3.La situazione nucleare nel mondo**

Nel 2005 erano in funzione nel mondo 440 reattori nucleari, distribuiti in 31 paesi, che con una potenza elettrica installata di 365.560 MW, hanno generato il 16,6% dell'energia prodotta a livello mondiale. Il contributo del nucleare alla generazione di energia elettrica si colloca al terzo post, dopo il carbone (39%) e il gas (19,1%), superando l'idroelettrico (16,2%), il petrolio (7,2%) e le nuove fonti rinnovabili (1,9%). I paesi dell'OCSE producono l'85,5% del totale dell'energia nucleare, mentre la restante parte si concentra nei paesi dell'Europa centro orientale e dell'ex Unione Sovietica, con un modesto contributo delle altre aree geografiche, come Asia, America Latina e Africa.

Dalla metà degli anni '70 fino al 2001, una serie di fattori come i rifiuti nucleari, la sicurezza, i costi e la proliferazione, hanno contribuito a rendere incerte le prospettive dell'energia nucleare e a rallentarne l'espansione, ma già da diversi anni appare alquanto visibile nel mondo un fenomeno in controtendenza indicato come "Rinascimento Nucleare". Il nuovo interesse internazionale verso l'energia nucleare è stato particolarmente accentuato dall'attenzione prioritaria nei confronti del riscaldamento globale e le spinte a ridurre la dipendenza dalle fonti fossili, responsabili della maggior parte delle emissioni, potranno dominare le scelte politiche del prossimo futuro. Oltre all'assenza delle conseguenze negative per l'ambiente tipiche delle centrali a

combustibili fossili, l'energia nucleare offre altri vantaggi tra i quali l'aumento del PIL, la creazione di posti di lavoro, il miglioramento della bilancia dei pagamenti dei paesi importatori di combustibili fossili e lo stabilizzarsi dei prezzi di questi ultimi sui mercati internazionali. Per quanto riguarda le prospettive future, si prevede una crescita enorme della produzione di energia atomica, con il raddoppio della potenza attuale e il mantenimento della penetrazione del nucleare nel mix elettrico ai valori di oggi, circa il 16%.



## Bibliografia

Bandini Buti A., 2007, *La Radioattività*, Sandit.

Bandini Buti A., 2007, *Teoria e Funzionamento dei Reattori Nucleari – Fissione e Fusione*, Sandit.

Mainardi E., 2008, *Impieghi dell'Energia Nucleare*, Editoriale Delfino.

## Sitografia

wikipedia.it, agosto 2012.