ASPETTI TECNICI ED ECONOMICI RELATIVI AL CICLO DEL COMBUSTIBILE NUCLEARE

Dott. Ing. Mario Baccaro (*)

TECHNICAL AND ECONOMICAL ASPECTS RELATING TO THE NUCLEAR FUEL CYCLE

ABSTRACT

Reasonable and logical questions we often ask to ourservels when reviewing a complex system or a device peculiarity are: why has it been projected this way? Why is it so big? Which is the purpose of this component?

The process of an Engineering project is very complex, and the reason why, particular choices are made between the possible alternative actions, is very often obvious.

This article describes and discusses some of the factors that must be kept into consideration when selecting a specific physis configuration of the fuel for a nuclear reactor.

Moreover, it discusses the project criteria and the inter-action between nuclear, thermic and hydraulic phenomena and cost parameters of the fuel cycle.

(*) BRISTOL MYERS SQUIBB COMPANY

Domande ragionevoli e logiche che gli ingegneri spesso si pongono quando esaminano un complesso sistema o particolare di apparecchiature sono: perchè è stato progettato in questo modo? Perchè è così grande? Qual'è lo scopo di questo componente? Il processo di un progetto di ingegneria è complesso, e le ragioni per particolari scelte tra possibilità di azioni alternative spesso sono ovvie.

Poichè vi sono sempre diversi sistemi o componenti di differenti progetti che soddisfano ugualmente un dato requisito di rendimento, lo sforzo è quello di realizzare un progetto che faccia corrispondere, al costo minimo, la massima affidabilità del sistema complesso realizzato. Un progetto di ingegneria è un progetto creativo che combina diversi concetti ed elementi in un insieme unificato e richiede sia sintesi, - l'integrazione di elementi differenti per produrre un sistema che si intenda debba soddisfare un obiettivo dato - che analisi, il processo di smembramento di un sistema per un esame dettagliato.

Sebbene questa analisi riguardi innanzitutto, nel caso presentato, gli aspetti della gestione del combustibile, non bisogna perdere di vista il fatto che analisi e sintesi sono componenti complementari del progetto di ingegneria.

Questo articolo descrive e discute alcuni dei fattori che devono essere tenuti presente nel selezionare una specifica configurazione fisica del combustibile per un reattore nucleare.
Inoltre sono discussi i criteri di progetto e l'interazione dei fenomeni nucleari, termici e idraulici con i parametri di costo del ciclo del combustibile.

INTRODUZIONE

Prima di entrare nel merito della valutazione tecnico-economica si definiscono alcuni dei termini più frequentemente usati nella gestione e nella analisi del ciclo del combustibile nucleare.

IL MATERIALE COMBUSTIBILE

Tra gli elementi esistenti in natura soltanto i nuclei di $_{92}U^{235}$, $_{92}U^{238}$, $_{90}Th^{232}$ possono subire il processo di fissione.

I nuclei dell'isotopo $_{92}U^{235}$ dell'uranio (materiale fissile) subiscono la fissione anche se colpiti da neutroni di bassa energia (neutroni termici), che hanno energia dell'ordine di grandezza di quella delle molecole di un gas a temperatura ambiente (E = 0.025 ev).

I nuclei di $_{92}U^{238}$ e di $_{90}Th^{232}$ subiscono invece, fissione solo se colpiti da neutroni aventi energia superiore a 1,1 Mev (neutroni veloci).

Si possono produrre artificialmente due altri tipi di nuclei suscettibili di fissione, il $_{94}Pu^{239}$ e l'$_{92}U^{233}$ bombardando l'$_{92}U^{238}$ e il $_{90}Th^{232}$ (materiale fertile).

Il $_{94}Pu^{239}$ si ottiene con bombardamento di neutroni i nuclei $_{92}U^{238}$.

$$_{92}U^{238} + o^{n1} \rightarrow {}_{92}U239$$

I nuclei di $_{92}U^{239}$ subiscono due successivi decadimenti radioattivi, con emissioni di particelle β

$$_{92}U^{239} \rightleftarrows {}_{93}Np239 + {}_{-1}\beta^{\circ} \quad T = 2{,}35'$$

$$_{93}Np^{239} \rightleftarrows {}_{94}Pu239 + {}_{-1}\beta^{\circ} \quad T = 2{,}3\ d$$

T (periodo di dimezzamento) è il tempo occorrente per la disintegrazione della metà degli atomi che lo costituiscono.

$$T = \frac{0{,}693}{\lambda}$$

L'$_{92}U^{233}$ si ottiene in modo analogo partendo dal $_{90}Th^{232}$.

$$_{90}Th^{232} + o^{n1} \rightarrow {}_{90}Th^{233}$$

$$_{90}Th^{233} \rightleftarrows {}_{91}Pa^{233} + {}_{-1}\beta^{\circ} \quad T = 23{,}5'$$

$$_{91}Pa^{233} \rightleftarrows {}_{92}U^{233} + {}_{-1}\beta^{\circ} \quad T = 27{,}4d$$

Per i tre tipi di nuclei fissionabili, il numero medio dei neutroni che si libe

rano, a conclusione delle diverse disintegrazioni dei frammenti di fissione nel loro cammino verso la stabilità riferito ad una fissione è il seguente:

	$_{92}U^{233}$	$_{92}U^{235}$	$_{94}Pu^{239}$
Fissioni di neutroni termici	2,55	2,47	2,91
Fissioni di neutroni veloci	2,93	2,42	2,49

Tutti i reattori in commercio contengono insieme materiale fissibile e fertile in concentrazioni oscillanti in rapporto all'uranio naturale.

CARICO DEL COMBUSTIBILE (Fuel loading)

Il carico di combustibile di un reattore è di solito definito come il peso totale del materiale fissionabile (fissile più fertile) nel reattore.

In alcuni casi come con combustibile di lega metallica o combustibile per reattore alimentatore, il loading può essere definito come il peso del solo materiale fissile. Le unità sono kg. o tonnellate materiale (10 kg.).

INVENTARIO DEL COMBUSTIBILE (Fuel inventory)

Questo termine descrive il peso totale del combustibile, e ha le stesse unità del fuel loading. E' di solito più grande tra il 30 e il 100% del fuel loading.

INFORNATA DI COMBUSTIBILE (Fuel Batch)

Un gruppo di identiche pasticche di combustibile che vengono caricate nel reattore viene frequentemente chiamato fuel batch ("lotto" o "infornata").
Il combustibile caricato in ogni ciclo può consistere di diversi fuel batches.

ARRICCHIMENTO DI COMBUSTIBILE (Fuel Enrichement)

Questo termine è usato per descrivere la percentuale di uno specifico isotopo presente in un miscuglio di isotopi dello stesso elemento.

Vengono usati sia percentuali in peso che di atomi.

Viene usato occasionalmente (ma non correttamente) per descrivere il rap

porto del materiale fissile rispetto al combustibile totale (per esempio, la percentuale di plutonio in un miscuglio di plutonio più uranio).

POTENZA SPECIFICA (Specific Power)

La potenza termica prodotta per unità di fuel loading.
Le unità KW/kg. (kg. di materiale combustibile).

DENSITA' DI POTENZA (Power Density)

Generazione di potenza per volume unitario del nocciolo del reattore. E' anche usato talvolta per esprimere la potenza per unità di volume di materiale combustibile. Le unità sono KW/litro.

DENSITA' LINEARE DI POTENZA (Linear Power Density)

Generazione di potenza per unità di lunghezza di un elemento di combustibile. E' molto comunemente usato quando gli elementi di combustibile sono bacchette cilindriche. Le unità sono watt (W)/cm.

CONSUMO SPECIFICO (Specific Burn up)

Liberazione totale di energia per massa unitaria del materiale combustibile caricato nel reattore. E' comunemente espressa in unità di megawatt-giorno (MWD)/kg. di combustibile e MWD/tonn. metriche di combustibile.

FATTORE DI CAPACITA' (Capacity Factor)

Il rapporto tra il livello medio di potenza di un impianto o sistema in un periodo di tempo (di solito un anno) e il livello di potenza stimato. E' di solito minore dell'unità poichè il livello di potenza dell'impianto non può superare l'output stimato dell'impianto,e gli impianti individuali devono far passare del tempo per il rifornimento e per la manutenzione.

EFFICIENZA DI UN IMPIANTO NUOVO (New Plant Efficiency)

Il rapporto tra l'output netto di energiaelettrica e l'energia termica totale prodotta dal combustibile.

TEMPO DI RESIDENZA DEL COMBUSTIBILE (Fuel Residence Time)

Il periodo di calendario tra l'inserzione di un dato batch di combustibile e la

rimozione di quel batch di combustibile dal reattore.

PROGETTO DEL REATTORE E VALUTAZIONE TECNICO-ECONOMICA

Criteri di progetto:

Il primo passo nel processo di progettazione è lo sviluppo di un insieme di obiettivi definiti di rendimento. Questi criteri poi formano la base per valutare un progetto specifico a vari stadi di completamento.

Alternativamente, i criteri del progetto, possono essere usati per selezionare un progetto o un piano di un progetto tra un numero di alternative.

Per un reattore di potenza, uno dei primi criteri per il progetto è che il reattore deve essere capace di fornire uno specifico output di valore con un dato deflusso del raffreddamento e una data temperatura dello stesso, per una durata di vita di operazione di circa 40 anni, durante i quali il reattore conterrà molti differenti modelli di quel loading e varie distribuzioni di potenza.

Criteri addizionali riguardano la sicurezza o affidabilità del sistema del reattore. La Nuclear Regulatory Commission ha stabilito e pubblicato un numero di criteri di progetto per impianti nucleari di potenza, raffreddati e moderati ad acqua leggera che formano la base per la loro valutazione onde concedere il permesso per la costruzione dell'impianto e la licenza per operare. Esempi di questi criteri sono i seguenti:

"Progetto del reattore"

Il nocciolo del reattore e i sistemi associati di raffreddamento, controllo e protezione dovranno essere progettati con un margine appropriato tale da assicurare che i limiti specificati per un progetto di combustibile accettabile, non vengono superati durante nessuna delle condizioni di normale funzionalità, includendo gli effetti di eventi previsti relativi ad operazioni.

"Protezione insita del reattore"

Il nocciolo del reattore e gli associati sistemi di raffreddamento verranno progettati in modo tale che nell'intervallo di potenza operante, l'effetto netto delle immediate caratteristiche inerenti la reazione nucleare tenda a compensare un rapido aumento della reattività. Sebbene superficialmente il primo criterio sembri piuttosto generale, usare i criteri nella valutazione delle domande per il permesso di costruzione di un numero di impianti nucleari di potenza ha dato luogo a una definizione più specifica di alcune espressioni. I

"limiti accettabili" per il progetto del combustibile, per esempio sono generalmente interpretati come condizioni che non consumeranno le perdite dell'integrità del rivestimento del combustibile.

Gli "Avvenimenti previsti" sono specificatamente definiti nei regolamenti come quelle condizioni di normale operazione che ci si aspetta avvengano una o più volte durante la vita dell'unità nucleare di potenza e includono, ma non si limitano alla perdita di potenza di tutte le pompe di ricircolazione, il blocco dell'insieme di generatori e di turbine, l'isolamento del condensatore principale, e la perdita di tutta la potenza. Criteri simili sono stati stabiliti per il sistema di controllo della reattività per i sistemi fluidi e per il contenimento del reattore. Per ottenere il permesso per la costruzione di un impianto e una licenza per operare, devono essere soddisfatti questi criteri o deve essere giustificato l'allontanamento da essi sulla base di una equivalente protezione della salute e della sicurezza dell'ambiente.

Specificazioni tecniche

I criteri che devono essere usati come base per il progetto del combustibile e il funzionamento dell'impianto per ogni sistema generante energia nucleare sono inclusi in un insieme di specificazioni tecniche.

Queste specificazioni tecniche sono accluse alla domanda presentata al NRC e di conseguenza divengono una parte della licenza.

Le specificazioni tecniche devono includere le seguenti informazioni:

1) Limiti di sicurezza ed installazioni di sistemi di sicurezza limitanti.

   I limiti di sicurezza sono limiti su importanti variabili del processo che sono necessari per proteggere l'integrità delle barriere fisiche che difendono dalla liberazione incontrollata di radioattività.

2) Condizioni limitate per il funzionamento.

   Queste sono i più bassi livelli di rendimento delle apparecchiature richiesti per il funzionamento sicuro.

3) Requisiti di sorveglianza.

   Sono requisiti riguardanti il controllo, la calibratura o l'ispezione per assicurare che il funzionamento sia entro i limiti di sicurezza, e che vengano incontrate le condizioni limitanti per il funzionamento.

4) Configurazione del progetto

Includono quelle caratteristiche come materiali da costruzione e sistemazioni geometriche, che dovrebbero avere un effetto significativo sulla sicurezza se venissero alterate o modificate.

5) Controlli amministrativi

Sono provvedimenti che si riferiscono all'organizzazione e alla sua gestione necessarie per presumere un funzionamento sicuro.
Altri criteri di progetto risultano da una valutazione economica dell'impianto che userà il combustibile.
Un esempio di questo tipo di criterio è che il rifornimento del reattore non sarà richiesto durante i periodi dell'anno in cui l'impianto prova la sua massima richiesta di potenza. Un altro ovvio criterio è che le varie attività di gestione del combustibile per un impianto dato debbano essere portate a termine in modo da ottenere il minimo costo di energie per tutto il sistema.
Una volta stabiliti i criteri di progetto per un componente e sistema, essi vengono espressi in termini di limiti di rendimento di riferimento e vengono determinati i parametri del reattore richiesti per operare entro questi limiti. Poichè questi parametri interagiscono in modi complessi, ci sono di solito diversi livelli di progetto in sequenza.
I livelli iniziali indagano su un'ampia gamma di parametri di progetto potenziati usando modelli fisici relativamente poco costosi e non sofisticati. Quando la gamma di variabili che devono essere indagate è ridotta, i modelli di progetto diventano sempre più sofisticati fino alla fase finale del progetto dove uno o eventualmente alcuni progetti alternativi, sono soggetti a una completa e dettagliata analisi di funzionamento.

VALUTAZIONE ECONOMICA

Una delle più importanti caratteristiche del ciclo del combustibile è il costo energetico.

E' opportuno per il nostro scopo suddividere le componenti del costo dell'energia in tre categorie come segue:

A) Costi di lavorazione;

B) Costi di esaurimento;

C) Costi di inventario.

A) Costi di lavorazione

I costi associati con i processi quali il montaggio, la conversione, il trasporto del combustibile consumato e la rigenerazione del combustibile devono essere completamente trascurati durante la vita del combustibile.

Poichè il costo delle varie operazioni di lavorazione è quasi del tutto indipendente dalla produzione di energia del combustibile, il costo per unità di energia generata è inversamente proporzionale al consumo specifico del combustibile.

$$\text{Costo di lavorazione} = \frac{\text{Costo della preparazione e rigenerazione del combustibile ed eliminazione delle scorie}}{\text{Energia generata dal combustibile}}$$

Alcuni costi di lavorazione possono aumentare quando aumenta il contenuto fissile del combustibile, e poichè un più alto contenuto fissile implica un consumo specifico più alto, la relazione inversa tra il costo di lavorazione e consumo specifico per un dato progetto di combustibile può non essere esatta sotto tutte le condizioni.

E' valida tuttavia per una percentuale che è del tutto adeguata allo scopo di ottimizzare i parametri del progetto del combustibile.

B) Costi di esaurimento (svuotamento)

Sono i costi associati con il cambiamento di valore del materiale combustibile stesso.

Includono il costo del materiale, il costo della separazione degli isotopi e il valore del materiale autoprodotto durante l'irradiazione.

$$\text{Costo di esaurimento} = \frac{\text{Valore del materiale fissionabile consumato meno il valore del combustibile consumato}}{\text{Energia generata dal combustibile}}$$

I costi di esaurimento sono dipendenti sia dal consumo che dal progetto. In un reattore progettato per avere un altro rapporto di conversione per esempio i costi di esaurimento sono più bassi di quelli per un reattore con un basso rapporto di conversione. La progettazione per un altro rapporto di conversione, tuttavia, richiede aumenti nelle altre componenti di costo del combustibile. Per esempio quando il consumo di combustibile di scarico aumenta, cresce il costo di esaurimento, compensando la riduzione dei costi di lavorazione associata con il più alto consumo descritto precedentemente.

C) Costi di inventario

C'è una spesa di capitale significativa relativa al ciclo del combustibile in termini di materie prime e lavorazioni. I costi di inventario (a volte chiamati costi di capitale d'esercizio) sono l'interesse o il profitto sugli investimenti associati con questa spesa di capitale. Il maggiore costo di inventario è quello associato con il materiale combustibile stesso. Per due progetti di combustibile, con lo stesso arricchimento di combustibile, il progetto con il più alto valore di potenza specifica avrà il più basso costo di inventario.

$$\text{Costo di inventario} = \frac{\text{Prezzo di interesse per unità di tempo}}{\text{Energia generata per unità di tempo}}$$

Per esempio il numeratore di questa espressione potrebbe essere: spese di conduzione per anno per 1 kg. di uranio.

La maggior parte delle decisioni relative a progetti nucleari e alla gestione del combustibile richiedono compromessi tra queste componenti di costo del combustibile. Un buon esempio ne è la scelta del diametro delle bacchette di combustibile in un reattore, composto di combustibile cilindriche. Il valore limite di densità di potenza lineare è relativamente non sensibile al valore del diametro delle bacchette di combustibile. Se assumiamo la stessa densità media di potenza lineare per due reattori con lo stesso arricchimento di combustibile, ma i diametri delle bacchette differenti per uno o due fattori, le spese di inventario nel reattore con il diametro delle bacchette maggiore saranno quattro volte quelle per il diametro minore. La spesa di montaggio per unità di massa del combustibile per il progetto di diametro maggiore sarà tuttavia molto inferiore e può essere sufficiente la spesa di inventario. Sebbene questo semplice esempio ignori gli effetti dei limiti di temperatura della superficie, della caduta di pressione del nocciolo, e altre caratteristiche di rendimento che variano col diametro delle bacchette, ciò dimostra l'influsso reciproco tra i parametri economici e di progetto del combustibile.

La tabella 1 presenta dei dati di progetto e rendimento di bacchette di combustibile i quali illustrano alcuni di questi effetti. I dati vengono forniti per tre tipi di reattori: PWR, BWR e IMFBR.

TAB. I - PERFORMANCE DI UNA TIPICA BARRA COMBUSTIBILE

	TIPO DI REATTORE		
	PWR	BWR	LMBFR
Diametro barra comb. cm.	0,94	1,25	0,579
Diametro Pellet comb. cm.	0,819	1,056	0,56
Densità potenza lineare max w/cm	426	440	492
Densità potenza lineare media w/cm	178	206	295
Potenza specifica Kw/Kgu	37,8	25,9	126
Consumo specifico MWD/Kgu	33	27,5	100
Frazione fissile di combustibile	0,028 0,031	0,026 0,029	0,12 0,16

PWR (Pressurized water reactor)
BWR (Boiling water reactor)
LMBFR (Liquid metal cooled fast breeder reactor)

I dati di reattori ad acqua si riferiscono a progetti attualmente in funzione, mentre quelli per i LMFBR sono un progetto proposto.

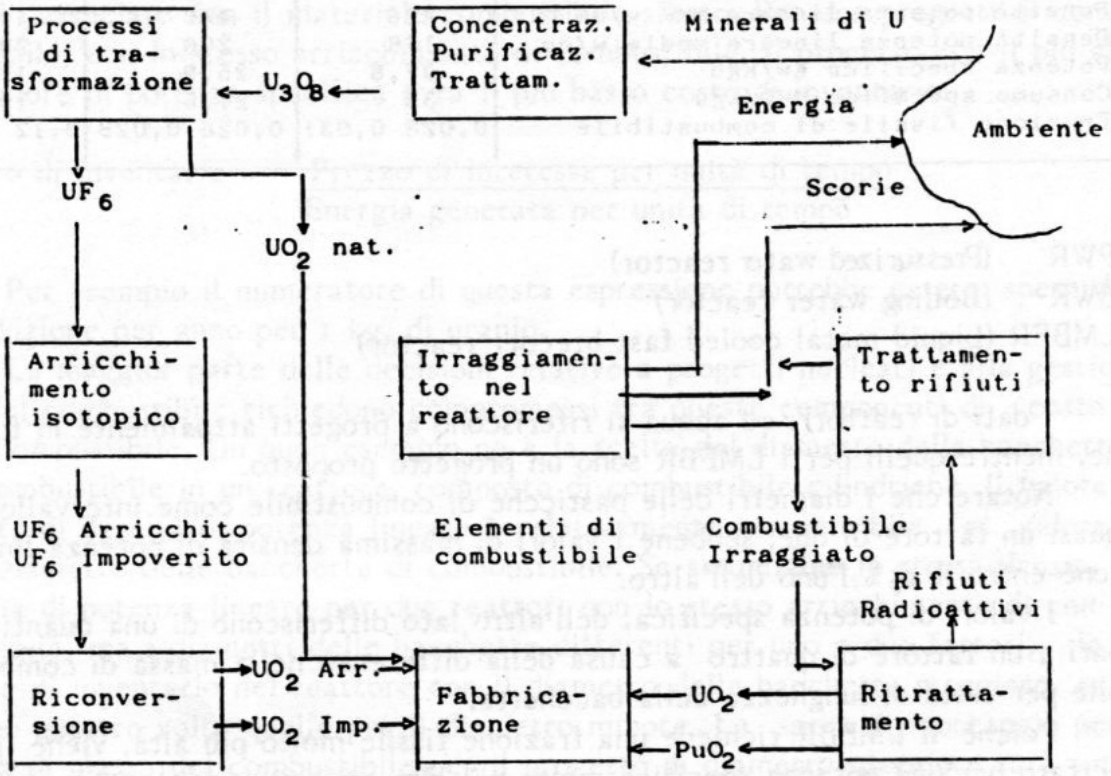
Notare che i diametri delle pasticche di combustibile come intervallo di quasi un fattore di due; sebbene i valori di massima densità di potenza lineare sono entro il 15% l'uno dell'altro.

I valori di potenza specifica, dell'altro lato differiscono di una quantità pari a un fattore di quattro a causa della differenza nella massa di combustibile per unità di lunghezza della bacchetta.

Poichè il LMFBR richiede una frazione fissile molto più alta, viene progettato per una potenza specifica molto più alta per poter produrre le spese di inventario del combustibile con diametro minore.

STUDIO DI UN REATTORE SINGOLO

Consideriamo in una rappresentazione schematica che ne focalizza le fasi più importanti, l'insieme di operazioni che vanno dall'estrazione del minerale contenente uranio fino al ritrattamento del combustibile scaricato dal reattore.



Schema dei fondamentali processi necessari alla trasformazione Uranio - Energia

L'estrazione dei minerali contenenti uranio, come la pecblenda, la davidite e la carnotite, non si differenzia dalle analoghe operazioni per combustibile come il carbonio.

C'è da osservare che, anche se l'uranio è presente nella crosta terrestre come una abbondanza confrontabile se non superiore a quella dei metalli come l'antimonio ed il mercurio, il suo contenuto massimo nei minerali citati si aggira fra l'1% e il 4%.

Ciò obbliga ad introdurre nei normali cicli di combustibile una operazione di concentrazione che consiste in un attacco generalmente acido seguita dalla precipitazione dell'uranio dalla lisciva di attacco e dal suo recupero mediante resine anioniche; il prodotto di tali resine è costituito da (U_3O_8), in cui sono però ancora presenti elementi considerati veleni per un combustibile nucleare, in quanto sono caratterizzati da una grossa probabilità di assorbire neutroni, diminuendo la disponibilità per una reazione a catena.

Si introduce, quindi, un'operazione di purificazione, attuata in virtù della selettività di estrazione di alcuni solventi es. T.B.P. (tributil fosfato).

Il passo seguente è quello della trasformazione degli ossidi in esafloruri (UF_6) tramite fluorazione; tali composti vengono poi impiegati nella fase di arricchimento. La fabbricazione consiste nella preparazione di pastiglie (pellets) di biossido di uranio e nel successivo caricamento nella "camicia" o "guaìna". Una volta utilizzato nel reattore, il combustibile viene sottoposto a ritrattamento per estrarre i materiali pregiati in esso presenti, come Pu e U^{235}.

Il combustibile nucleare, se da un lato è caratterizzato da un ciclo estremamente complesso, dall'altro possiede un elevato "potere calorifico".

Da un kg. di ossido di uranio naturale, tipico combustibile dei reattori ad acqua pesante tipo CANDU, si possono ottenere circa 70.000 kwh.

Un kg. di ossido di uranio arricchito al 3% (reattori ad acqua leggera) fornisce oltre 200.000 kwh, mentre più di 600.000 kwh sono ottenibili da un kg. di ossidi misti di uranio e plutonio (reattori veloci). Queste cifre, che si riferiscono ad un solo irraggiamento e che quindi non tengono conto dell'ulteriore energia ottenibile dal materiale di recupero, danno un'idea dell'elevato contenuto energetico del combustibile nucleare (da un kg. di nafta si ottengono 4,5 kwh). Ciò in pratica si traduce in un'incidenza del costo del ciclo sul costo dell'energia prodotta minore per una centrale nucleare rispetto ad una convenzionale. E' questo un fatto di importanza notevole, in quanto è proprio grazie al basso costo del combustibile che l'energia nucleare può competere con quella convenzionale; i costi di impianto in una centrale nucleare risultano infatti sensibilmente più elevati di quelli di una centrale convenzionale di pari potenza, a causa dei maggiori oneri connessi alla complessità del sistema ed alle salvaguardie che è necessario adottare per ragioni di sicurezza.

A titolo esemplificativo si consideri che, mentre per una centrale conven-

zionale il costo del ciclo incide per circa il 60% sul costo dell'energia, nel caso di una centrale nucleare questa incidenza è ridotta a valori compresi tra il 10 e il 30%: ciò potrebbe far pensare ad un effettivo ridimensionamento dell'importanza del ciclo nei reattori nucleari, il che non è. Il costo specifico di generazione dell'energia prodotta da una centrale è dato dalla somma dei costi di esercizio, di impianto e del ciclo del combustibile:

$$l_t = l_i + l_e - l_c \qquad 1)$$

Ciascuna di queste voci può essere suddivisa nelle componenti dipendenti e indipendenti dal fattore di carico dell'impianto (inteso come rapporto tra l'energia prodotta in un anno e quella teoricamente ottenibile da tutta la potenza installata):

$$l_i = \frac{1}{f}\, l'_i$$

$$l_c = \frac{1}{f}\, l'_c + l''_c$$

$$l = \frac{1}{f}\, l'_c + l''$$

La (1) pertanto diviene:

$$l_t = 1\ (l'_i + l'_c + l'_e) + (l''_c + l''_c) \qquad 2)$$

Il primo termine a secondo membro comprende la parte di costo che, dipendendo dal fattore di carico ma non dalla quantità di enrgia prodotta, viene detta "costo fisso".

Il secondo termine comprende viceversa la parte di costo che dipende solo dall'energia prodotta e che viene indicata come "costo incrementale".
E' da notare che gli impianti nucleari sono caratterizzati da costi incrementali bassi o addirittura negativi.

L'importanza del ciclo è legata anche alla politica dell'approvvigionamento e di conseguenza all'indipendenza energetica; ciò non va inteso, però, in senso restrittivo rispetto all'approvvigionamento della materia prima, bensì rispetto all'insieme di operazioni che vanno dalla raffinazione del minerale alla sua "pellettizzazione" e fra le quali ha primaria importanza l'arricchimento isotopico.

Ultimo fattore che contribuisce a determinare l'importanza del ciclo è quello tecnico; come si sa le caratteristiche del combustibile determinano le prestazioni dei noccioli, sia dal punto di vista della potenza che detti noccioli sono capaci di erogare, sia degli "standard" di affidabilità e di sicurezza che sono in grado di garantire.

Nello sviluppare le considerazioni sul ciclo faremo riferimento a previsioni di fabbisogno basate su di un modello matematico.

Una tecnica assai idonea ad una corretta valutazione del ciclo del combustibile di un reattore nucleare può essere quella di esprimere i bilanci di materia complessivi del reattore e del ciclo esterno, di associare a questi le relative funzioni economiche e di procedere quindi all' ottimizzazione dei principali parametri.

Un tale metodo può essere generalizzato a trattare insiemi di reattori di tipo diverso il cui numero cresce nel tempo con legge stabilita.

Si consideri un reattore di potenza P, che inizi l'erogazione di energia al tempo t_o, e la cui "vita" sia L; se si indica con f il "fattore di carico", l'energia totale erogata dal reattore è:

$$E = f P L$$

Nella figura 1, $\bar{P} = E/L = fP$ rappresenta la potenza media di funzionamento del reattore.

In figura 1, sono pure mostrati i flussi di materiali che attraversano l'impianto di fabbricazione del combustibile (F), il reattore (N) e l'impianto di ritrattamento (R).

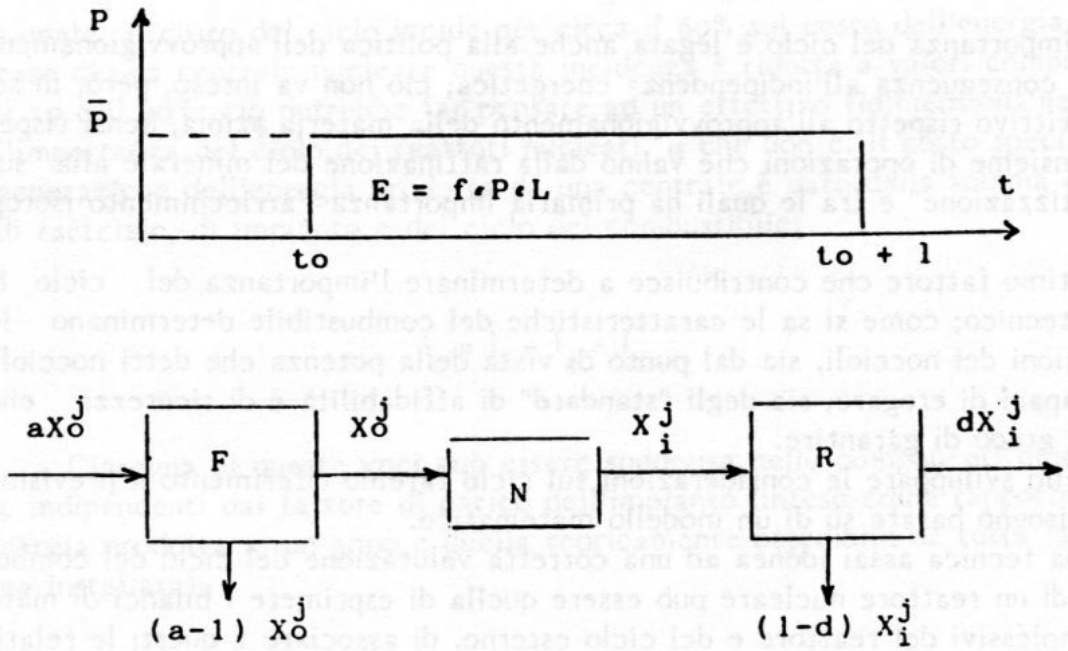


Fig. 1 - Studio di un singolo reattore

Il simbolo X^j esprime il flusso del materiale J (uranio, torio, plutonio, ecc.), i pedici o,1 si riferiscono rispettivamente al materiale in entrata e in uscita dal reattore, a è un fattore (>1) che tiene conto delle perdite di materiale nell'impianto di fabbricazione, d è un fattore (<1) che tiene conto delle perdite nell'impianto di ritrattamento.

Definiamo ancora:

t_F = tempo necessario alla fabbricazione del materiale (comprensivo del trasporto e di altri tempi morti).

t_R = tempo necessario al ritrattamento del materiale (comprensivo del decadimento, del trasporto e di altri tempi morti).

t_B = tempo che intercorre tra l'entrata in funzione della centrale e l'inizio delle operazioni di carico e scarico del combustibile (ossia, primo periodo di funzionamento continuo del reattore).

All'istante t_o viene caricato nel reattore il primo nocciolo di massa $Q_o = \sum_j Q_o^j$; dopo di che, ad intervalli pressochè uguali a partire da t_o, il reattore viene alimentato ad ogni arresto con combustibile fabbricato in F, fino a che, al tempo $(t_o + L)$ viene scaricato dal reattore l'ultimo nocciolo di massa $Q_I = \sum_j Q_I^j$.

In realtà , dunque, il caricamento del combustibile avviene in modo discontinuo, ad intervallo di tempo dipendenti dalle caratteristiche del reattore e dal tasso di combustione fissato per lo scarico degli elementi di combustibile irragiati.

Per una trattazione analitica del problema è però possibile esprimere i flussi di materiale verso e dal reattore in modo continuo, attraverso grandezze medie nel tempo.

E' in questo senso che i flussi indicati con X in fig. 1 vanno intesi, e pertanto possono essere espressi in kg. per unità di tempo.

Da quanto si vedrà in seguito, appare opportuno, nella espressione del flusso di materia, tenere separato il termine che esprime il caricamento iniziale (che rappresenta la quantità di combustibile che rimane permanentemente immobilizzata nel reattore) dal termine di flusso di materia vero e proprio al quale concorrono i caricamenti successivi a partire dall'istante $(t_o + t_B)$, può essere espresso nel modo più generale della seguente espressione (nella quale $X_o = X_o^j$) :

$$\Phi_o(t) = Q_o \cdot \delta(t_o) + X_o \, U(to\ t_{BL}) \qquad 1)$$

La (1) esprime il flusso $\Phi_o(t)$ come somma di due termini: il primo, a carattere istantaneo, si manifesta all'istante t_o in corrispondenza della prima carica; il secondo, costante nel tempo dall'istante $(t_o + L)$ rappresenta in modo continuo i caricamenti successivi e, come si vedrà in seguito, è proporzionale al fattore di carico del reattore.

Analogamente, il flusso totale in uscita dal reattore è dato dalla seguente espressione (nella quale $X_I = \sum_j X_I^j$):

$$\Phi_I(t) = Q_I \cdot \delta(to + L) + X_i \cdot U(to\ t_s\ L) \qquad (2)$$

Il flusso del materiale all'ingresso dell'impianto di fabbricazione può essere espresso in maniera analoga, tenendo presente che il combustibile da caricare nel reattore all'istante generico t deve entrare in fabbricazione all'istante $(t - t_F)$:

$$\Phi_F(t) = aQo \cdot \delta(to - t_F) + a\,X_o \cdot U(t_o, t_B - t_F, L - t_F) \qquad (3)$$

Il flusso di materiale all'uscita dell'impianto di ritrattamento, infine, è esprimibile tenendo conto del ritardo t_R rispetto all'uscita del reattore:

$$\Phi_R(t) = d \cdot Q_i \cdot \delta(t_o + L + t_R) + d \cdot X_i \cdot U(t_o, t_B + t_R, L + t_R) \qquad 4)$$

Sovente, nelle valutazioni sul ciclo del combustibile, risulta utile far riferimento ai flussi medi in un certo intervallo t, generalmente assunto uguale ad un anno:

$$\Phi_{\Delta t}(t) = \frac{1}{\Delta t} \int^{\Delta t} \Phi t \; dt \qquad 5)$$

Se, ad esempio, ci si riferisce al flusso di fabbricazione si ha:

$$\Phi_{F,\Delta t}(t) = \frac{a}{\Delta t} \left[Q_o \int^{\Delta t} \delta\,(t_o - t_F)\, dt + X_o \int^{\Delta t} U(t_O, t_B, - t_F, L - t_F)\, dt \right] \qquad 6)$$

in cui, per le proprietà delle funzioni δ e U, il primo integrale è diverso da zero solo se il Δ t considerato comprende l'istante $(t_o - t_F)$, mentre il secndo integrale è diverso da zero per tutti i Δ t totalmente o parzialmente

tra $(t_o + t_B - t_F)$ e $(t_o + L - t_F)$.

Le relazioni da (1) a (4), che esprimono l'andamento temporale dei flussi Φ_o ; Φ_I , Φ_F, Φ_R, possono essere scritte in modo diverso se le grandezze Q_o, Q_I, X_o, X_I, vengono definite in funzione delle seguenti quantità:

K_o = quantità di materiale necessaria per la carica iniziale per unità di potenza del reattore, calcolata all'ingresso dell'impianto di fabbricazione;

K_I = quantità di materiale prodotta dal recupero dell'ultimo nocciolo, per unità del reattore, calcolata all'uscita dell'impianto di ritrattamento;

C_o = quantità di materiale consumata annualmente, per unità di potenza media di funzionamento del reattore, calcolata all'ingresso di F;

C_I = quantità di materiale recuperata annualmente, per unità di potenza media di funzionamento del reattore, calcolata all'uscita di R.

In base a tali definizioni, se P è la potenza dell'impianto, risulta:

$$Q_o = \frac{P \quad ko}{a} \qquad Q_I = \frac{P\ ki}{d}$$

$$X_o = \frac{P \quad Co}{a} \qquad X_I = \frac{P\ Ci}{d} \qquad 7)$$

Sostituendo la (7) nelle relazioni precedenti si esprimono i flussi di materiale in funzione di K_o, K_I, C_o , C_I; ad esempio la (6), trascurando i tempi di ritardo, si può scrivere come:

$$\Phi_F \Delta t^{(t)} = \frac{1}{\Delta t} (P\ k_o) + (f\ P\ C_o) \qquad 8)$$

essendo il primo termine diverso da zero solo se Δt comprende $(t_o - t_F)$, e il secondo termine diverso da zero solo se Δt è in tutto o in parte compreso tra $(t_o + t_B - t_F)$ e $(t_o + L - t_F)$.

A loro volta, le grandezze K_o, K_I, C_o, C_I, che scompaiono nelle (7) possono essere messe in diretta relazione a due parametri fondamentali del nocciolo del reattore: la potenza specifica e il tasso di combustione (o "burn - up").

La potenza specifica P_s, definita come la potenza generata dall'unità di massa del combustibile metallico, può essere ricavata dalla potenza volumetrica P_v, definita come la potenza generata nell'unità di volume effettivamente occupato dal combustibile, tramite la relazione:

$$P_v = P_s \cdot s \cdot \rho \cdot m \qquad (9)$$

ove s ($\leq$ 1) è un coefficiente che tiene conto della composizione chimica del combustibile (metallo, ossido, ecc.) ρ è la sua densità teorica, m ($\leq$ 1) è un coefficiente di compattazione che tiene conto dei vuoti presenti nel combustibile (ad esempio le porosità inglobate a seguito del processo di fabbricazione). Dal valore di P_s, espressa normalmente in kW/gr di combustibile metallico, è immediato risalire all'immobilizzo k_o. Poichè di solito ci si riferisce alla potenza elettrica generata dall'impianto (espressa in MWe), comparirà anche il rendimento termico-elettrico η :

$$K_o = \frac{a}{\eta P_s} \quad (kg/MW_e) \qquad (10)$$

Ad esempio, se ci si riferisce ad un reattore ad acqua leggera, alimentato con UO_2 ($s \simeq 238/270$) arricchito, sotto forma di pastiglie sinterizzate di densità effettiva pari al 95% del valore teorico (ρm = 10,4 gr/cm³), e se la potenza volumetrica media è di 0,250 kW/cm³, è immediato calcolare una potenza specifica P_s = 0,0273 kW/gr e quindi (per η = 0,3 ed a = 1,01) un immobilizzo specifico k_o = 123 kg/MWe.

Occorre sottolineare che la potenza specifica è spesso riferita al solo materiale fissile.

In questo caso è necessario introdurre nella formulazione un coefficiente che tenga conto dell'arricchimento. Così, nell'esempio qui riportato e nell'ipotesi che l'uranio fosse arricchito al 2,5%, si troverebbe: