



Carlo Di Leo

## ABSTRACT

**L'**arricchimento isotopico dell'uranio, cioè l'aumento della percentuale di uranio-235 che costituisce l'isotopo fissile di tale elemento, è il processo più difficile nella produzione di combustibile di uranio, perché gli isotopi dello stesso elemento risultano chimicamente identici. Il processo di arricchimento deve perciò, come sarà chiarito meglio tra breve, essere basato su una proprietà chimica degli isotopi. Il processo di arricchimento dell'uranio per centrifugazione gassosa in cui, mettendo in rotazione un suo composto, se ne separano gli isotopi, potrebbe tra l'altro avere un ruolo determinante nella politica di contenimento della proliferazione nucleare mondiale.

### Introduzione: il combustibile nucleare

L'uranio che viene impiegato nei reattori deve essere estremamente puro, in quanto tutte le impurità presenti potrebbero assorbire



# L'arricchimento dell'uranio e il processo di centrifugazione gassosa

i neutroni, interferendo con la reazione. Il processo di raffinazione varia da paese a paese, ma è fondamentalmente simile a quello usato nelle Officine di Springfield dell'UKAEA, la più grande fabbrica di elementi di combustibile nucleare del mondo. Più di due milioni di elementi sono stati fabbricati qui, in un impianto che comprende processi di raffinazione, conversione e fabbricazione.

Il concentrato di minerale di uranio viene sciolto in acido nitrico e forma nitrato di uranile. Questo viene filtrato, purificato, concentrato e quindi spruzzato in un *letto fluidificato*, che è un alto contenitore di acciaio

inossidabile contenente circa 10 tonnellate di triossido di uranio riscaldato, attraverso il quale viene fatto passare dal di sotto un getto di aria calda compressa. Il nitrato di uranile spruzzato si decompone formando ancora idrossido di uranio, che trabocca quindi in un secondo *letto fluidificato* dove passa dell'idrogeno, che converte il triossido in biossido di uranio. Questo viene trasformato in tetrafluoruro di uranio, o *sale verde* come è chiamato, in un terzo letto fluidificato attraverso il quale transita dell'acido fluoridrico caldo. Se l'uranio deve essere arricchito (cioè aumentato nel suo contenuto in uranio 235), il tetrafluoruro è convertito in esafluor-



Uno dei metodi più usati per arricchire l'uranio è quello che si basa sulla differenza di peso degli isotopi

ruro e trasportato ad un impianto di arricchimento mediante diffusione gassosa. Per combustibili a uranio naturale, il tetrafluoruro è mescolato con magnesio e riscaldato. Si producono così uranio fuso e scorie. I lingotti di uranio puro sono rifusi in forma di sbarre che vengono temprate, lavorate e rivestite di leghe di magnox.

Per i reattori che usano combustibili in forma di ossidi come i Reattori Avanzati a Gas (AGR), l'uranio deve essere leggermente arricchito. Esso viene ottenuto come esafluoruro di uranio dall'impianto di diffusione e convertito in ossido di uranio, dove viene compresso in pastiglie che, per gli AGR, vengono inserite in tubi di acciaio inossidabile e montate a grappoli. Il rivestimento dei combustibili nucleari è molto importante in quanto esso protegge il combustibile dalla corrosione del refrigerante, trattiene i prodotti radioattivi della fissione e, talvolta riveste funzioni strutturali.

Uno dei metodi più usati per arricchire l'uranio è quello che si basa sulla differenza di peso degli isotopi. Mediante questo metodo, detto *a diffusione gassosa* l'uranio viene processato sotto forma di esafluoruro di uranio  $UF_6$ , che è solido a tempera-

tura ambiente ma che sublima in un gas a temperatura leggermente superiore. Le molecole più leggere del gas viaggiano più rapidamente di quelle pesanti. Se, perciò, la mistura di isotopi è in contatto con una membrana porosa, l'isotopo più leggero colpisce la membrana con maggiore frequenza e perciò si diffonde più rapidamente dell'isotopo più pesante.

Un impianto di arricchimento consta in una serie di stadi di diffusione posti *in cascata*, ognuno dei quali consiste di una camera divisa da una membrana porosa. Da una parte della camera la pressione è maggiore che dall'altra ed è qui che entra il gas. Metà di esso si diffonde attraverso la membrana. La metà con meno esafluoruro di uranio-235 ritorna nello stadio precedente. Il gas arricchito viene spedito dalla fabbrica in bombole come quelle usate per gli altri gas. Il grado di separazione raggiunto ad ogni stadio di un impianto di diffusione è molto piccolo, in modo che sono necessarie molte centinaia di stadi. Di conseguenza, gli impianti di diffusione sono enormi, con pompe per far circolare il gas, refrigeranti per rimuovere il calore generato dal pompaggio e strumenti di controllo. Essi consumano energia elettrica come una grande città e sono molto costosi. I tre principali impianti statunitensi sono quello di Oak Ridge, nel Tennessee, che è il primo del mondo, quello di Paducah, nel Kentucky ed infine, quello di Portsmouth, nell'Ohio. L'impianto inglese si trova a Capenhurst, nel Cheshire, quello francese a Pierrelatte. Naturalmente anche altri paesi come la Federazione Russa e la Cina dispongono di impianti del genere. In *figura 1* è schematizzato il funzionamento di un impianto a diffusione gassosa.

### Il metodo di centrifugazione

Oltre al metodo di diffusione ve ne sono altri, tra i quali spicca quello di centrifugazione gassosa. Tale metodo era stato sperimentato all'inizio dell'era nucleare e subi-

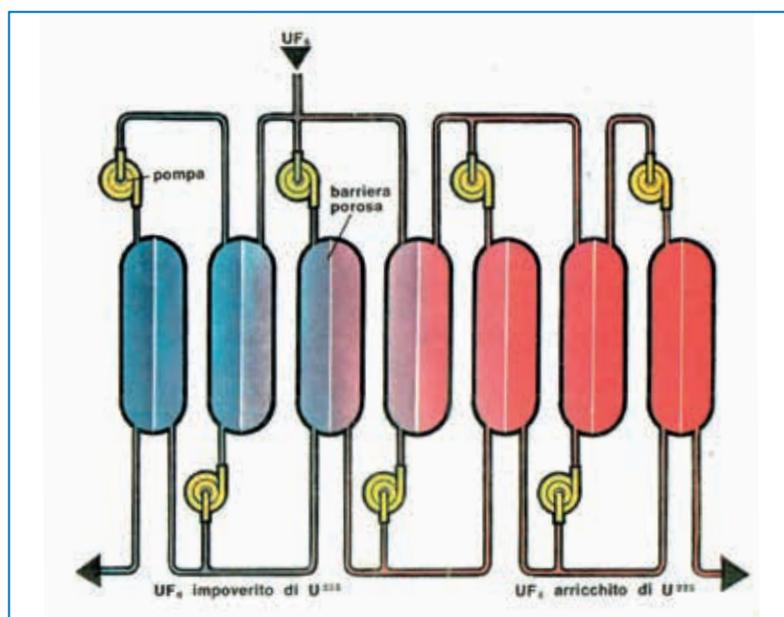


Figura 1 - Schema semplificato di un impianto a diffusione gassosa.

to accantonato, poiché la tecnologia della centrifugazione non si era ancora dimostrata soddisfacente. Attualmente invece lo è, e l'arricchimento per centrifugazione gassosa richiede solo il 4% dell'energia richiesta dall'arricchimento per diffusione gassosa; un incremento del 30% nella capacità di arricchimento può quindi essere agevolmente assorbito dalla rete elettrica nazionale esistente. Come conseguenza della nuova politica, la centrifuga a gas diventerà il perno di un'industria dell'arricchimento dell'uranio valutabile in vari miliardi di euro o di equivalenti dollari.

Ogni metodo di arricchimento (oltre alla diffusione ed alla centrifugazione gassosa esistono altri metodi, almeno su scala di laboratorio) ha lo scopo di aumentare la concentrazione dell'isotopo 235 dell'uranio, che nell'uranio naturale è dello 0,71%. L'uranio-235 è l'unico isotopo fissile esistente in natura e il restante 99,29% di uranio naturale è costituito dall'isotopo non fissile U-238. I due isotopi differiscono leggermente per la massa poiché il nucleo dell'uranio-238 ha tre neutroni in più rispetto al nucleo dell'uranio-235. La differenza di massa fornisce il requisito necessario per la separazione dei due isotopi e quindi per accrescere la concentrazione dell'uranio-235 nel combustibile. Nella diffusione gassosa, la separazione ha luogo perché un composto gassoso, contenente uranio-235 attraversa una barriera porosa a velocità leggermente superiore rispetto a quella dello stesso composto gassoso contenente i due isotopi. Il composto contenente l'isotopo più pesante è spinto contro la parete della centrifuga e la regione centrale del gas viene così ad arricchirsi del composto contenente l'isotopo più leggero. La prima separazione di isotopi dell'uranio per centrifugazione fu effettuata nel 1940 con una centrifuga sperimentale da Jesse W. Beams, dell'Università della Virginia. A quell'epoca tuttavia risultò inadeguata allo scopo la tec-

nologia del macchinario rotante ad alta velocità necessario per produrre uranio altamente arricchito nell'isotopo U-235 per il programma bellico; il metodo della centrifugazione venne quindi abbandonato nel 1943 e venne adottato il processo di diffusione gassosa. (Allora l'energia elettrica costava meno e comunque il costo non sarebbe stato un parametro determinante). Ciò nonostante, i fondamenti teorici della centrifugazione a gas furono elaborati proprio in quel periodo.

In Germania, W. E. Groth riuscì a migliorare le dimensioni, la velocità ed il rendimento delle centrifughe a gas in diversi anni di sperimentazione dopo la Seconda Guerra Mondiale. Alla fine degli anni Cinquanta Gernot Zippe, che aveva svolto esperienze su centrifughe a gas in Germania, suo paese di origine, ed in seguito in Unione Sovietica, fu impegnato in un limitato programma sperimentale all'Università della Virginia, durante il quale sviluppò una centrifuga leggera ma resistente, da cui derivarono gli attuali progetti di dette macchine. Nel 1960, in seguito ai risultati del lavoro di Zippe, la Atomic Energy Commission degli Stati Uniti approvò un programma di sviluppo (con un finanziamento annuo di due milioni di dollari) con lo scopo di ottenere l'arricchimento dell'uranio su larga scala ed in modo economicamente competitivo, mediante la tecnica della centrifugazione gassosa. All'incirca in quel periodo, venne ripristinata la normativa di segretezza che era stata eliminata dal programma dopo la Seconda Guerra Mondiale, probabilmente per evitare di rendere di pubblico dominio informazioni concernenti le modalità di produzione di uranio suscettibile di impieghi militari. Negli ultimi decenni, gli Stati Uniti hanno condotto un rilevante programma di ricerca e sviluppo *altamente classificato* (ossia molto segreto) che è stato svolto sostanzialmente all'Oak Ridge National Laboratory e all'Università della Virginia. L'attuale finanziamento destinato a tale programma sem-



**L'uranio-235  
è l'unico  
isotopo fissile  
esistente  
in natura**



**L'uranio-235  
più leggero  
tende a  
rimanere  
vicino all'asse  
e l'uranio-238,  
più pesante  
tende a  
spostarsi verso  
la parete**

bra sia intorno ai cento milioni di dollari all'anno. Anche numerosi altri Paesi industrializzati stanno attualmente sviluppando la *relativamente nuova* tecnica di separazione. Gran Bretagna, Olanda e Germania hanno da tempo costituito una società tripartita (URENCO) per fornire il servizio di arricchimento per centrifugazione gassosa su basi competitive rispetto alla più classica (ma anche più dispendiosa) diffusione gassosa. L'unico composto dell'uranio che sia gassoso a temperatura normale è l'esafluoruro di uranio ( $UF_6$ ). Migliaia di tonnellate di questo materiale sono già state trattate negli impianti di diffusione gassosa e, pertanto le sue caratteristiche sono ben definite (è altamente corrosivo). Nel processo di centrifugazione, il gas di alimentazione è una miscela di  $^{238}UF_6$  e di  $^{235}UF_6$ : la lieve differenza di peso molecolare delle due specie

viene sfruttata per la loro separazione, che si ottiene mettendo in rotazione il gas ad altissime velocità angolari in modo che il più pesante  $^{238}UF_6$  si sposti verso la periferia, lasciando la zona centrale del gas arricchita nel più leggero  $^{235}UF_6$ .

In *figura 2* si può vedere uno schema di uno stadio di arricchimento per centrifugazione gassosa.

Per incominciare a capire come funzioni effettivamente questo metodo, basterà ricordare che tutti noi abbiamo visto che sottoponendo un liquido a centrifugazione (come la zangola per separare la panna dal siero del latte), la componente più pesante tende a traboccare dal recipiente mentre la componente più leggera tende a rimanere al centro. Lo stesso principio viene utilizzato per arricchire il gas esafluoruro di uranio. In questo caso la differenza di densità tra le due componenti è molto bassa e occorre far girare la centrifuga a velocità altissima (50 000 giri al minuto), mettendo a dura prova il materiale di cui è composto il rotore. Il gas entra dall'alto. L'uranio-235 più leggero tende a rimanere vicino all'asse e l'uranio-238, più pesante tende a spostarsi verso la parete. La temperatura del rotore è più elevata verso l'alto, in modo tale che si instauri una lenta circolazione naturale che faciliti la separazione. Il raggio del rotore è dell'ordine di 10 centimetri e l'altezza supera di poco il metro. Gli stadi sono pochi (decine di volte meno di quelli richiesti dalla diffusione gassosa), ma per ogni stadio vi devono essere migliaia di centrifughe.

La teoria del processo di separazione elementare è semplice e sul suo stesso principio si spiega la variazione con l'altezza della densità atmosferica. Ovviamente la separazione isotopica indotta dalla forza centrifuga che si crea per la rotazione del rotore verticale avviene in senso radiale (orizzontale). Il successo della centrifugazione gassosa sotto l'aspetto economico poggia le sue fondamenta nell'accorgimen-

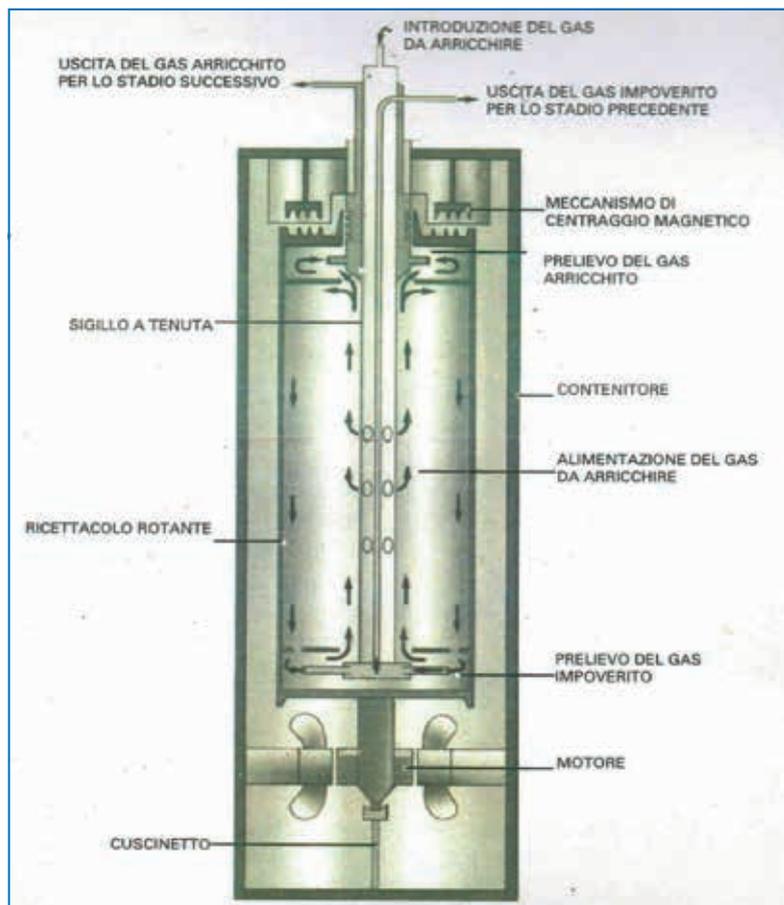


Figura 3 - File di centrifughe nell'impianto di prova componenti.

to di trasformare da radiale ad assiale il senso di arricchimento (con conseguente contemporaneo aumento anche dell'entità dell'arricchimento stesso), trasformazione resa possibile inducendo una debolissima circolazione assiale (nota come flusso di controcorrente) nel moto collettivo di rotazione del gas. In assenza di questa circolazione verticale, l'estrazione della centrifuga degli isotopi separati risulterebbe difficoltosa, mentre, proprio grazie alla sua presenza, il gas arricchito può essere estratto dalla parte superiore della centrifuga e quello impoverito dal fondo. A tutt'oggi sono ancora in buona parte coperti da segreto molti dei dati relativi a dimensioni e velocità delle attuali centrifughe, come pure quelli sui materiali adottati e sui dettagli del progetto meccanico. Sono peraltro ben noti i componenti fondamentali, che consistono essenzialmente in un rotore cilindrico a parete sottile, rotante ad alta velocità all'interno di un recipiente cilindrico. Secondo le informazioni fornite dall'URENCO, la velocità periferica dei rotori sviluppati da questa società raggiunge circa 400 metri al secondo, il gas di alimentazione viene immesso all'interno del rotore presso la parte mediana dell'asse di rotazione, mentre il prodotto arricchito ed il residuo impoverito vengono estratti con continuità dalle due estremità.

La quantità totale di gas all'interno del rotore è limitata dalla pressione di condensazione dell'esafluoruro di uranio, ossia dalla pressione in corrispondenza della quale il gas diventa solido; alla temperatura ambiente tale pressione è di circa 1/6 di bar. Nel rotore il gas si trova altamente stratificato in seguito al moto rotazionale in modo che la pressione al centro risulta nettamente più bassa che in prossimità della parete. Oltre alla limitazione per la quantità di gas presente all'interno del rotore, esiste quella relativa al tasso di alimentazione, che non deve superare valori al di sopra dei quali verrebbe compro-

messa la debole circolazione assiale creata mediante un dispositivo di estrazione collocato sul fondo del recipiente oppure attraverso altri sistemi, quali l'imposizione di un gradiente di temperatura lungo la parete del rotore o il raffreddamento del coperchio del recipiente. Secondo quanto ha reso noto l'URENCO, il tasso di alimentazione delle centrifughe europee ammonta a circa 100 milligrammi al secondo di esafluoruro di uranio. Il recipiente esterno ha due funzioni: anzitutto protegge dalle conseguenze di un'eventuale rottura del rotore in funzione. (i primi rotori si guastavano con una tale frequenza da essere soprannominati *macchine a smontaggio automatico*). La vita media del rotore è un parametro cruciale anche per le attuali centrifughe ed il vantaggio economico della centrifugazione rispetto alla diffusione gassosa verrebbe meno se la durata delle centrifughe, anziché essere di vari anni, fosse soltanto di pochi mesi. La maggior parte dell'attività di sviluppo che viene svolta a Oak Ridge concerne proprio le prove di durata sei rotori.

La seconda funzione del recipiente è quella di costituire un involucro a tenuta di vuoto per il rotore, in quanto l'evacuazione della zona esterna al rotore consente di ridurre il consumo di energia dovuto all'attrito del gas durante la rotazione del rotore stesso. A questo scopo al recipiente è collegata una pompa a vuoto. In figura 3 sono mostrate le file di centrifughe nell'impianto di prova componenti gestito dalla Union Carbide Corporation per conto del Dipartimento dell'energia all'Oak Ridge National Laboratory.

Ciascun cilindro contiene un rotore all'interno del quale viene immesso il gas esafluoruro di uranio. Tale composto contiene l'isotopo fissile uranio-235 che è il costituente minore dell'uranio naturale e l'isotopo uranio-238 non fissile che ne è il principale componente. Il gas viene fatto ruotare ad alta velocità nel rotore e le



**Secondo quanto ha reso noto l'URENCO, il tasso di alimentazione delle centrifughe europee ammonta a circa 100 milligrammi al secondo di esafluoruro di uranio**



Figura 3 - File di centrifughe nell'impianto di prova componenti.

“  
Il gas viene  
impresso  
ed estratto  
dal rotore  
attraverso un  
canale centrale  
fisso

forze centrifughe spostano contro la parete le molecole più pesanti contenenti l'uranio-238, dando origine ad una parziale separazione degli isotopi. Viene a crearsi quindi una circolazione verticale nel rotore a causa di differenze di temperatura e della presenza di un dispositivo di estrazione fisso inferiore in modo da permettere l'estrazione del gas arricchito di uranio-235 dall'alto e del gas impoverito dal basso. In ogni centrifuga può essere immessa solo una piccola quantità di gas e pertanto queste macchine devono essere collegate in *cascata*. Qui sono visibili le tubazioni e la parte superiore delle centrifughe.

In figura 4 è invece riportato uno spaccato che mostra l'interno di una centrifuga. Il rotore a parete sottile è azionato da un piccolo motore elettromagnetico, applicato sul fondo del recipiente cilindrico. L'estremità superiore del rotore è mantenuta in posizione verticale da un cuscinetto magnetico e non tocca alcun componente fisso. Il gas viene immesso ed estratto dal rotore attraverso un canale centrale fisso, ove confluiscono tre tubi concentrici per l'alimentazione, il prodotto arricchito ed il residuo impoverito. Il dispositivo di estrazione fisso

inferiore sporge nel gas in rotazione costituendo una guida meccanica del flusso verticale del gas. Il dispositivo di estrazione superiore, utile per rimuovere il prodotto arricchito, è protetto dall'interazione diretta con il gas rotante grazie ad uno schermo, forato per consentire al gas arricchito di diffondersi nella zona in prossimità del dispositivo di estrazione. Lo schermo impedisce che il dispositivo di estrazione superiore crei un flusso verticale in contrasto con quello fondamentale generato dal dispositivo di estrazione inferiore.

In figura 5 è riportato uno studio del moto del gas nella centrifuga.

Dall'osservazione di questa figura si deduce che il moto del gas nella centrifuga, ha inizio in seguito all'effetto della rotazione (a sinistra) che lo fa muovere contro la parete del rotore in una zona nota come strato di Stewartson, ove ha luogo la sepa-

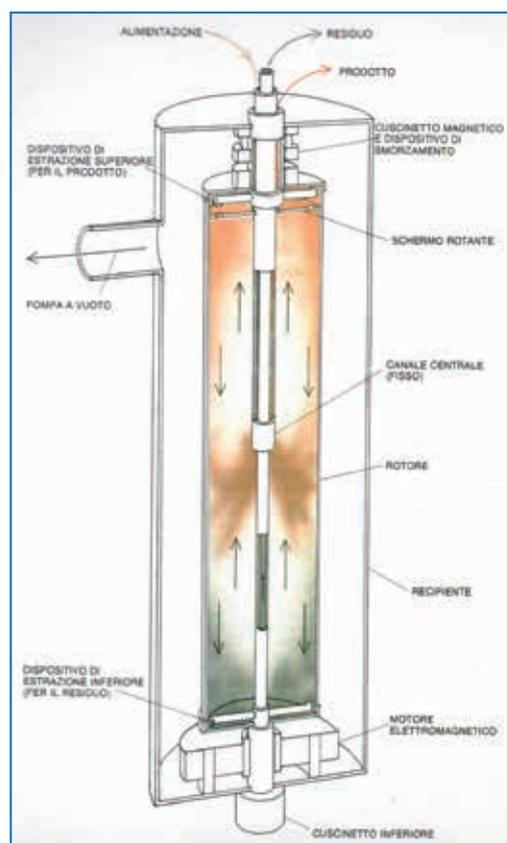


Figura 4 - Spaccato dell'interno di una centrifuga.

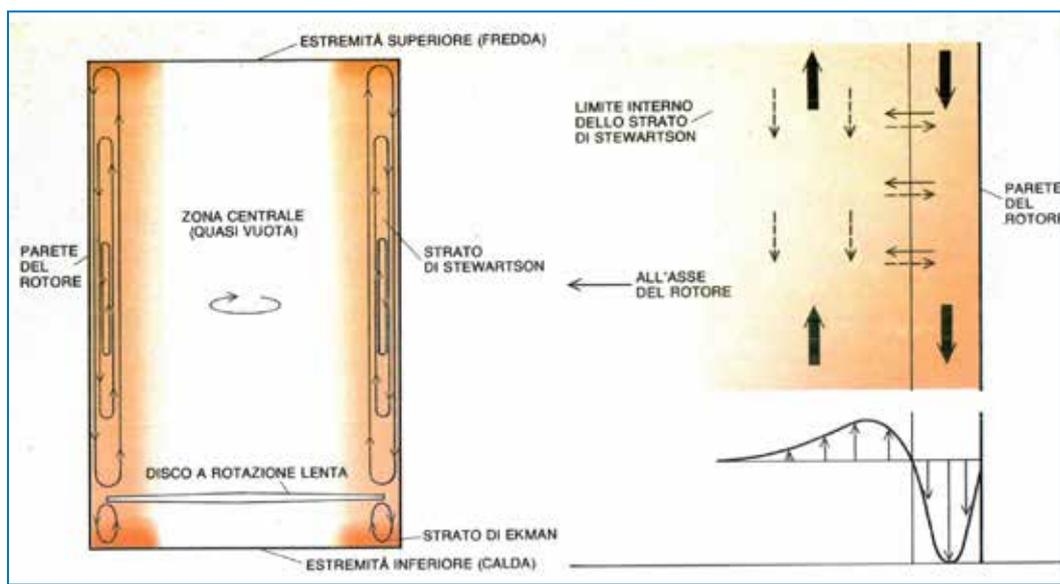


Figura 5 - Studio del moto del gas nella centrifuga.

razione degli isotopi. In seguito alle differenze di temperatura imposte alle due estremità (superiore ed inferiore), oltre che all'effetto del dispositivo di estrazione inferiore (quest'ultimo simulato matematicamente mediante un disco rotante a velocità leggermente inferiore a quella del rotore) si crea una debole circolazione verticale (frecce). Inoltre, alle estremità dello strato di Stewartson si formano sottili zone contenenti gas, note come strati di Ekman, ciascuna dello spessore soltanto di una frazione di millimetro, ove il flusso circolatorio cambia direzione. La circolazione in controcorrente ed il trasporto nello strato di Stewartson (a destra) danno origine all'arricchimento del gas. Le frecce continue sottili indicano la direzione del moto delle molecole di uranio  $^{235}\text{U}$ , indotto dall'effetto di diffusione della pressione che deriva dalla forza centrifuga. Le frecce tratteggiate indicano le direzioni del trasporto di uranio  $^{235}\text{U}$  per diffusione molecolare. Il moto convettivo complessivo del gas è indicato dalle frecce di maggiore spessore. Le parti a ombreggiatura leggera indicano le aree con le più elevate concentrazioni di uranio  $^{235}\text{U}$ . La curva in basso a destra mostra un tipico profilo massa-ve-

locità (le unità sono in grammi per centimetro quadrato per secondo), che caratterizza la circolazione in controcorrente nello strato di Stewartson.

### Caratteristiche della separazione isotopica con centrifugazione gassosa

La separazione isotopica che si ottiene mediante centrifugazione gassosa è retta dalle equazioni di conservazione della meccanica dei fluidi continui, che è quella branca della fisica che riguarda la descrizione del moto dei fluidi (gas e liquidi) mediante i principi di conservazione della massa e dalla quantità di moto. Sebbene le pressioni a cui si trova l'esaurimento di uranio nella zona più centrale del rotore siano così basse da far ritenere più adatta un'analisi con i concetti della dinamica dei gas rarefatti, la quantità di gas presente in quella zona è così ridotta da poter essere tranquillamente trascurata. L'analisi teorica si scinde in analisi idrodinamica e in analisi separativa. L'analisi idrodinamica ha lo scopo di determinare le velocità del flusso gassoso nelle regioni prossime alla parete e alle estremità del rotore. Note le velocità, l'analisi separativa indica le modalità della separazione dell' $^{235}\text{U}$ .



La separazione isotopica che si ottiene mediante centrifugazione gassosa è retta dalle equazioni di conservazione della meccanica dei fluidi continui



**La dinamica di un gas in una centrifuga non può assolutamente esulare da una trattazione matematica rigorosa**

dall' $^{238}\text{UF}_6$  che deriva dall'azione combinata della circolazione gassosa imposta e dalla forza centrifuga, quest'ultima responsabile dell'effetto separatore primario. Nello sviluppo storico, questa successione logica si è svolta in senso inverso. La descrizione matematica della separazione isotopica in un gradiente di pressione è all'incirca identica a quella relativa alla separazione di un gradiente di temperatura. Negli anni Quaranta Karl Cohen del Manhattan Engineer District (cioè del Progetto Manhattan) adattò alla concentrazione gassosa la teoria della colonna di diffusione termica, sviluppata da Wendell H. Furry, R.C. Jones e Lars Onsager. Veniva quindi resa disponibile un'analisi separativa, ma mancavano le conoscenze di fluidodinamica necessarie per farne uso. Nel 1960, l'Atomic Energy Commission istituì un comitato (con a capo Onsager) allo scopo di colmare questa lacuna. L'attuale attività americana sull'idrodinamica della centrifugazione gassosa (che fa capo al Department of Energy) viene svolta da altri valenti scienziati. Parallelamente è proceduta l'attività europea e giapponese sulla teoria della centrifugazione gassosa (sulla quale sono state fatte numerose pubblicazioni).

Se la temperatura della parete del rotore fosse uniforme e se il rotore contenesse solo parti solide in rotazione, il gas si limiterebbe a ruotare come un solido alla stessa velocità angolare del rotore. In pratica, invece il gas viene perturbato da piccole disomogeneità di temperatura alle estremità o lungo la parete del rotore (oltre che dall'effetto del dispositivo di estrazione stazionario, presente sul fondo del rotore, sul gas in moto turbolento nei suoi pressi) le quali creano un tipo di circolazione in controcorrente che si va a sovrapporre al flusso rotatorio fondamentale. Da questa lieve controcorrente dipendono le buone caratteristiche di separazione isotopiche della centrifuga a gas. Per comprendere e prevedere le prestazioni della centrifuga è necessario descrivere la teoria della

controcorrente. La misurazione dell'andamento del flusso gassoso all'interno del rotore in moto è complessa. Gli svedesi e i giapponesi hanno sperimentato a tale scopo la velocimetria laser, una tecnica che impiega la riflessione della luce da parte di piccole particelle presenti nel flusso per la determinazione dell'intensità e della direzione del flusso stesso. La scelta di un metodo così inusuale è dovuta al fatto che i normali dispositivi per la misura della velocità di un fluido (quali i tubi di Pitot connessi alla parete del rotore) presentano instabilità strutturali in un intenso campo di forze centrifughe. Anche se si potessero utilizzare tali tubi, sarebbe sempre necessario sviluppare un metodo di misura a distanza (non a contatto) per estrarre le informazioni che sono così rese disponibili. Il moto del gas viene analizzato per mezzo della soluzione di un sistema assai complesso (che per ragioni di semplicità non viene qui riportato) concernente la conservazione della massa, dell'energia e della quantità di moto. Si tratta di un'analisi consueta nella fluidodinamica, ma in molti casi (per esempio nel caso di flusso di un liquido in un tubo circolare o di flusso di aria su un'ala) le equazioni si possono semplificare drasticamente. Per contro la dinamica di un gas in una centrifuga non può assolutamente esulare da una trattazione matematica rigorosa. Questa difficoltà è peraltro in via di superamento grazie all'impiego dei supercomputer e delle tecniche numeriche, che hanno sostituito quelle analitiche e in questo campo sono particolarmente avanzati gli studi di scienziati francesi e giapponesi. In *figura 6* si può vedere in che modo il principio della cascata viene adottato per l'arricchimento a stadi dell'uranio.

Come si può notare dall'osservazione della *figura*, in ogni centrifuga, l'esfluoruro di uranio viene separato parzialmente in una frazione gassosa contenente l'isotopo più leggero uranio-235 e in una contenente l'isotopo più pesante, uranio-238. La frazio-

ne arricchita di uranio-235 (in colore) fluisce allo stadio successivo, in cui è in atto il trattamento di gas ad arricchimento superiore. La frazione impoverita di uranio-235 (in grigio) fluisce allo stadio inferiore successivo ove viene messa in atto la separazione di gas di arricchimento inferiore.

Il moto assiale fondamentale del gas è mantenuto dalle perturbazioni imposte al fluido rotante dalla disuniformità nella temperatura della parete e dalla presenza nel fluido del dispositivo di estrazione stazionario inferiore. Un'analogia con la fisica dell'atmosfera consente di comprendere chiaramente perché le disomogeneità di temperatura lungo una parete influenzano il moto del fluido. Quando il gas viene in contatto con un'estremità riscaldata, la sua densità diminuisce per l'assorbimento di calore; il gas continua a salire nell'atmosfera, cioè si muove radialmente verso l'interno. In modo analogo, un'estremità fredda provoca lo spostamento del gas verso la parete del rotore. Questo fenomeno, noto come suzione di Ekman, è in grado di provocare la controcorrente verticale lungo l'intera lunghezza dell'apparecchiatura. Un'analogia circolazione è prodotta da una variazione continua di temperatura lungo l'intera lunghezza della parete del rotore; se l'estremità inferiore del rotore è più calda di quella superiore, la circolazione fa muovere verso l'alto il gas che si trova in prossimità dell'asse del rotore e fa muovere verso il basso il gas che si trova in prossimità della parete. L'effetto circolatorio del dispositivo di estrazione stazionario è molto più complesso. Come ogni oggetto fisso immerso in un flusso di gas in moto ad alta velocità, il dispositivo di estrazione tende a riscaldare il gas che lo investe per lo stesso effetto di attrito superficiale che provoca il riscaldamento delle ali e della fusoliera degli aerei supersonici. Il gas riscaldato sale nell'atmosfera. Inoltre la resistenza del dispositivo riduce la velocità tangenziale del gas in rotazione che si contrae in

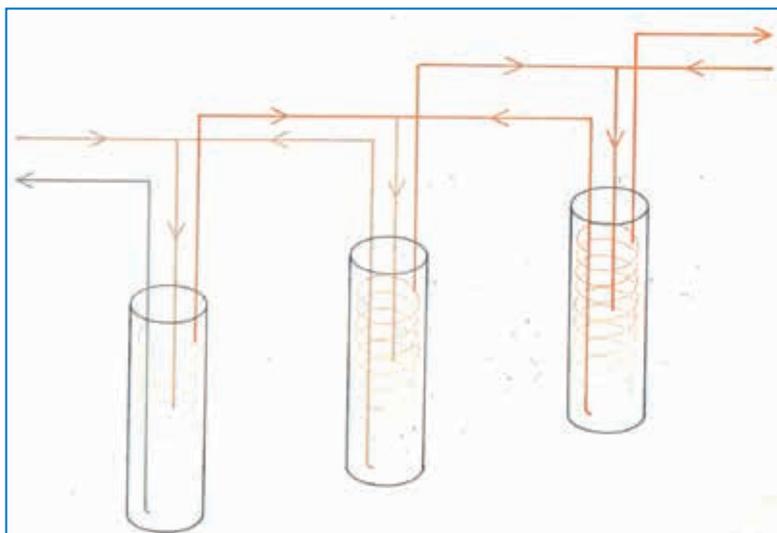


Figura 6 - Funzionamento del principio della cascata.

senso radiale, per mantenere costante la velocità angolare. Pertanto la circolazione creata dal dispositivo di estrazione fissato sul fondo del rotore si svolge nello stesso senso di quella generata da un'opportuna distribuzione di temperatura lungo la parete del rotore e sulle estremità inferiore e superiore, anche se gli andamenti radiali dei due tipi di circolazione assiale non sono identici. Si osserva quindi che con comandi di tipo termico o meccanico si può indurre un flusso assiale in controcorrente nella centrifuga. Le velocità imposte dai due tipi di comando possono essere regolate sia attraverso un opportuno progetto della centrifuga sia mediante un adatto modo di funzionamento. Il comando termico si può variare regolando il livello di raffreddamento dell'estremità superiore e del riscaldamento dell'estremità inferiore del recipiente. Il comando meccanico dipende dalle dimensioni e dalla forma del dispositivo di estrazione inferiore e dalla posizione radiale dello stesso nell'atmosfera gassosa, in prossimità della parete. L'analisi idrodinamica teorica si prefigge lo scopo di calcolare accuratamente il campo di flusso, una volta determinata la natura fisica dei vari comandi e di ottimizzare l'andamento della circolazione per



**L'analisi idrodinamica teorica si prefigge lo scopo di calcolare accuratamente il campo di flusso**



**Il potere separativo di solito viene espresso in chilogrammi di uranio**

produrre la massima separazione assiale possibile degli isotopi di uranio nel gas. Ciò si ottiene risolvendo un'equazione di conservazione che tiene conto di tutti i fenomeni fisici che agiscono sulle due specie isotopiche nel gas che sono:

- forza centrifuga (che coincide con l'effetto di diffusione della pressione) la quale tende a concentrare il pesante esafluoruro di uranio-238 in prossimità della parete del rotore;
- convezione, che potenzia la separazione causata dalla diffusione di pressione, consentendo al flusso più interno diretto verso l'alto, di venire arricchito con continuità passando dall'estremità inferiore a quella superiore;
- diffusione molecolare normale, che è una forza che si oppone alla separazione.

Come risultato netto della reciproca azione dei processi di separazione e convezione, deriva che l'isotopo leggero ( $^{235}\text{UF}_6$ ), si accumula ad un'estremità dell'apparecchiatura, mentre all'estremità opposta il gas risulta impoverito di quell'isotopo. La separazione assiale fornisce la spiegazione del perché, i flussi del prodotto arricchito e del residuo vengono estratti rispettivamente dall'alto e dal basso della centrifuga, anche se il fenomeno di separazione elementare si verifica in direzione radiale. Una misura del rendimento di separazione isotopica di una centrifuga è il fattore di separazione, definito come il rapporto tra la quantità di uranio-235 nel prodotto e la quantità nel residuo. Un tipico valore del fattore di separazione per le prime centrifughe era di 1,25; a tale valore corrisponde, se la frazione di uranio-235 nel gas di alimentazione è 0,71%, come nell'uranio naturale, un contenuto di uranio-235 nel prodotto dello 0,794% e nel residuo dello 0,635%.

A prima vista il fattore di separazione sembrerebbe la misura naturale della capacità di separazione isotopica della centrifuga, ma in realtà non è così. In una centrifuga

di buon rendimento, un alto fattore di separazione è connesso con un alto tasso di alimentazione. Le centrifughe (come qualsiasi dispositivo di separazione isotopica) vengono quindi valutate in base ad un unico parametro di rendimento che tenga conto di entrambi i fattori: tale parametro è detto potere separativo e si basa su un concetto sviluppato nell'ambito del progetto Manhattan da Dirac e Peierls. Tale concetto presenta tre aspetti distintivi: anzitutto comprende in sé la fenomenologia fisica complessiva, dei processi di separazione isotopica, che si verificano nell'unità separativa; in secondo luogo, è funzione del tasso di alimentazione e del *taglio* della macchina (ossia del rapporto tra il tasso di produzione e quello di alimentazione), oltre che dei fattori intrinseci che regolano i fenomeni esplorativi. In terzo luogo, il potere separativo non dipende dalla composizione isotopica del gas di processo.

Il potere separativo di solito viene espresso in chilogrammi di uranio, (e non di esafluoruro di uranio) per anno. Questa unità, definita unità di lavoro separativo (all'anno), è riconosciuta universalmente quale misura del potere separativo delle singole centrifughe (o all'intero impianto di arricchimento all'uranio). Il vero prodotto di un impianto di separazione isotopica non è l'uranio arricchito, ma il lavoro separativo. Con questo concetto viene espressa la capacità di un impianto di produrre sia piccole quantità di uranio ad alto arricchimento, sia grandi quantità di uranio a basso arricchimento. Come è facile intuire, il potere separativo è in qualche modo legato all'effettiva quantità di energia necessaria per far funzionare l'impianto separativo. Questa relazione rappresenta la principale ragione per la scelta della centrifugazione gassosa per le future generazioni di impianti di arricchimento statunitensi. Il consumo specifico di energia di un'unità di diffusione gassosa è circa di 2.500 chilowattora per unità di lavoro separativo,

di cui la maggior parte impegnata nella ricompressione del gas che ha attraversato per diffusione le barriere porose. Il gas deve infatti subire la ricompressione prima di essere immesso nello stadio di diffusione successivo. Per la configurazione sono necessari solo 100 chilowattora per unità di lavoro separativo. Questa energia è impiegata per vincere gli attriti delle parti rotanti, supplire alle perdite elettriche dovute al riscaldamento dei motori e alle perdite di pressione nel corso dell'estrazione del gas e per superare la resistenza aerodinamica del gas di processo contro il dispositivo di estrazione e la superficie interna del rotore. Se i processi di arricchimento in competizione e concorrenza fra loro dovessero essere giudicati solo in base al più ridotto consumo di energia, la centrifugazione gassosa sarebbe nettamente in vantaggio rispetto alla diffusione gassosa. Occorre però considerare anche il costo di fabbricazione delle macchine e la frequenza di sostituzio-

ne delle unità separative: da questo punto di vista il vantaggio è della diffusione. Se si calcola il costo globale del lavoro separativo valutando opportunamente il consumo di energia e l'entità del capitale impiegato, la centrifugazione gassosa rappresenta il metodo di arricchimento economicamente più conveniente. In conclusione, non basta che un sistema di separazione isotopica abbia un elevato fattore di separazione, ma è necessario che anche il tasso di alimentazione sia sufficientemente alto da rendere accettabile il potere separativo. Con il metodo di separazione isotopica per eccitazione laser su cui vengono svolti profondi studi, si possono ottenere alti fattori di separazione, ma non si è ancora riusciti a raggiungere tassi di alimentazione sufficienti a dar luogo a poteri separativi per dollaro investito superiori a quelli relativi alla diffusione e alla centrifugazione gassosa. In figura 7 è schematizzata una configurazione a cascata ideale.

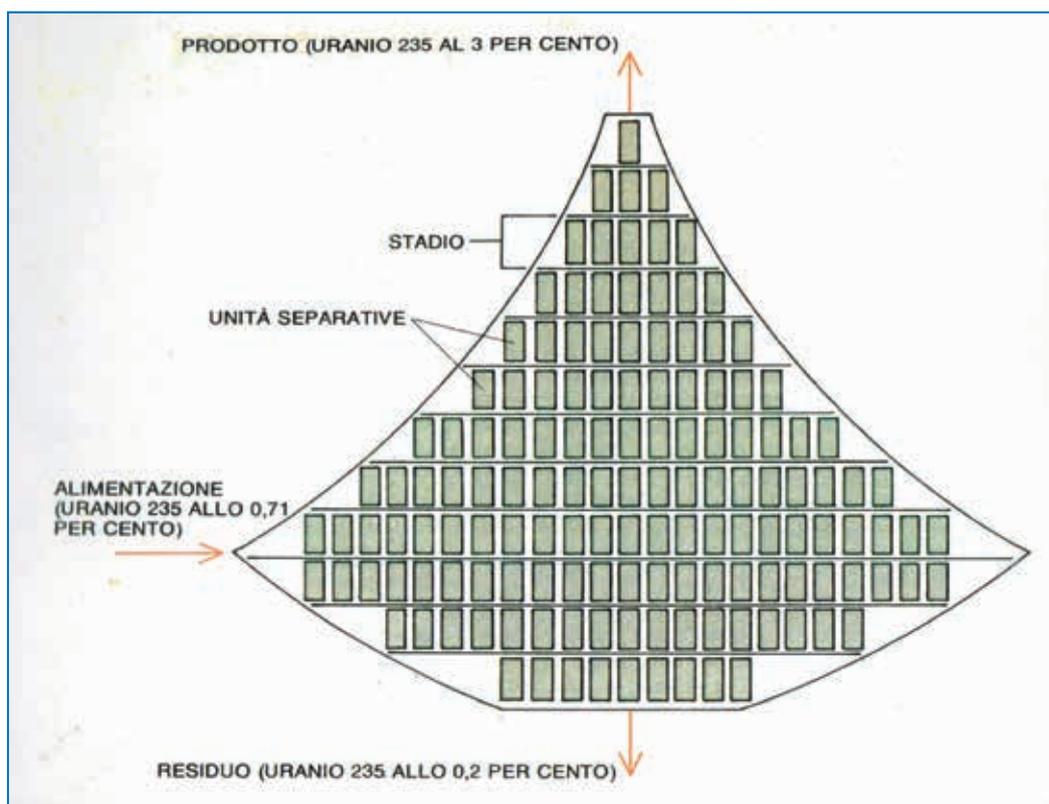


Figura 7 - Configurazione a cascata ideale.



La centrifugazione gassosa rappresenta il metodo di arricchimento economicamente più conveniente

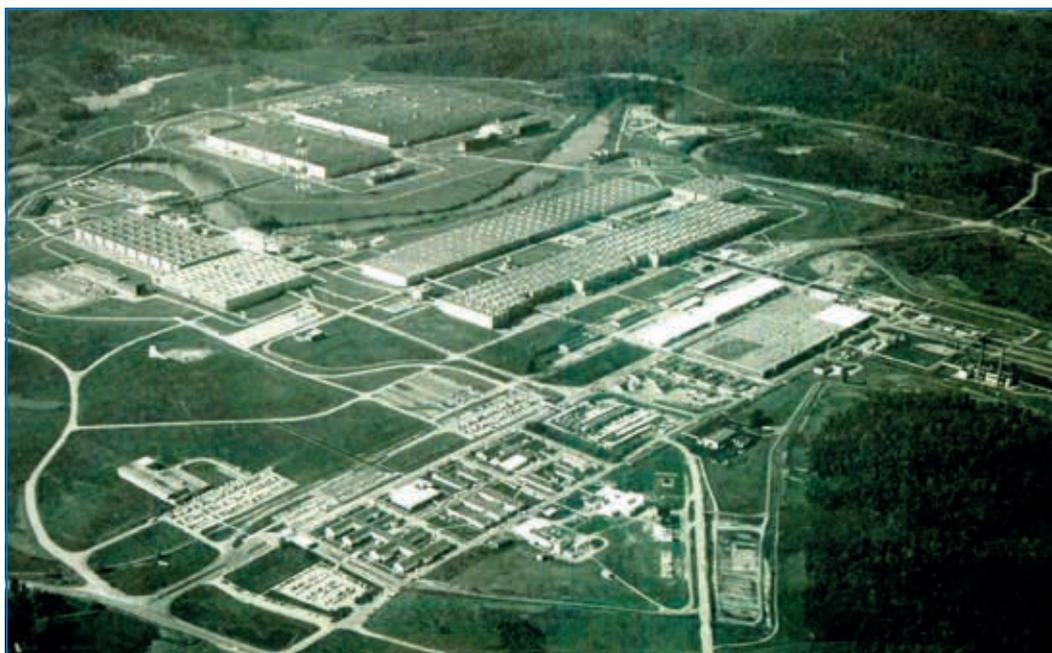


**Il metodo a diffusione si basa sulla diffusione leggermente avvantaggiata dell'uranio-235 rispetto al più pesante uranio-238 attraverso barriere di ceramica porosa**

Come si può vedere dalla figura appena vista, la cascata ideale è costituita da stadi, ciascuno dei quali formato da diverse centrifughe che funzionano in parallelo per fornire il flusso di materiale richiesto. Gli stadi sono connessi in serie per fornire il voluto arricchimento del prodotto ed il relativo impoverimento del residuo. Gli stadi di maggiore dimensione si trovano presso il punto di ingresso del gas di alimentazione, ma poi le dimensioni diminuiscono andando verso le due estremità della cascata. Con questa disposizione si evita sempre il miscelamento di flussi di gas di composizione isotopica disuguale. In *figura 8* è riportata una veduta panoramica di un impianto di arricchimento non per centrifugazione ma per diffusione.

I due edifici paralleli nel centro della foto rappresentano il primo impianto operativo per l'arricchimento dell'uranio con il metodo della diffusione, avendo iniziato la produzione già nel periodo bellico, alla fine del 1944 a Oak Ridge, negli Stati Uniti. L'impianto odierno ora mostrato, e tuttora in fase di potenziamento, produsse nel 1980 uranio arricchito per circa 50 centrali

nucleari del tipo attuale consumando oltre 2 GWe di potenza elettrica per il suo funzionamento. L'arricchimento dell'uranio, con il suo isotopo fissile uranio-235 dalla concentrazione naturale dello 0,7% fino al solito 3-4%, rappresenta un'importante operazione nella preparazione del combustibile nucleare richiesto dalle attuali generazioni di reattori ad acqua leggera (LWR). L'arricchimento presuppone la separazione dell'isotopo uranio-235, che su scala pratica e commerciale viene fatto con metodi di diffusione, di centrifugazione, che è il tema di questo articolo, o con altri metodi come quello dell'utilizzo di ugelli supersonici. Il metodo a diffusione come già accennato all'inizio si basa sulla diffusione leggermente avvantaggiata dell'uranio-235 rispetto al più pesante uranio-238 attraverso barriere di ceramica porosa. Ciò avviene ad esempio nell'impianto Eurodif in Francia che può fornire l'uranio arricchito per 100 reattori nucleari. I compressori che fanno circolare il prodotto gassoso  $UF_6$  nei giganteschi impianti di diffusione consumano un'enorme quantità di elettricità. Si può dire che il 4% dell'elettricità prodotta



*Figura 8 - Impianto di arricchimento per diffusione.*

dalle centrali con reattori ad acqua leggera (LWR) viene usato per l'arricchimento del combustibile che consumano.

### **Economicità della centrifugazione gassosa e tecnologie per migliorare i processi**

La tecnologia della centrifugazione gassosa è essenzialmente una questione economica. Il problema di fondo non è di vedere se il metodo funziona, quanto se è in grado di produrre combustibile arricchito a costi inferiori rispetto a quei processi in competizione cui abbiamo fatto cenno. Inoltre, migliorie nelle prestazioni delle centrifughe vanno cercate relativamente a tre aspetti di fondo: nel progetto costruttivo, nel modo di funzionamento delle singole macchine e nel loro modo di collegamento. Il potere separativo di una centrifuga a gas è determinato sostanzialmente dalla velocità rotazionale e dalla lunghezza del rotore, in quanto aumenta rapidamente con la velocità del rotore ed è proporzionale alla sua lunghezza.

La velocità periferica del rotore è limitata dal rapporto resistenza/densità del materiale di cui è costituita. Le leghe di alluminio e l'acciaio inossidabile consentono di raggiungere velocità del rotore leggermente superiori a 400 metri al secondo. I materiali compositi possono superare le prestazioni dei metalli. Secondo studi europei e giapponesi, sono da prediligere i materiali compositi in poliestere-fibra di vetro del tipo adottato per i volani impiegati per l'accumulo di energia; con tali materiali, la velocità periferica del rotore può superare i 500 metri al secondo. Prestazioni ancora superiori sono ottenibili con materiali compositi in fibra di carbonio, i quali però talvolta hanno un costo troppo elevato. Il limite alla lunghezza delle centrifughe dipende in parte dalla difficoltà del controllo della linearità del rotore e dell'uniformità della parete in una produzione di massa e, in parte, dalla durata del cuscinetto infe-

riore, che deve sostenere il peso del rotore. Un altro aspetto problematico nelle centrifughe con elevato rapporto lunghezza/diametro è quello del raggiungimento delle velocità di esercizio, che si ottiene passando attraverso velocità critiche, cui possono corrispondere ampie vibrazioni.

L'obiettivo di fondo nel progetto delle centrifughe è quello di produrre al minimo costo il rotore più veloce e più lungo possibile. Il passo successivo consiste nell'individuare le condizioni di esercizio, una volta definite le dimensioni e la velocità. A tal fine è necessaria un'oculata disposizione dei vari meccanismi di guida del flusso che influenzano le prestazioni della macchina. Questo aspetto tecnologico è tutt'altro che banale, dato che il potere separativo dipende almeno da sei variabili che influenzano la circolazione interna del gas nel rotore. Il passo finale nel progetto di un impianto per l'arricchimento dell'uranio consiste nella scelta del modo di connessione in cascata delle centrifughe. La cascata non è altro che il collegamento delle singole unità di separazione in una rete più ampia che consente di amplificare l'effetto separativo unitario. Il progetto però di tale rete non è affatto semplice. Immaginando che ogni centrifuga produca materiale con arricchimento in uranio-235 del 12% superiore a quello del materiale di alimentazione, per ottenere una concentrazione di uranio-235 del 3% utilizzabile per il combustibile dei reattori nucleari (partendo dallo 0,71% dell'uranio naturale), occorrerebbe ripetere il processo tredici volte. Altri 11 stadi servono per ridurre nel residuo, a circa lo 0,2% il contenuto di uranio-235 di alimentazione.

In questo semplice esempio occorrono 24 unità connesse in serie per un impianto in cui l'uranio naturale viene trasformato in prodotto arricchito, contenente il 3% di uranio-235 e in materiale residuo allo 0,2%. È difficile tuttavia immaginare, un impianto di separazione isotopico costitu-



**Prestazioni ancora superiori sono ottenibili con materiali compositi in fibra di carbonio, i quali però talvolta hanno un costo troppo elevato**

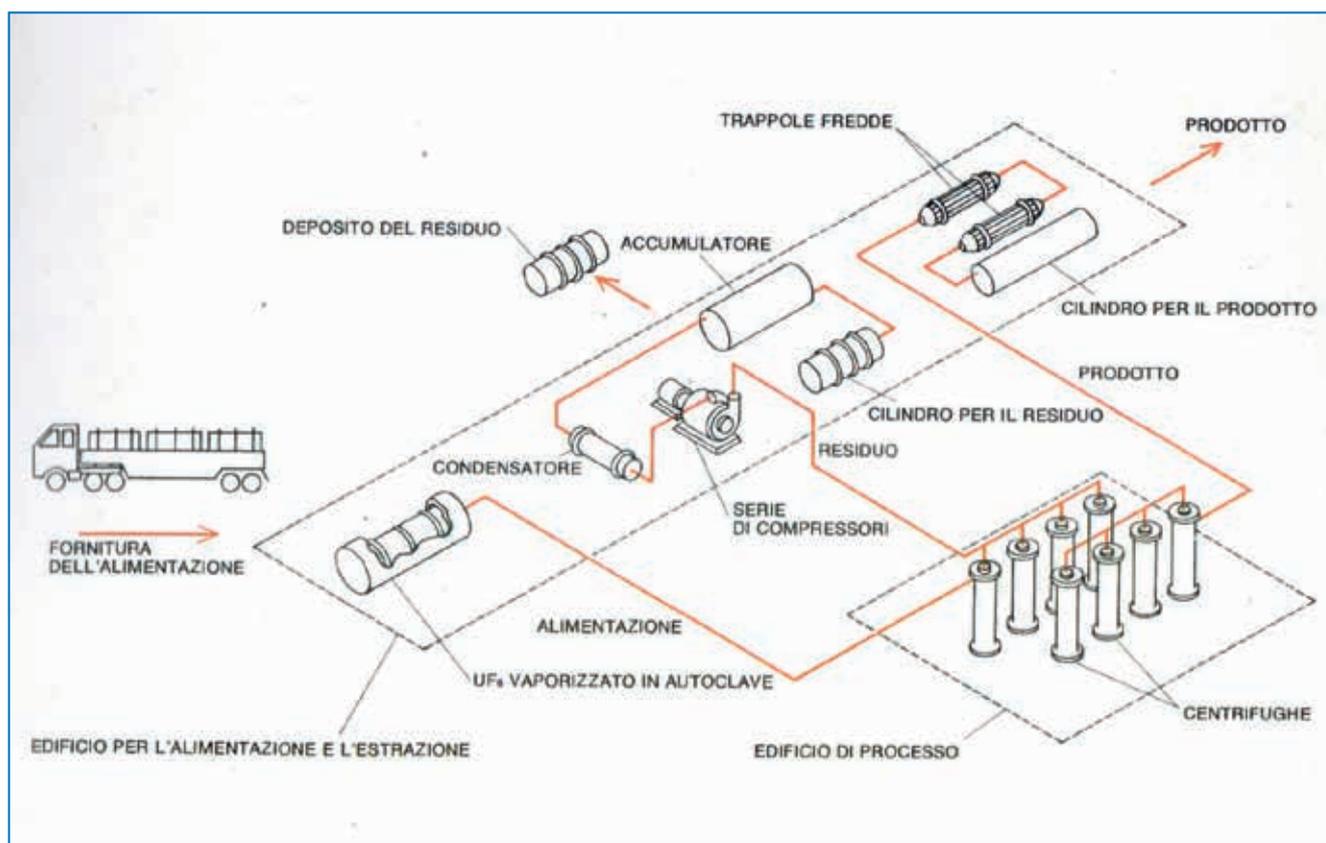


Figura 9 - Veduta generale di un impianto di centrifugazione gassosa.



**Un impianto di arricchimento di grande capacità comporta centinaia di migliaia di file di centrifughe da 24 unità**

ito semplicemente da 24 centrifughe allineate in modo da dar luogo alla necessaria amplificazione dell'effetto separativo. Una simile successione lineare di singole centrifughe può produrre l'arricchimento voluto, ma a causa del basso tasso di alimentazione delle macchine la corrispondente quantità di materiale trattato risulterebbe irrilevante. Un impianto di arricchimento di grande capacità comporta centinaia di migliaia di file di centrifughe da 24 unità. Per fortuna, questo metodo elementare di connessione delle centrifughe non è il più efficiente per la realizzazione di una cascata. All'inizio del progetto Manhattan, si scoprì che per ottenere il massimo rendimento di un impianto di una determinata capacità separativa, costituito di unità di potere separativo fisso, la connessione tra le unità stesse deve seguire una configurazione nota come cascata ideale. Il termine *ideale* indica che ogni volta che due flussi

si miscelano nell'impianto, la loro composizione isotopica non deve variare. Se ciò non avviene, l'entropia, ossia il disordine del sistema aumenta. Alla cascata ideale corrisponde quindi il massimo rendimento possibile della cascata. Si possono escogitare molti tipi di cascata ideale per l'arricchimento dell'uranio con il metodo della centrifugazione gassosa. Compito del progettista è quello di individuare la cascata che sfrutti con la massima efficacia le caratteristiche produttive delle centrifughe che la compongono. In *figura 9* è schematizzato un impianto di centrifugazione gassosa nel suo complesso.

Il diagramma di flusso indica le modalità di funzionamento di un impianto di centrifugazione gassosa. L'es fluoruro di uranio ( $UF_6$ ) giunge all'impianto in cilindri da 14 tonnellate. Tali cilindri vengono scaldati per vaporizzare il composto che viene quindi inviato attraverso tubazioni

alla cascata di centrifughe. Il prodotto, costituito di esafluoruro di uranio arricchito in uranio-235, viene estratto dalla cascata per il trattamento finale e immagazzinato in cilindri da 2 tonnellate per il trasporto all'impianto, ove il composto arricchito viene trasformato in combustibile per reattori nucleari. L'esafluoruro di uranio impoverito viene fatto condensare in cilindri da 14 tonnellate, che vengono quindi immagazzinati in un piazzale all'aperto. L'impianto di arricchimento per centrifugazione gassosa, attualmente esistente a Portsmouth nell'Ohio è costituito da otto edifici di processo (ciascuno delle dimensioni di quattro campi di calcio) e da numerosi altri edifici.

## Conclusioni

Indipendentemente dal particolare sistema adottato per il riciclo del gas all'interno della cascata ideale, il numero delle centrifughe necessario risulta dal quoziente tra la quantità di lavoro separativo annuo della cascata ed il potere separativo delle singole centrifughe che costituiscono la cascata. Le centrifughe dell'URENCO dovrebbero avere un potere separativo compreso tra 2 e 20 unità di lavoro separativo all'anno. Per un impianto di arricchimento della capacità annua di 9 000 000 di unità di lavoro separativo sarebbero quindi necessarie da 500 000 a 5 000 000 di centrifughe.

Dixy Lee Ray, che fu a suo tempo presidente dell'Atomic Energy Commission, nonché governatore di Washington, ha affermato che i modelli di centrifughe statunitensi hanno un potere separativo 10 volte superiore a quello delle centrifughe dell'URENCO. Per i successivi impianti di arricchimento, anch'essi americani, occorsero da 50 000 a 500 centrifughe. Indipendentemente comunque, dal perfezionamento delle centrifughe e dalla configurazione delle cascate, i prossimi impianti di arricchimento per centrifugazione gassosa saranno costituiti da in-

numerevoli unità separative, connesse da chilometri di tubazioni entro i quali scorrono grandi quantità di esafluoruro di uranio.

## Referenze bibliografiche

Tra i lavori specifici sull'arricchimento del combustibile con centrifugazione gassosa citiamo i seguenti:

- Olander Donald R., La centrifugazione gassosa, Le Scienze, edizione italiana di "Scientific American", n.122, ottobre 1978.
- Olander Donald R., Technical Basis of the Gas Centrifuge, in Advances in Nuclear Science and Technology: volume 6 a cura di Ernest J. Henley e Jefferey Lewins, Academic Press, Inc., 1972.
- Avery D.G. e Davies E. Uranium Enrichment by Gas Centrifuge, Milla & Boon Limited, Londra, 1973.
- Villani Stelio, Centrifugation, in "Isotope Separation", American Nuclear Society, 1976.



**L'esafluoruro di uranio impoverito viene fatto condensare in cilindri da 14 tonnellate**



Per quanto concerne invece una bibliografia generale sull'energia nucleare, si segnalano i seguenti testi:

- Ameglio Paolo, Introduzione ai principi di ingegneria nucleare ed all'analisi dei reattori nucleari, E.C.I.G. editore, 1981, Genova.
- Bandini Buti Alberto, Teoria e funzionamento dei reattori nucleari, Sandit, Albino (BG), 2007
- Boffi Vinicio, Fisica del reattore nucleare, voll.1 e 2, Patron, Bologna, 1974.
- Casarelli Giancarlo, Fisica ed ingegneria del reattore nucleare, Edizioni Riata.
- Cumo Maurizio, Impianti nucleari, Casa editrice Università La Sapienza, Roma, 2012.
- Di Leo Carlo, Lucarelli Giorgio, La fusione nucleare controllata: confinamento magnetico, confinamento inerziale, fusione fredda, seconda edizione, Editoriale Delfino, Milano, 2023.
- Errico Giovanni, Pensiero atomico, SUSIL Edizioni.
- Forgone Nicola, Oriolo Francesco, Principi di ingegneria nucleare, generazione e trasporto del calore, Tipografia Editrice Pisana (TEP), Pisa, 2014.
- Leonardi Renzo, L'ABC dell'energia nucleare, Lantana editore, Pavona (Roma), aprile 2011.
- Loizzo Paolo, Le centrali nucleari, ovvero il diavolo che non c'è, Monteleone, Vibo Valentia, 1994.
- Lombardi Carlo, Impianti nucleari, Polipress, Milano, 2012.
- Mainardi Enrico, Impieghi dell'energia nucleare, Editoriale Delfino, Milano, 2008.
- Maizza Vito, Centrali elettronucleari, macchine ed impianti, Laterza, Bari, 1984.
- Mazzoleni Francesco, Introduzione all'ingegneria nucleare, Liguori, Napoli, 1988.
- Milano Guido, Energia nucleare: fissione, fusione, sicurezza e ambiente, Aracne, Roma, 2011.
- Novelli Antonio, Elementi di controllo dei reattori nucleari, Clup, Milano 1988.
- Paci Sandro, Introduzione ai sistemi nucleari, Edizioni Università di Pisa, dicembre 2002.
- Sani Luciano, Centrali elettronucleari, Edizioni Sistema, Roma, 1984.
- Velimirovic Mihajlo, Atlante atomico, Atlante Atomico, Edizioni Capitol, Bologna.
- Zanobetti Dino, Energia nucleare, un dossier completo, Società Editrice Esculapio, Bologna, 2008.
- Zorzoli G.B., Fisica sperimentale dei reattori nucleari, Feltrinelli, Milano, 1971.