



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Calcoli per la determinazione della composizione isotopica del
combustibile di un PWR da 900 MWe al variare del bruciamento

R. Pergreffi, F. Rocchi, M. Sumini, F. Teodori, A. Guglielmelli



Report RdS/2012/006

CALCOLI PER LA DETERMINAZIONE DELLA COMPOSIZIONE ISOTOPICA DEL COMBUSTIBILE DI UN PWR DA 900 MWE AL VARIARE DEL BRUCIAMENTO

R. Pergreffi, F. Rocchi (ENEA), M. Sumini, F. Teodori, A. Guglielmelli (CIRTEN - UNIBO)

Settembre 2012

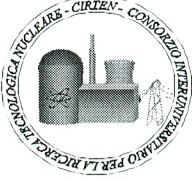
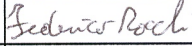
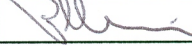
Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Nuovo nucleare da fissione: collaborazioni internazionali e sviluppo competenze in materia nucleare

Responsabile del Progetto: Paride Meloni, ENEA

 Ricerca Sistema Elettrico			Sigla di identificazione NNFISS – LP2 – 082		Distrib. L	Pag. 1	di 22
Titolo Calcoli per la determinazione della composizione isotopica del combustibile di un PWR da 900 MWe al variare del bruciamento.							
Descrittori Tipologia del documento: Rapporto Tecnico Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE: tema di ricerca "Nuovo nucleare da fissione" Argomenti trattati: Reattori nucleari ad acqua leggera, PWR, Librerie per calcolo di nocciolo							
Sommario In questo rapporto viene presentato in dettaglio il nocciolo di un PWR da 900 MWe della classe francese CP1, con particolare riferimento alla configurazione del primo ciclo, o ciclo di avviamento. Per tale configurazione viene descritta la metodologia di calcolo per librerie di sezioni d'urto equivalenti a 2 gruppi e per assembly omogeneizzati, necessarie al successivo calcolo di nocciolo mediante codice di trasporto neutronico di tipo nodale. Le librerie di sezioni d'urto vengono poi calcolate con il codice di trasporto deterministico APOLLO2 versione 2.8-3.E, il cui utilizzo è reso possibile grazie ad un accordo STC siglato tra ENEA e CEA nel 2011. Le risultanti librerie multiparametro (temperatura del fuel, temperatura e densità del moderatore, concentrazione di boro nel moderatore, e burnup) in formato Saphyb potranno in futuro essere usate dal codice di neutronica di nocciolo CRONOS2, anch'esso acquisito da ENEA grazie al suddetto accordo STC, per un calcolo accurato e dettagliato della composizione isotopica del combustibile al variare del burnup.							
 							
Note Questo documento è stato preparato con il contributo congiunto del seguente personale di ricerca ENEA e CIRTEN: - Roberto Pergreffi, Federico Rocchi (ENEA) - Marco Sumini, Francesco Teodori, Antonio Guglielmelli (CIRTEN/UNIBO)							
Copia n.			In carico a:				
2			NOME				
			FIRMA				
1			NOME				
			FIRMA				
0	EMISSIONE	03/09/2012	NOME	F. Rocchi	F. Padoani	P. Meloni	
			FIRMA				
REV.	DESCRIZIONE	DATA		REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE	

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP2 – 082	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 2	di 22
--	---	------------------	----------------------	------------------	-----------------

Indice Generale

Indice Generale	2
1. Introduzione	3
2. Descrizione di un nocciolo PWR da 900 MWe	3
3. Descrizione della metodologia di calcolo delle librerie e della loro struttura	14
4. Descrizione delle librerie	20
Nota sui codici utilizzati	22
Bibliografia	22
Curriculum Vitae autori CIRTEN	22

1. Introduzione

La caratterizzazione isotopica del combustibile di un reattore nucleare viene fatta ricorrendo a calcoli di evoluzione di nocciolo. Utilizzando codici deterministici di nocciolo, questo equivale a fare calcoli di bruciamento per l'intero nocciolo avendo preventivamente generato, mediante un codice di cella, tutte le librerie di sezioni d'urto efficaci necessarie a descrivere ogni stato del nocciolo stesso. In questo rapporto tecnico viene descritta la metodologia di generazione di librerie di sezioni d'urto efficaci mediante il codice di cella deterministico Apollo2, che possano poi essere impiegate per un futuro calcolo di nocciolo con il codice Cronos2. Entrambi i codici sono stati acquisiti da ENEA nel Settembre 2011 grazie ad un accordo STC con CEA. L'attenzione è focalizzata sul primo ciclo del nocciolo di start-up di un reattore PWR da 900 MWe, per il quale viene anche fornita una dettagliata descrizione degli elementi del nocciolo stesso.

2. Descrizione di un nocciolo PWR da 900 MWe

Tra i reattori ad acqua leggera pressurizzata, quelli con taglia da 900 MWe sono stati tra i primi ad essere introdotti in Europa. Molti di essi sono stati costruiti in Francia nella seconda metà degli anni '60 e sono attualmente eserciti nel parco reattori EdF. Nella descrizione di questi sistemi nucleari si farà riferimento proprio ai reattori francesi per i quali sono ormai a disposizione nella letteratura scientifica pubblica moltissimi dati tecnici.

Il nocciolo di un reattore da 900 MWe è costituito da 157 assembly attivi, descritti successivamente, e da 64 assembly di riflettore, secondo lo schema di [Figura 1](#).

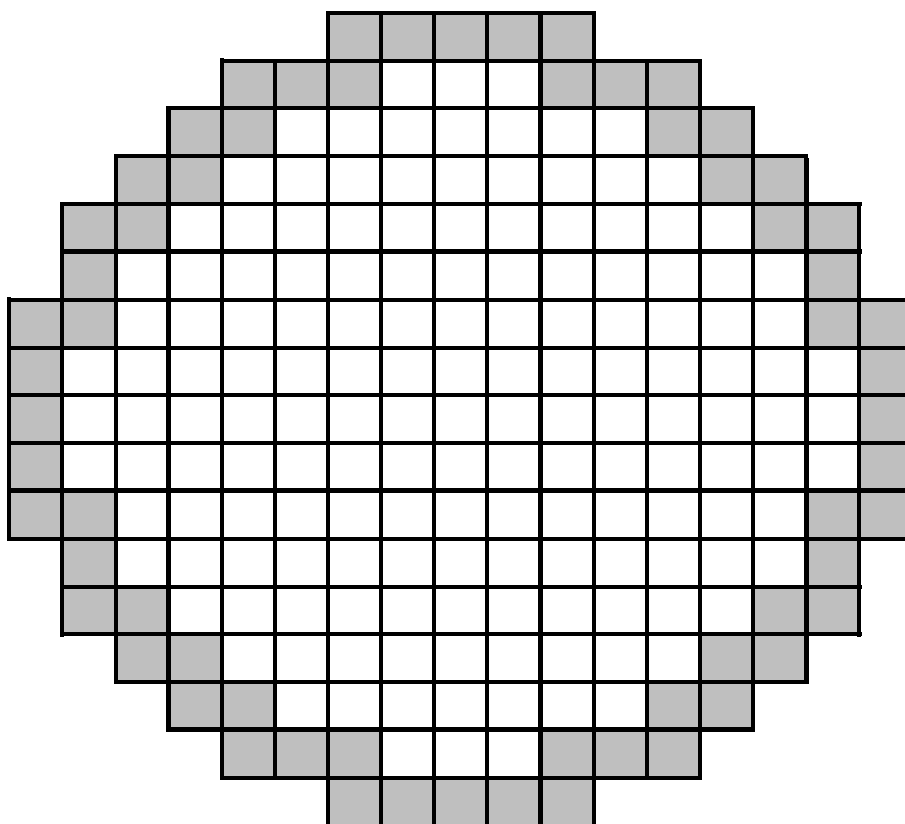


Figura 1: Schema di nocciolo PWR da 900 MWe (in grigio gli assembly riflettori).

I reattori francesi da 900 MWe sono classificati mediante l'uso di tre sigle che ne distinguono tre versioni, storicamente sviluppate in successione, su cui sono state implementate varie modifiche tecnologiche: CP0, CP1 e CP2. Le versioni CP1 e CP2 sono talvolta classificate in un unico insieme denominato CPY. In

particolare sono attivi 6 impianti CP0, 18 impianti CP1 e 10 impianti CP2, per un totale di 34 unità 900 MWe. In [Figura 2](#) è mostrato il deployment storico del parco reattori francesi con la distinzione in tipologia di impianto. Si può vedere che i reattori da 900 MWe sono stati costruiti tra il 1970 ed il 1987; già nel 1984 (inizio costruzione 1977) era stata introdotta una nuova classe di PWR con taglia maggiore, 1300 MWe, denominata P4. E' interessante notare come storicamente il massiccio dispiego del parco CP0 e CP1 sia coinciso, [Figura 2](#), con una maggiore indipendenza energetica della Francia dall'estero; il rapporto tra importazioni e consumi è calato di circa 20 punti percentuali, passando da circa il 70% a circa il 50%, in contemporanea all'attuazione del piano strategico nazionale sui PWR da 900 MWe.

Al 2007 la gestione del combustibile dei 900 MWe era così ripartita:

- 6 reattori CP0 in gestione CYCLADES a UO2, 1/3 di nocciolo, 4.2% di arricchimento;
- 8 reattori CPY in gestione GARANCE a UO2, 1/4 di nocciolo, 3.7% di arricchimento;
- 19 reattori CPY in gestione GARANCE ibrida a UO2, 1/4 di nocciolo, 3.7% di arricchimento + MOX, 1/3 di nocciolo, 7.08% di arricchimento;
- 1 reattore CPY in gestione PARITE MOX.

Alcune unità CPY stanno attualmente sperimentando alcuni batch di combustibile con uranio da riprocessamento. Le librerie Saphyb generate con APOLLO2 e descritte in questo report quale prodotto dell'attività dell'Accordo di Programma sono riferite al primo ciclo (BOL) di funzionamento (ovvero al nocciolo di start-up) di un reattore di tipo CP1.

Il nome del tipo di gestione è legato ad uno specifico programma di garanzia di qualità messo in atto da EdF; le principali specifiche delle varie gestioni sono riportate in [Tabella 1](#).

Gestione	Caratteristiche (gestione batch, arricchimento medio, assembly sostituiti ad ogni ciclo)	Lunghezza del ciclo (efpd)	Burnup medio allo scarico (GWd/MTU)
STANDARD	1/3, 3.25%, 52	290	33
MOX	1/3, MOX, 36+16*	290	32 (36*)
GARANCE	1/4, 3.70%, 40	280	42
HYBRIDE MOX	Ibrido, MOX, 28+16*	280	40 (35*)
CYCLADES (P0)	1/3, 4.2%, 52 + Gd	355	50

Tabella 1: Caratteristiche delle gestioni EdF dei PWR da 900 MWe.

*** = per combustibile MOX equivalente a UO2 al 3.25% di arricchimento.**

La gestione CYCLADES è stata introdotta nel 2001.

Per i PWR da 900 MWe sono stati inoltre introdotti da EdF, in ordine cronologico a partire dal 1990, tre possibili schemi di carica del combustibile a terzo o quarto di nocciolo, a loro volta evoluzione di schemi implementati anteriormente al 1990, denominati rispettivamente:

- Standard, corrispondente alla vecchia logica Out/In;
- Ibrido, con la presenza anche in posizioni più centrali di assembly gadoliniati;
- Bassa Fluenza, pensato per minimizzare la fluenza neutronica (per neutroni con $E > 1$ MeV) al vessel allo scopo di poter estendere la vita del reattore oltre i 40 anni di progetto.

Lo schema Bassa Fluenza (detto anche LL o Low Neutron Leakage) è particolarmente indicato per proteggere il vessel dall'irraggiamento neutronico. Gli acciai ferritici usati nella costruzione dei primi reattori da 900 MWe, non solo in Francia, contenevano ancora consistenti impurezze di Rame e Nickel; la temperatura di transizione tra comportamento duttile e fragile per tali acciai non irraggiati è circa attorno ai 0 °C; ad EOL (32 anni) tuttavia la fluenza neutronica veloce ($E > 1$ MeV per i PWR occidentali) può attestarsi, se non vengono presi provvedimenti quali lo schema Bassa Fluenza, a valori anche superiori a $1E19$ n/cm² con conseguenza che la temperatura di transizione può attestarsi attorno ai 150 °C, valore

assolutamente troppo alto per ragioni di sicurezza legate agli shock termo-meccanici durante transitori incidentali. Strategie di annealing ad alta temperatura per il recupero del danno da radiazione sono state testate nei VVER, ma la difficoltà nella loro implementazione e l'aggravio economico per le utility, dovuto all'indisponibilità dell'impianto per un lungo periodo di tempo, hanno fatto sì che in occidente si sia preferito adottare provvedimenti che abbiano ridotto il problema alla radice, ovvero introducendo schemi di carica che riducessero per loro stessa natura la fluenza al vessel. Con questi schemi è possibile ridurre la temperatura di transizione duttile-fragile ad EOL ben al di sotto di 100 °C, portando quindi un discreto margine di sicurezza in caso di incidente, e consentendo inoltre un'estensione della vita dell'impianto oltre i 32 anni (il contenimento primario ed il vessel sono ovviamente considerati gli unici due componenti non sostituibili nella vita utile di un impianto). Nei reattori più recenti sono stati invece usati acciai ferritici a basso tenore di impurezze che presentano già in condizioni di non irraggiamento delle temperature di transizione ben al di sotto dello zero centigrado (tipicamente attorno ai -20 °C e -40 °C).

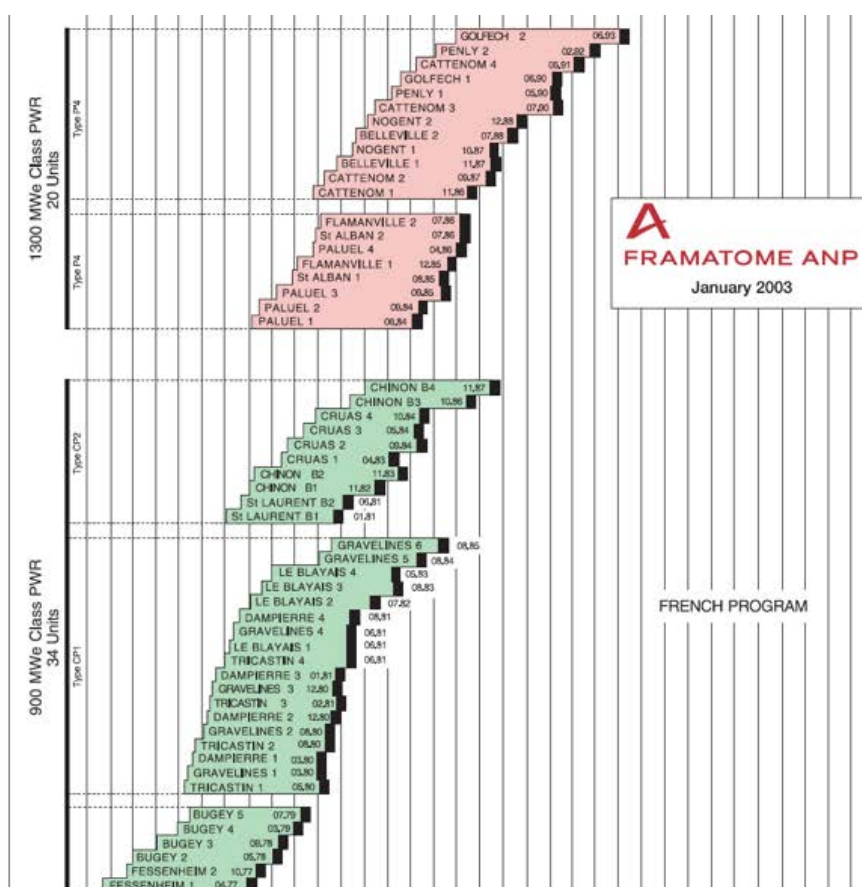


Figura 2: Deployment del parco reattori francesi.

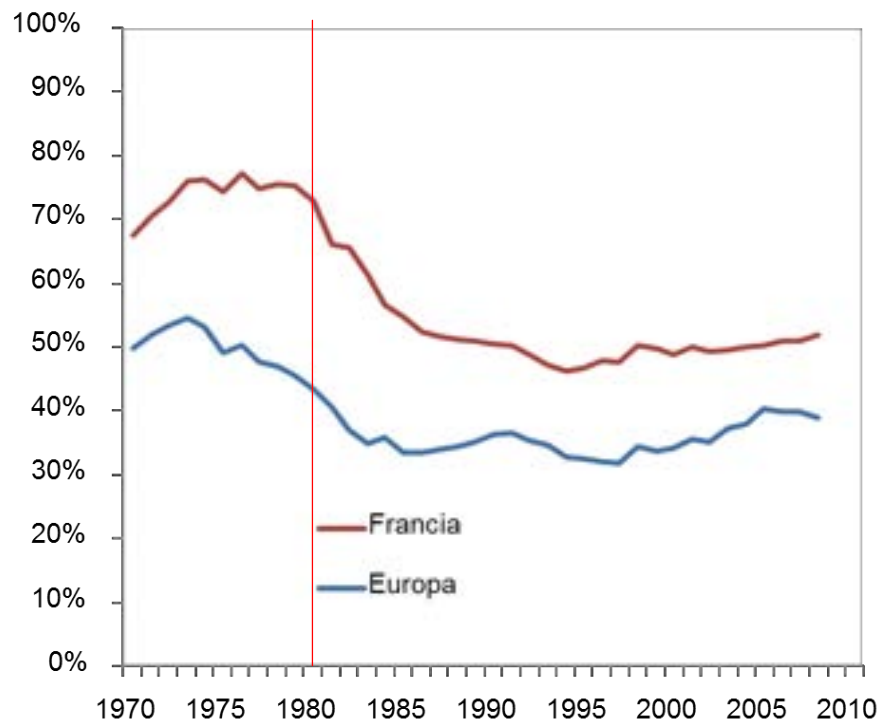


Figura 3: Dipendenza energetica (rapporto tra importazioni e consumi). La linea rossa indica approssimativamente l'entrata a pieno regime del parco CP0 e CP1 (dati Nomisma Energia).

In Figura 4 è mostrato l'andamento della fluenza al vessel in funzione dell'adozione di vari miglioramenti neutronici delle performance di nocciolo: schemi di bassa fluenza, uso di barre assorbitorici, introduzione o meno di elementi dummy in acciaio.

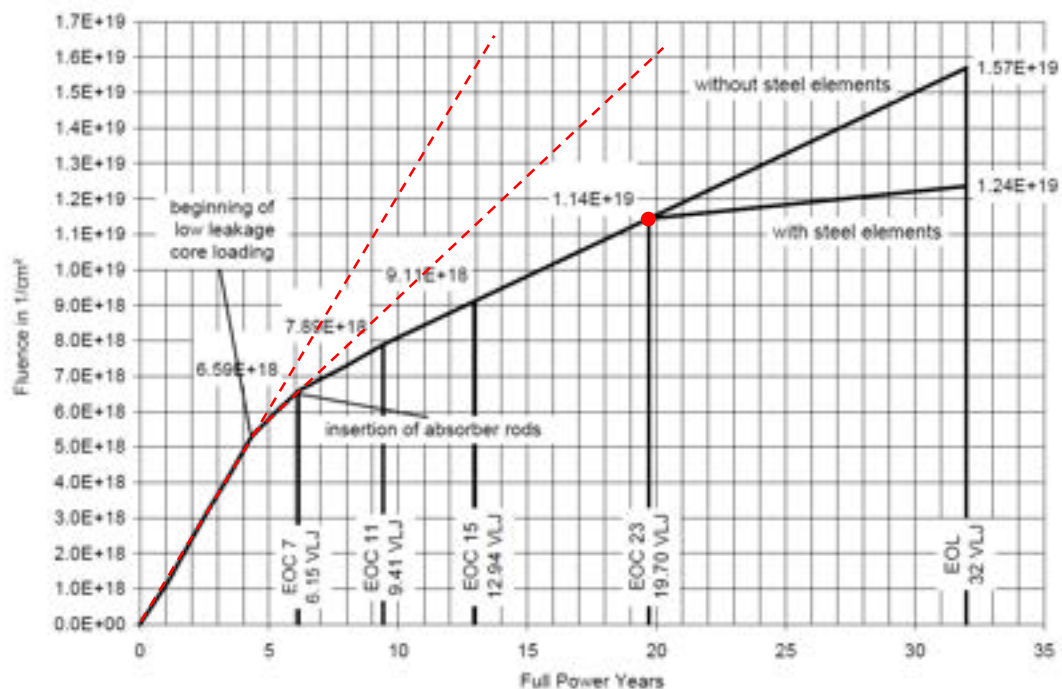


Figura 4: Fluenza veloce al vessel di un PWR. Andamento a seguito di vari miglioramenti neutronici.

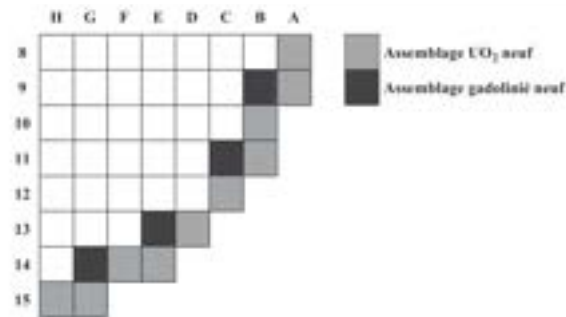


Figura 5: Schema di carica "Standard" (Out/In) terzo di nocciolo per PWR 900 MWe.

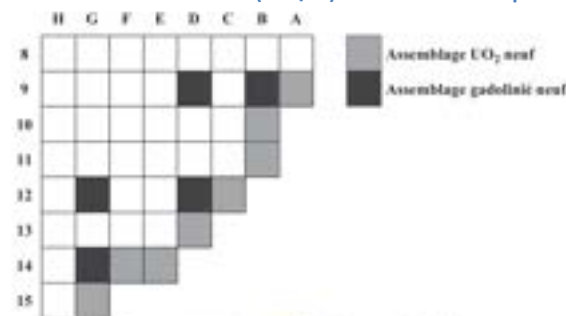


Figura 6: Schema di carica "Ibrido" terzo di nocciolo per PWR 900 MWe.

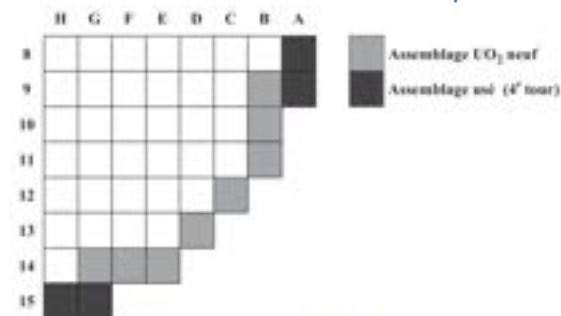


Figura 7: Schema di carica "Bassa Fluenza" quarto di nocciolo per PWR 900 MWe.

I tre schemi di carica sono illustrati in Figura 5, Figura 6 e Figura 7 rispettivamente. Gli assembly gadolinati sono costituiti da 12 pin, posizionate secondo lo schema di Figura 8, con tenore dell'8% in Gadolinio, su un supporto in UO₂ arricchito al 2.5% [1].

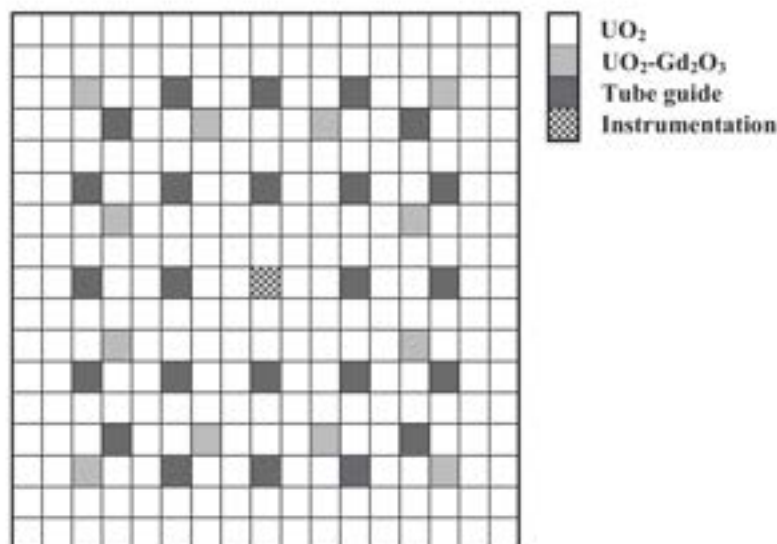


Figura 8: Posizione delle 12 pin gadolinate per la gestione CYCLADES.

Per lo studio neutronico di un nocciolo PWR da 900 MWe occorre specificare poi, non solo il tipo di gestione del combustibile, ma anche la modalità di operazione, poiché quest'ultima definisce numero e tipo di cluster di barre di controllo. Per i più vecchi reattori CP0 è stato implementato il cosiddetto Modo A, mentre per i reattori CPY è stato implementato il cosiddetto Modo G. La distribuzione dei modi di operazione nel parco EdF è illustrato in [Figura 9](#).

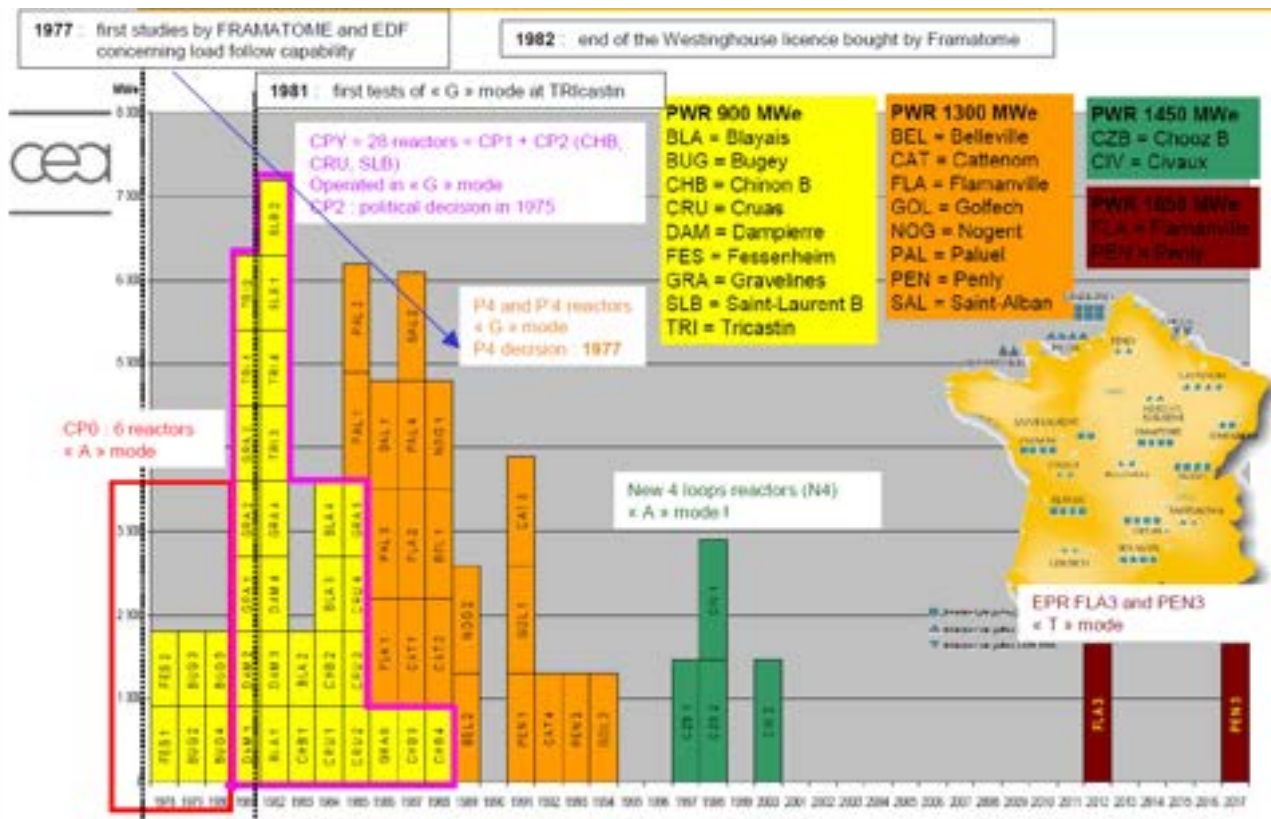


Figura 9: Distribuzione dei modi di operazione nel parco EdF.

Del Modo A esistono due versioni, denominate Modo A e Modo A Flessibile; dal punto di vista realizzativo sono praticamente identici, la differenza tra il primo ed il secondo consiste nella rimozione da parte dell'ASN francese di alcuni vincoli operazionali a seguito di verifiche sperimentali di fattibilità.

Il Modo A utilizza 4 gruppi di 8 barre di controllo (in inglese RCCA, Rod Cluster Control Assembly) nere ciascuno, denominati A, B, C e D, unitamente a due gruppi di sicurezza/shutdown, sempre di 8 barre nere ciascuno, denominati SA ed SB. Il gruppo D viene usato per compensare le piccole variazioni di reattività mediante regolazione della temperatura media del nocciolo. Lo stesso gruppo D è usato anche per variare e regolare il parametro di differenza assiale di potenza ΔI , definito come:

$$\Delta I = P_0 \cdot AO$$

essendo P_0 il livello di potenza del nocciolo relativo al nominale (espresso come percentuale della potenza di targa del nocciolo) e l'offset assiale AO definito come:

$$AO = \frac{P_H - P_L}{P_H + P_L}$$

con P_H e P_L le potenze espresse dalla metà superiore ed inferiore del nocciolo rispettivamente. L'inserzione completa dei soli gruppi C e D consente di passare dal 100% allo 0% di potenza nominale. La disposizione delle barre di controllo nel nocciolo è mostrata in [Figura 10](#).

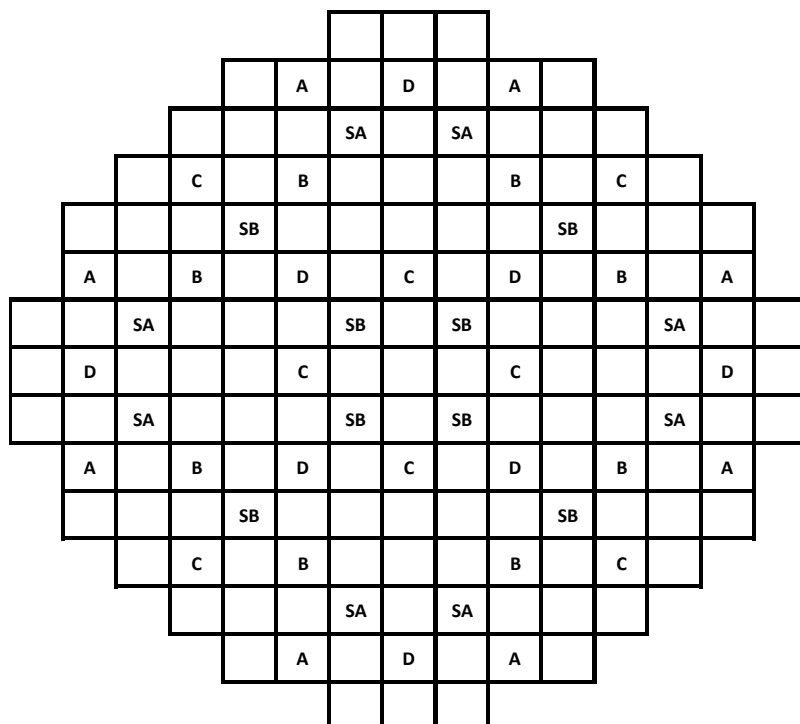


Figura 10: Disposizione barre di controllo Modo A.

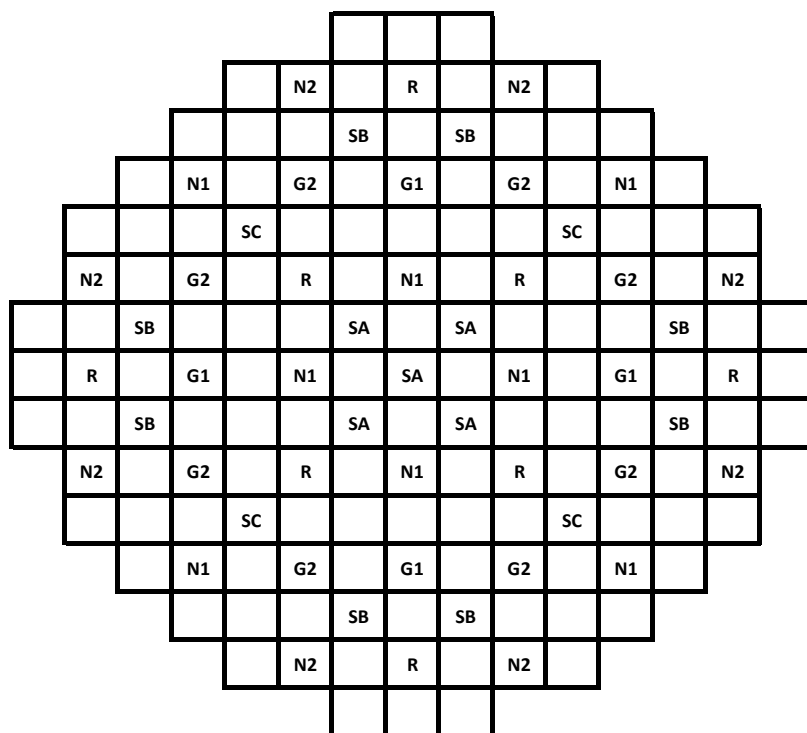


Figura 11: Disposizione barre di controllo Modo G.

Il modo G è così denominato poiché fa ricorso anche a barre grigie. Presenta tre gruppi di 8 barre nere ciascuno (R, N1 ed N2), due gruppi di barre grigie (G1 con 4 barre, e G2 con 8 barre), e tre gruppi di barre nere di sicurezza/shutdown (SA con 5 barre, SB con 8 barre, ed SC con 4 barre), la cui collocazione nel

nocciolo è mostrata in [Figura 11](#). Il gruppo R viene usato analogamente al gruppo D del modo A. Nel modo G anche la concentrazione di Boro nel moderatore viene usata per regolare la potenza.

Per un PWR da 900 MWe le barre nere sono costituite da 24 pin di AIC (valori nominali: 80% argento, 15% indio e 5% di cadmio, densità 9.97967 g/cm³), mentre le barre grigie sono costituite da 8 pin di AIC e 16 pin di acciaio inossidabile (AISI 304, 7.792815 g/cm³). Le barre grigie hanno ovviamente un worth di antireattività minore delle barre nere. Le barre nere e le barre grigie per PWR di taglia superiore ai 900 MWe sono ovviamente diverse, sia per geometria che per materiali. La disposizione delle barre nere e grigie in un assembly 17x17 per PWR da 900 MWe è mostrata in [Figura 12](#). La pin centrale è un tubo strumentato e non di materiale assorbitore.

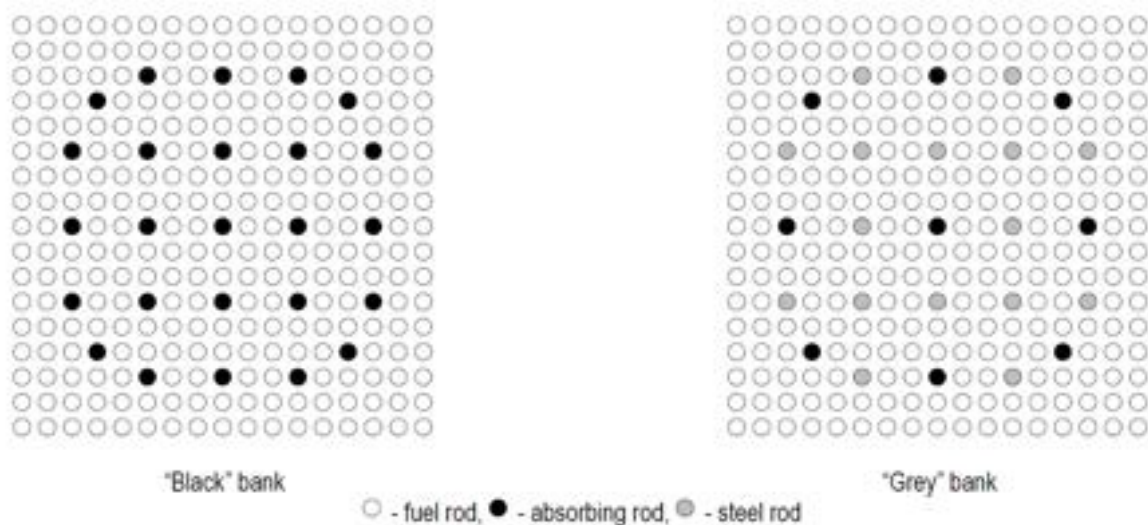


Figura 12: RCCA neri (sinistra) e RCCA grigi (destra) per assembly 17x17.

Nel caso in cui il reattore fosse operato in “base-load” le RCCA sono quasi sempre fuori dalla zona attiva del nocciolo; il Modo G può anche operare, con certe limitazioni, in “load-follow”. Le dimensioni di un tipico RCCA sono mostrate in [Figura 13](#).

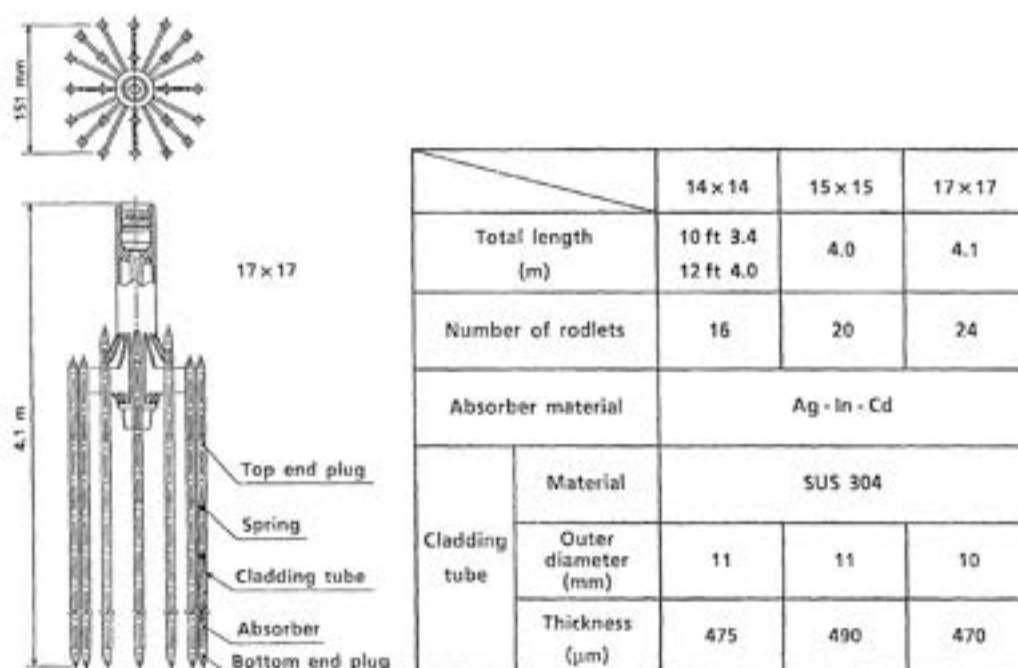


Figura 13: RCCA AIC.

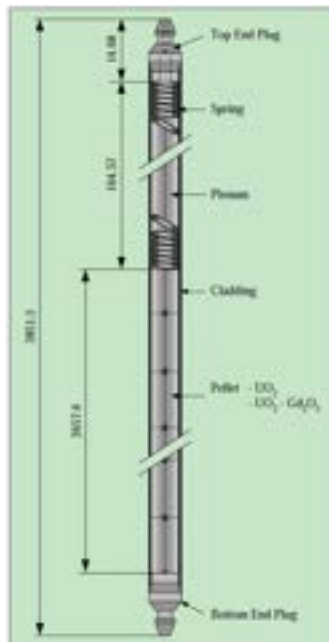


Figura 14: Fuel pin di assembly 17x17-12'.

Limitatamente al primo ciclo del nocciolo di start-up, la strategia di carica del combustibile prevede un utilizzo di assembly ad arricchimento relativamente basso ed il ricorso a barre anulari di pyrex (vetro borosilicato) come veleno bruciabile concentrato. L'uso di barre di pyrex per il nocciolo di start-up è stato introdotto per la prima volta nel 1969.

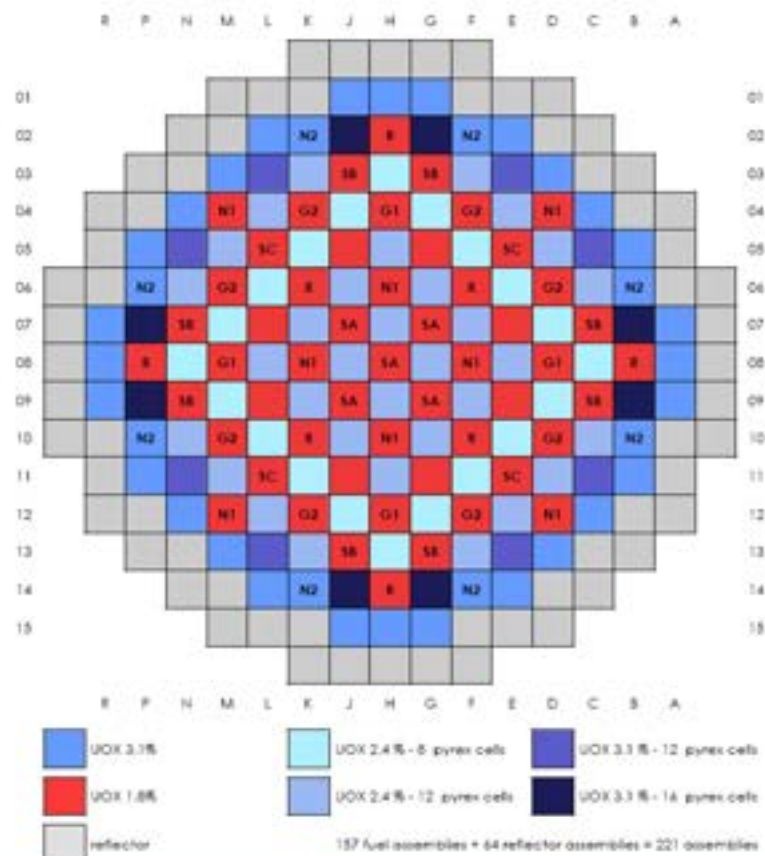


Figura 15: Mappa del primo nocciolo.

In [Figura 15](#) è mostrata la mappa di carica del nocciolo di start-up. E' composto come in [Tabella 2](#). L'ultima colonna indica se l'assembly può accogliere un barra di controllo.

Tipo di assembly	Numero	Commento	Numero pin di fuel	CR
Assembly con arricchimento 3.1%	36	In periferia	$264 \times 36 = 9504$	Si
Assembly con arricchimento 1.8%	53	A scacchiera	$264 \times 53 = 13992$	Si
Assembly con arricchimento 2.4% e 8 pin di pyrex	20	Corona esterna	$256 \times 20 = 5120$	No
Assembly con arricchimento 2.4% e 12 pin di pyrex	32	A scacchiera	$252 \times 32 = 8064$	No
Assembly con arricchimento 3.1% e 12 pin di pyrex	8	In periferia	$252 \times 8 = 2016$	No
Assembly con arricchimento 3.1% e 16 pin di pyrex	8	In periferia	$248 \times 8 = 1984$	No
Riflettore	64	In periferia	0	

Tabella 2: Nocciolo di start-up.

L'arricchimento iniziale risulta dunque essere per il nocciolo di start-up pari a circa il 2.43% contro il 3.25% del nocciolo a BOC. La disposizione all'interno di un assembly delle barrette di pyrex è mostrata in [Figura 16](#).

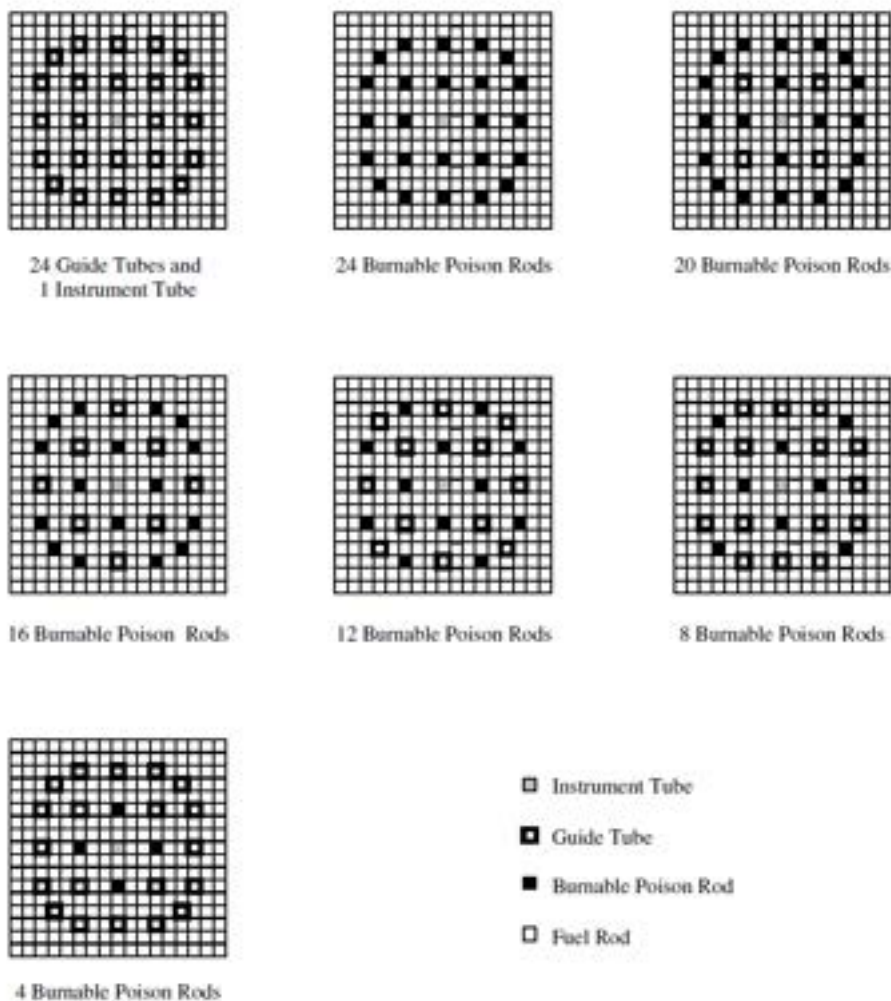


Figura 16: Schemi delle possibili posizioni di pin di veleni bruciabili in un assembly 17x17.

Solo a partire dal secondo ciclo del nocciolo i PWR da 900 MWe vengono equipaggiati con pin gadolinate al posto delle barre di pyrex. Le caratteristiche dimensionali degli assembly e delle pin in pyrex sono riportate in [Tabella 4](#). La composizione in percentuale isotopica di massa del vetro borosilicato delle pin in pyrex è data

in Tabella 5. Le barre in pyrex hanno una densità del vetro borosilicato di 2.22 g/cm^3 . I gap, e dunque anche la regione centrale vuota delle barrette di pyrex (dry annular gap), vengono tenuti in conto nella modellizzazione con densità equivalenti (smear density), ovvero incorporando di volta in volta i vuoti in zone opportune di materiale la cui densità viene diminuita proporzionalmente.

Temperatura media fuel (°C)	650
Temperatura media guaina fuel (°C)	335
Temperatura moderatore (°C)	305
Temperatura media guaina assorbitore (°C)	305
Temperatura media assorbitore (°C)	305
Densità UO ₂ (g/cm ³)	10.07
Densità clad fuel (g/cm ³)	6.49012
Densità teorica clad pyrex borato (g/cm ³)	7.792815
Densità clad pyrex borato (g/cm ³)	6.277939
Densità anima pyrex borato (g/cm ³)	0.952672
Densità moderatore (g/cm ³)	0.716403
Densità AIC (g/cm ³)	9.97967
Coefficiente di dilatazione lineare Zr4	$6.72\text{E-}06 \cdot (T-20)$
Altezza attiva (cm)	368
Potenza termica nominale (MW)	2775

Tabella 3: Temperature, densità e dati di targa.

	STD	AFA
Diametro esterno pellet (cm)	0.82532	0.82532
Diametro interno clad fuel (cm)	0.82532	0.82532
Diametro esterno clad fuel (cm)	0.948728	0.948728
Passo cella (cm)	1.265	1.262082
Diametro interno tubo guida (cm)	1.14588	1.12684
Diametro esterno tubo guida (cm)	1.22602	1.20698
Diametro esterno pellet AIC (cm)	0.872	0.872
Diametro interno guaina AIC (cm)	0.872	0.872
Diametro esterno guaina AIC (cm)	0.972	0.972
Spessore lamina d'acqua (cm)	0.0538399	0.07792594
Diametro anima barra pyrex borato (cm)	0.5	0.5
Diametro interno barra pyrex borato (cm)	0.5	0.5
Diametro esterno barra pyrex borato (cm)	0.872	0.872
Diametro esterno guaina pyrex borato (cm)	0.972	0.972
Anima e Clad barra pyrex borato	AISI 304	AISI 304

Tabella 4: Dati dimensionali assembly STD ed AFA.

Elemento	Percentuale in peso (%)
B ₂ O ₃	0.127
Al ₂ O ₃	0.020
K ₂ O	0.005
Na ₂ O	0.040
SiO ₂	0.805
Fe56	0.003

Tabella 5: Composizione vetro borosilicato.

3. Descrizione della metodologia di calcolo delle librerie e della loro struttura

Le librerie Saphyb sono create a due gruppi energetici, definiti a partire dalla librerie di riferimento a 281 gruppi (struttura SHEM), come in [Tabella 6](#).

Limiti gruppi energetici (in MeV)		
E	g	Gruppo
1.9640E+01	1	Gruppo veloce
6.2500E-07		
6.2500E-07	2	Gruppo termico
1.1000E-10		

Tabella 6: Struttura a due gruppi.

La struttura geometrica di riferimento è una cella quadrata omogenea pari ad 1/4 di assembly, quindi di lato pari a 10.806 cm. In questo caso se la cella non omogenea di partenza non ha forti gradienti di flusso, la pesatura flusso/volume è bastevole a fornire sezioni d'urto equivalenti corrette, e dunque non è necessario ricorrere a teorie di equivalenza particolari, con la conseguenza che tutti i coefficienti di equivalenza sono pari ad 1. Nel caso di celle originarie con barre di controllo, il forte gradiente di flusso in prossimità di queste impone l'uso di una teoria di equivalenza che, nel caso di geometria di output completamente omogenea, è quella di Selengut, in cui si impone la conservazione del flusso sul contorno dell'assembly [2]. Per questi assembly in libreria vengono forniti come variabili locali anche i coefficienti di equivalenza, in genere variabili tra 0.9 ed 1.0. E' importante mettere in evidenza come la scelta di assembly di output interamente omogeneo imponga l'uso di un solutore ad elementi finiti o nodale. Le librerie Saphyb vengono strutturate con una serie di isotopi particolarizzati, necessari a descrivere correttamente la cinetica e la dinamica dei PWR (ovvero gli isotopi delle catene dello Xeno e del Samario: Xe135, I135, Nd147, Pm147, Pm148, Pm148m, Pm149, Sm149) ed un isotopo MACRO equivalente in cui confluiscono tutti gli isotopi non particolarizzati.

Le sezioni d'urto per cui si forniscono dati nelle librerie Saphyb sono:

- sezione d'urto totale
- sezione d'urto di assorbimento
- sezione d'urto di eccesso neutronico (n,2n)
- sezione d'urto di fissione
- spettro di fissione
- numero di neutroni emessi per fissione · sezione d'urto di fissione
- energia rilasciata dalla sezione d'urto totale
- energia rilasciata dalla sezione d'urto di fissione
- energia rilasciata dalla sezione d'urto di cattura radiativa
- coefficiente di leakage
- sezione d'urto di self-scattering
- sezione d'urto di diffusione
- sezioni d'urto di scattering
- matrice di scattering con profilo

I parametri delle librerie sono 4:

- temperatura del combustibile (TCOM)
- densità del moderatore (DMOD)
- concentrazione in boro (CBOR)
- burnup (BURN)

I valori scelti per i primi tre parametri sono riportati in [Tabella 7](#). CRONOS interpolerà opportunamente tra essi per ogni valore richiesto dall'utente in fase di calcolo.

n.	TCOM [°C]	DMOD [g/cm ³]	CBOR [ppm]
1	2.86110E+02	6.00171E-01	0.00000E+00
2	5.67850E+02	6.68422E-01	6.00000E+02
3	1.10000E+03	7.12601E-01	1.23600E+03
4	1.80000E+03	7.53713E-01	1.50000E+03

[Tabella 7: Valori dei parametri.](#)

I valori scelti per gli step di bruciamento sono riportati in [Tabella 8](#), assieme ai valori corrispondenti di fluenza e di tempo.

n.	BURN [MWd/kg]	FLUE [n/kb]	TIME [s]
1	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2	9.37E+00	6.47E-03	2.13E+04
3	1.88E+01	1.30E-02	4.25E+04
4	7.50E+01	5.23E-02	1.70E+05
5	1.50E+02	1.05E-01	3.40E+05
6	5.00E+02	3.51E-01	1.13E+06
7	1.00E+03	7.04E-01	2.27E+06
8	2.00E+03	1.42E+00	4.54E+06
9	3.00E+03	2.13E+00	6.81E+06
10	4.00E+03	2.85E+00	9.07E+06
11	6.00E+03	4.32E+00	1.36E+07
12	8.00E+03	5.82E+00	1.81E+07
13	1.00E+04	7.34E+00	2.27E+07
14	1.20E+04	8.88E+00	2.72E+07
15	1.40E+04	1.04E+01	3.18E+07
16	1.60E+04	1.20E+01	3.63E+07
17	1.80E+04	1.36E+01	4.08E+07
18	2.00E+04	1.53E+01	4.54E+07
19	2.40E+04	1.87E+01	5.44E+07
20	2.80E+04	2.21E+01	6.35E+07
21	3.20E+04	2.57E+01	7.26E+07
22	3.60E+04	2.94E+01	8.17E+07
23	4.00E+04	3.31E+01	9.08E+07
24	4.40E+04	3.70E+01	9.98E+07
25	4.80E+04	4.09E+01	1.09E+08
26	51999.9	4.49E+01	1.18E+08
27	55999.8	4.90E+01	1.27E+08
28	59999.9	5.32E+01	1.36E+08

[Tabella 8: Step di bruciamento.](#)

Il burnup massimo raggiunto è supposto essere 60 GWd/MTU. In totale dunque, per ogni libreria Saphyb, vengono eseguiti $4 \times 4 \times 4 \times 28 = 1792$ calcoli elementari di Apollo2. Ad ognuno di questi corrisponde un coefficiente di equivalenza che viene stoccato nelle librerie. Assieme ai coefficienti di equivalenza vengono stoccati, per ogni calcolo, anche i valori di K_{inf} , K_{eff} e $B2$ (con il suo segno, negativo nel caso di assembly sottocritici). K_{eff} è imposto pari ad 1 per poter ricavare $B2$ con la teoria del leakage assiale. Viene poi stoccata anche la densità iniziale dei nuclidi pesanti. Il calcolo viene fatto ricorrendo al Metodo delle

Probabilità di Collisione P_{ij} , con quattro regioni concentriche di fuel ed undici regioni concentriche per le pin di pyrex (per le quali l'effetto di autoschermo è particolarmente pesante). Si sono sfruttate tutte le simmetrie possibili (X, Y ed XY) e dunque si è simulato 1/8 di assembly. Il calcolo di autoschermo è stato fatto sulla geometria originale e ricorrendo al metodo TR sugli intervalli energetici raccomandati da CEA.

In [Figura 17](#) sono mostrati, a titolo di esempio, gli andamenti al variare del burnup di K_{inf} per i vari tipi di assembly necessari alla descrizione del nocciolo, relativi ad i valori di 600 ppm massici di boro, 567.85 °C di temperatura di fuel, e 0.712601 g/cm³ di densità di moderatore. Da tali andamenti si può stimare il worth di reattività di una barra di controllo nera o grigia interamente inserita in un dato assembly; è altresì possibile vedere l'effetto del bruciamento del veleno negli assembly con le barre di pyrex, nonché vedere la diminuzione del worth di reattività della barra di controllo all'aumentare del burnup e, quindi, all'indurirsi dello spettro neutronico.

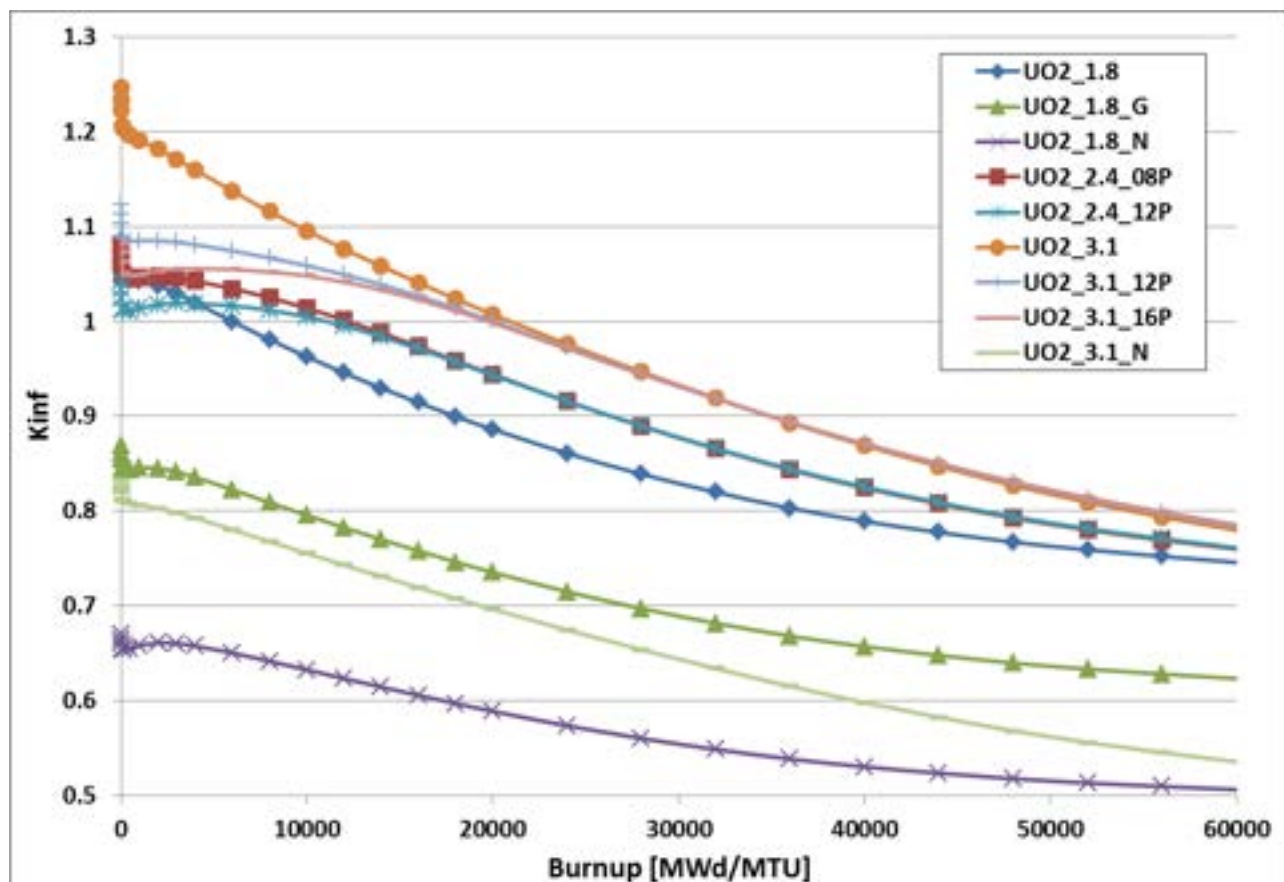


Figura 17: K_{inf} per i vari assembly del PWR 900 MWe per TCOM(2), DMOD(3) e DBOR(2).

E' estremamente interessante notare l'effetto del veleno bruciabile sulla reattività dell'assembly. Contrariamente a quanto accade per i veleni dispersi nel fuel (Gadolinio, Erblio, Zirconio), che presentano una penalità residua di reattività (residual reactivity penalty) anche ad EOL (in quanto non è mai possibile bruciarli completamente), le barre di pyrex forniscono all'assembly una reattività residua positiva. Si ricorda che la reattività residua è definita come differenza, al variare del burnup, delle reattività di un assembly privo di veleno neutronico e dello stesso assembly con veleno neutronico.

Questo strano ed atipico comportamento è dovuto al fatto che la presenza di pin di pyrex durante il bruciamento indurisce lo spettro neutronico, essenzialmente per due motivi: 1) per rimozione di neutroni termici da parte di 10B e, 2) per presenza di minore quantità di moderatore nell'assembly (le pin infatti risiedono in tubi guida che altrimenti sarebbero occupati da moderatore). L'indurimento dello spettro a sua volta provoca una minore deplezione di ²³⁵U ed un maggiore breeding di ²³⁹Pu. Un'enfaticata produzione di ²³⁹Pu ed una simultanea diminuzione delle fissioni di ²³⁵U incrementano la reattività del

fuel allo scarico ed oltre. Di conseguenza un assembly esposto a pin di pyrex (od in generale di qualunque altro veleno bruciabile purchè localizzato) avrà, ad alto burnup, una grande reattività residua positiva rispetto ad uno che non sia stato esposto a tali pin [5]. La situazione è ben illustrata da [Figura 18](#) e [Figura 19](#). Nella prima è mostrato l'andamento al variare del burnup della reattività dell'assembly arricchito al 3.1% in ^{235}U , con e senza pin di pyrex.

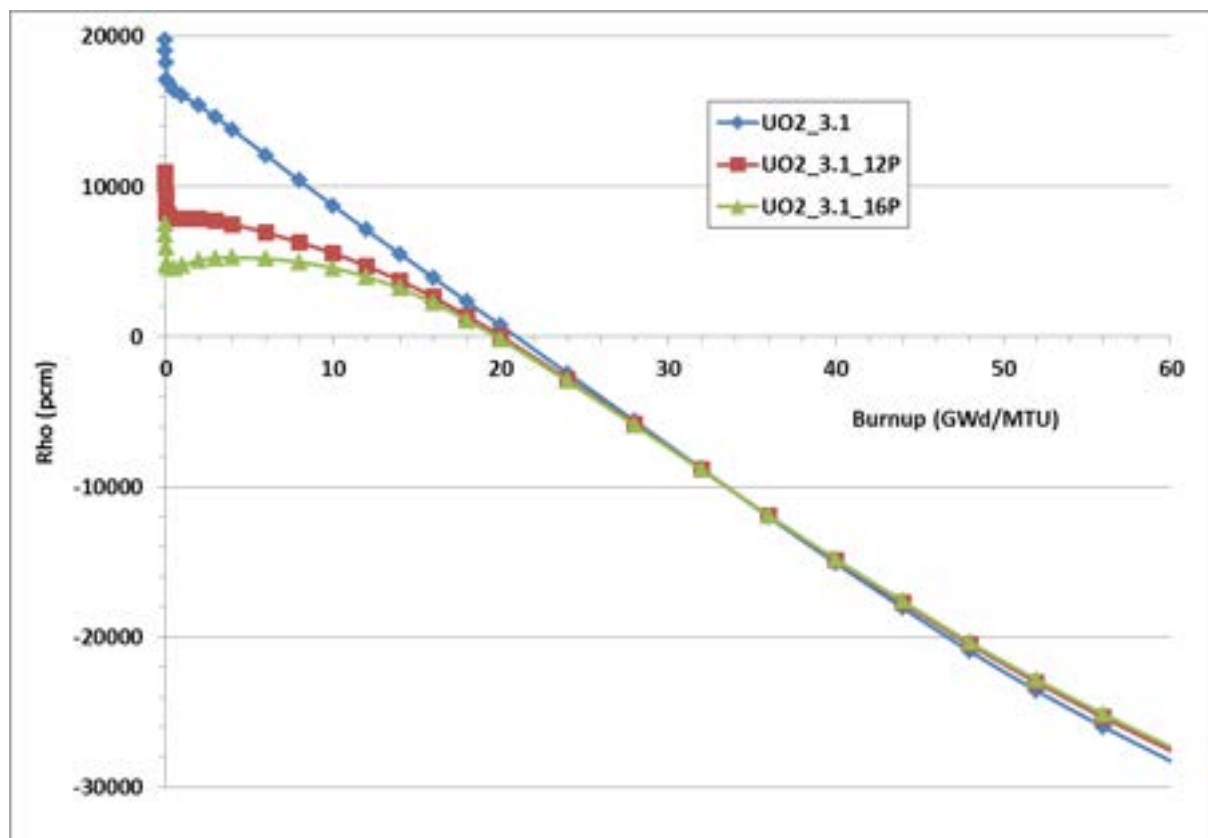


Figura 18: Reattività in pcm dell'assembly al 3.1% e dello stesso con 12 e 16 pin di pyrex.

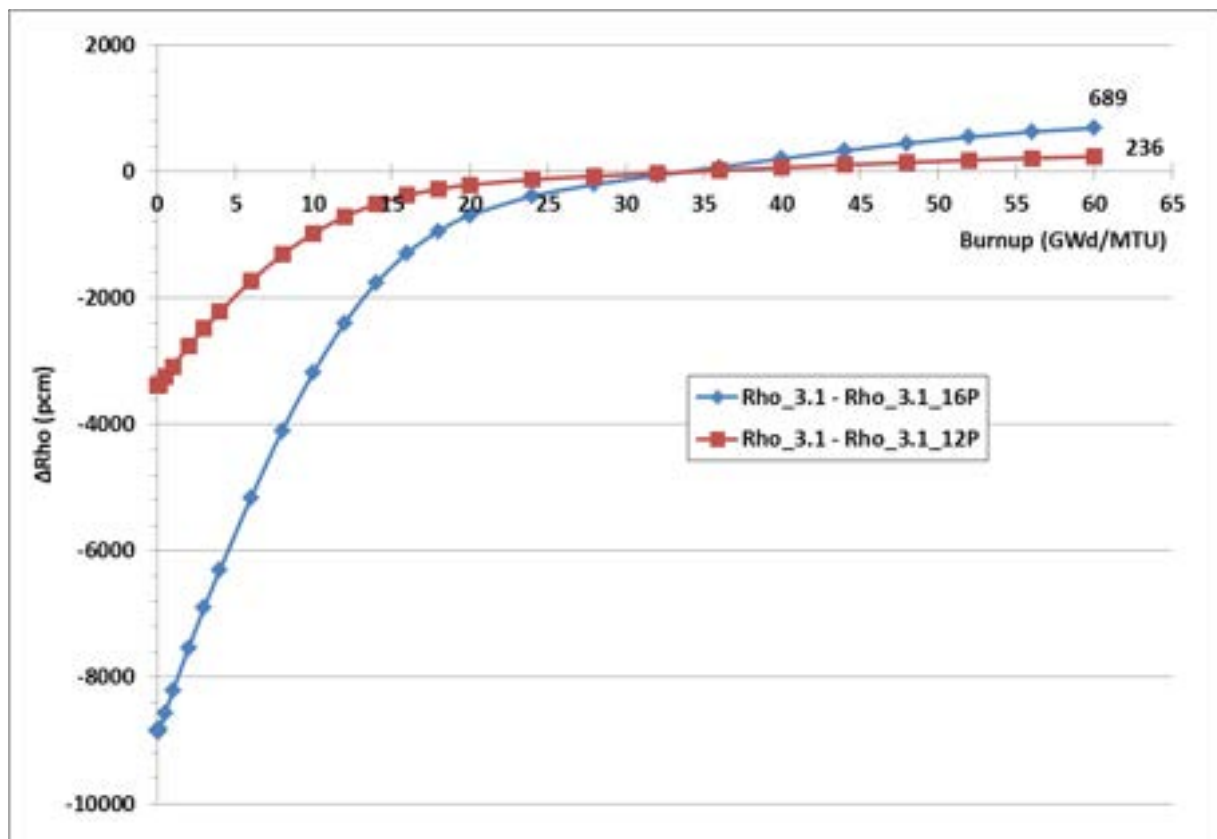


Figura 19: Differenza di reattività tra assembly senza pin di pyrex ed assembly con pin di pyrex.

In Figura 19 è invece mostrata $\Delta\rho$ al variare del burnup. Si nota che attorno a 35 GWd/MTU la differenza di reattività, prima sempre negativa, si annulla e che, all'aumentare del burnup, diviene positiva, sino ad attestarsi a valori di circa +236 pcm e +689 pcm nel caso di 12 e 16 pin rispettivamente.

A titolo di esempio si riporta in Figura 20 e Figura 21 un calcolo di penalizzazione residua di reattività per un assembly con pin gadolinate, per cui c'è sempre una penalità e mai un guadagno di reattività. La penalità ad EOL è di circa 150 pcm, ovvero l'assembly gadolinate è sempre meno critico del gemello non gadolinate.

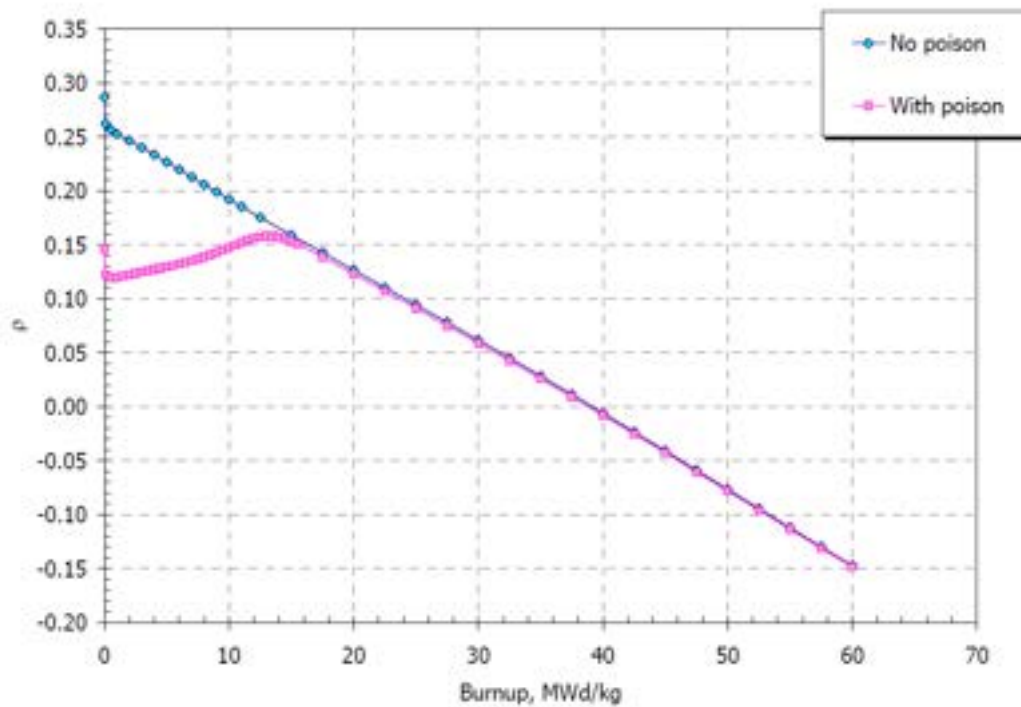


Figura 20: Reattività per un assembly PWR con pin gadoliniate e senza pin gadoliniate.

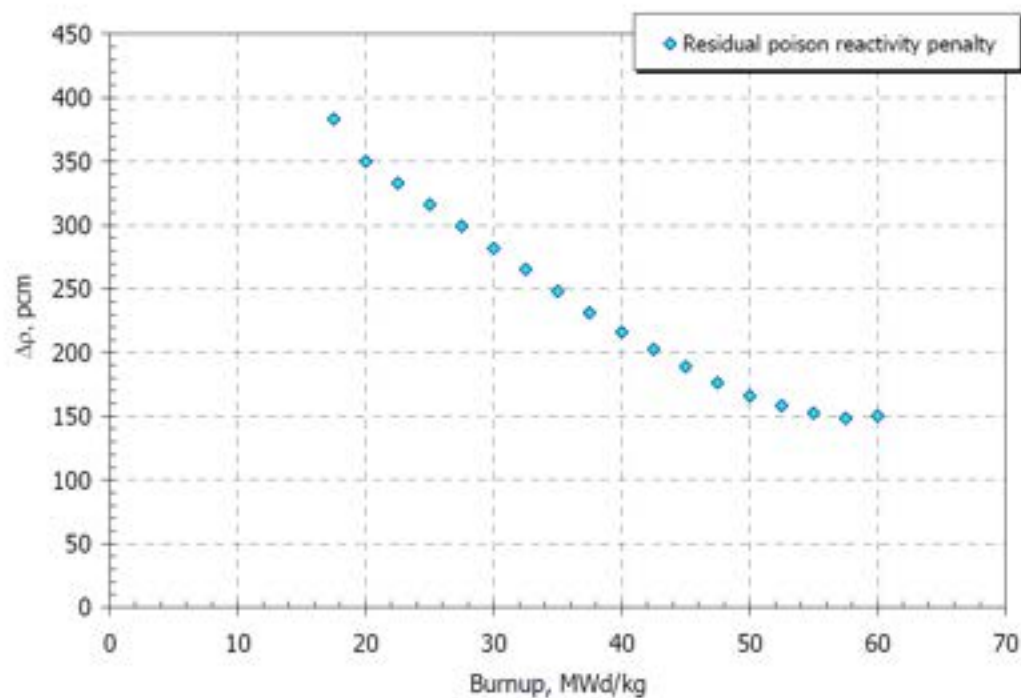


Figura 21: Penalità residua di reattività tra assembly con pin gadoliniate ed assembly senza pin gadoliniate.

Lo studio della deplezione del boro ha comportato l'inclusione della catena di evoluzione per il 10B nella catena di evoluzione standard, in particolare mediante ricorso alla procedura APROC ch_bore_2005.pro (= DC_BORE_2005).

4. Descrizione delle librerie

Il risultato del calcolo è l'insieme delle seguenti 9 librerie:

- UO2_1.8	binario	18.137.088 bytes
- UO2_1.8_G	binario	18.288.640 bytes
- UO2_1.8_N	binario	18.288.640 bytes
- UO2_2.4_08P	binario	18.489.344 bytes
- UO2_2.4_12P	binario	18.489.344 bytes
- UO2_3.1	binario	18.137.088 bytes
- UO2_3.1_12P	binario	18.489.344 bytes
- UO2_3.1_16P	binario	18.489.344 bytes
- UO2_3.1_N	binario	18.288.640 bytes

dove il numero dopo il primo underscore indica l'arricchimento dell'assembly, il numero dopo il secondo underscore indica il numero di pin di pyrex (P), e la lettera N o G indica se nell'assembly è presente una barra nera o grigia rispettivamente.

Per il calcolo di nocciolo occorrerebbe fornire librerie anche per il riflettore, tuttavia il metodo adottato per il sistema Apollo2-Cronos2 è quello di simulare il riflettore con un materiale fittizio equivalente, equivalente nel senso che sia in grado di fornire al nocciolo lo stesso albedo multigruppo del riflettore reale [3,4]. Nella Fisica del Reattore questo approccio è noto come **Metodo Beta** o **Metodo delle Matrici di Albedo**. Nota che sia da un calcolo di trasporto 1D o 2D la matrice di albedo a due (o più) gruppi all'interfaccia nocciolo-riflettore, è possibile ricavare i parametri del riflettore che vengono forniti a Cronos come input diretto dato manualmente dall'utente ricorrendo al modulo XS_READ_DATA:

Va tenuto in conto che per un PWR da 900 MWe la struttura che viene denominata riflettore, almeno per la sua parte radiale, è in realtà una struttura molto complessa, costituita come in [Figura 22](#).

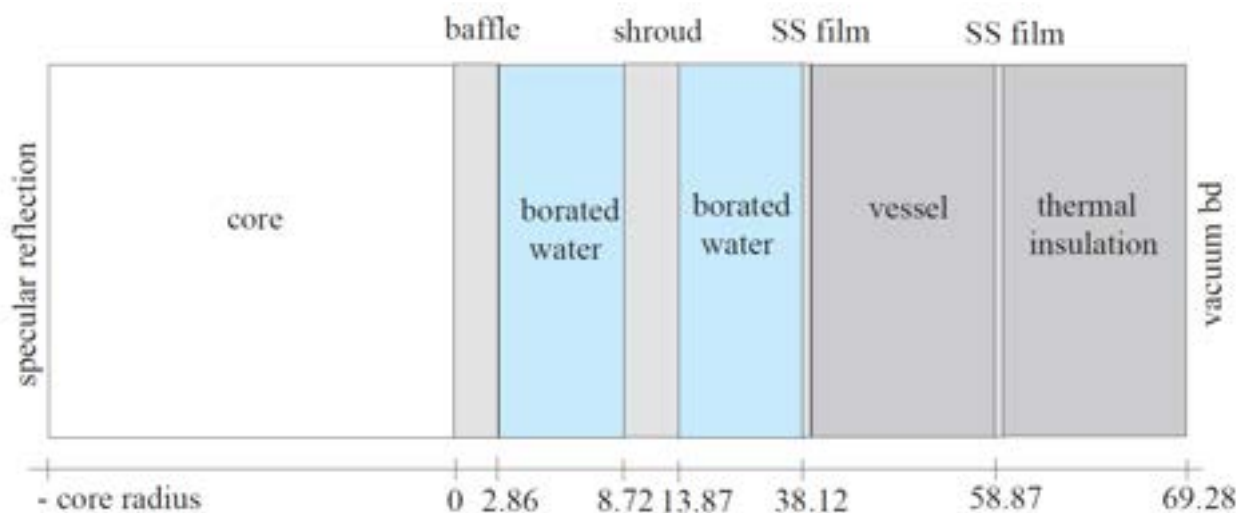


Figura 22: Schema di riflettore (dimensioni in cm). Lo SS film interno ha uno spessore di 0.75 cm; quello esterno di 1.02 cm.

Per il PWR da 900 MWe si suppone che il riflettore assiale abbia le stesse sezioni d'urto del riflettore radiale; questa approssimazione non porta con sé errori rilevanti nel calcolo del nocciolo in esame. Viene considerato l'upscattering; l'ordine di anisotropia nello scattering è pari a 0 (scattering isotropo); il coefficiente di diffusione è dato esplicitamente. Un solo parametro è considerato essenziale, nella fattispecie la concentrazione, in ppm di peso, di boro nell'acqua. Cinque valori di questo parametro vengono specificati: 0, 100, 600, 1236 e 1600 ppm. Un solo valore di fluensa è ritenuto sufficiente (poiché il riflettore non viene bruciato) e pari a 0 n/kb. Il riflettore è poi equiparato ad un unico isotopo non fissile

(cioè diffondente/assorbente) equivalente (quindi di tipo '**FLUE**'). Le sezioni d'urto macroscopiche fornite (in cm^{-1}) sono quelle totale e di scattering rispettivamente; vengono anche forniti i coefficienti di equivalenza ed i flussi integrati. Le costanti di riflettore dunque valgono:

PBoro (ppm): 0		g=1	g=2
Flusso integrato ($\text{n}\cdot\text{cm}/\text{s}$)		1	1
Coefficiente di equivalenza		1	1
D (cm)		0.77392	0.23975
$\Sigma_t (\text{cm}^{-1})$		0.2960179E-01	0.1428544E+00
$\Sigma_{g \rightarrow g'} (\text{cm}^{-1})$	$g'=1$	0	0.6241180E-03
	$g'=2$	0.1663475E-01	0

PBoro (ppm): 100		g=1	g=2
Flusso integrato ($\text{n}\cdot\text{cm}/\text{s}$)		1	1
Coefficiente di equivalenza		1	1
D (cm)		0.77392	0.23975
$\Sigma_t (\text{cm}^{-1})$		0.2959900E-01	0.1432016E+00
$\Sigma_{g \rightarrow g'} (\text{cm}^{-1})$	$g'=1$	0	0.6317672E-03
	$g'=2$	0.1619915E-01	0

PBoro (ppm): 600		g=1	g=2
Flusso integrato ($\text{n}\cdot\text{cm}/\text{s}$)		1	1
Coefficiente di equivalenza		1	1
D (cm)		0.77392	0.23975
$\Sigma_t (\text{cm}^{-1})$		0.2961264E-01	0.1447251E+00
$\Sigma_{g \rightarrow g'} (\text{cm}^{-1})$	$g'=1$	0	0.6703818E-03
	$g'=2$	0.1443728E-01	0

PBoro (ppm): 1236		g=1	g=2
Flusso integrato ($\text{n}\cdot\text{cm}/\text{s}$)		1	1
Coefficiente di equivalenza		1	1
D (cm)		0.77392	0.23975
$\Sigma_t (\text{cm}^{-1})$		0.2962503E-01	0.1462868E+00
$\Sigma_{g \rightarrow g'} (\text{cm}^{-1})$	$g'=1$	0	0.7148046E-03
	$g'=2$	0.1287357E-01	0

PBoro (ppm): 1600		g=1	g=2
Flusso integrato ($\text{n}\cdot\text{cm}/\text{s}$)		1	1
Coefficiente di equivalenza		1	1
D (cm)		0.77392	0.23975
$\Sigma_t (\text{cm}^{-1})$		0.2962428E-01	0.1470777E+00
$\Sigma_{g \rightarrow g'} (\text{cm}^{-1})$	$g'=1$	0	0.7395941E-03
	$g'=2$	0.1218736E-01	0

Teoricamente è possibile definire delle costanti di riflettore non solo per la parte di riflettore radiale, ma anche per le parti assiali superiore ed inferiore, tuttavia l'errore che si commette nell'assimilare il riflettore assiale superiore ed inferiore con il riflettore radiale, e quindi nell'usare un unico set di costanti di riflettore, è trascurabile.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione NNFISS – LP2 – 082	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 22	di 22
--	---	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

Nota sui codici utilizzati

Il codice Apollo2 è sviluppato da CEA ed è di proprietà di CEA, EDF ed AREVA NP.
The Apollo2 code is developed by CEA and co-owned by CEA, EDF and AREVA NP.
Il codice Cronos è sviluppato da CEA ed è di proprietà di CEA.
The Cronos2 code is developed and owned by CEA.

Bibliografia

- [1] G. Glinatsis, G. Grasso, R. Pergreffi, F. Rocchi, Problemi di fisica del reattore ad acqua leggera e metodi di calcolo neutronico avanzati, Rapporto Tecnico ENEA NNFISS – LP5 – 022, 2011.
- [2] A. Hebert, Applied Reactor Physics, Presses Internationales Polytechnique, Montreal, 2009.
- [3] R. Sanchez, J. Ragusa, S. Santandrea, Reflector Homogenization, International Joint Meeting Cancun 2004 LAS/ANS-SNM-SMSR, July 11-14, 2004.
- [4] E. Richebois, Determination of multigroup and multi-operator reflector constants. Application to a power reactor transport calculation. M&C 98, Long Island, October 5-8, 1998.
- [5] J. C. Wagner, C. V. Parks, Impact of Burnable Poison Rods on PWR Burnup Credit Criticality Safety Analyses, ANS/ENS 2000 International Winter Meeting and Embedded Topical Meetings, November 12-16, 2000, Washington, D.C. Trans. Am. Nucl. Soc. 83, 130–134, 2000.

Curriculum Vitae autori CIRTEN

Marco Sumini: ingegnere nucleare, Professore Associato di Fisica dei Reattori Nucleari all’Università degli Studi di Bologna dal 1987; svolge attività di ricerca sulla fisica dei reattori, sulla progettazione di nocciolo e sul trasporto di particelle neutre e cariche, nonché attività sperimentali sui dispositivi pulsati a plasma.

Francesco Teodori: ingegnere nucleare, Ricercatore in Radioprotezione dal 2006 presso l’Università degli Studi di Bologna; i suoi principali interessi scientifici sono l’analisi delle conseguenze degli incidenti in impianti nucleari ed i problemi di radioprotezione associati.

Antonio Guglielmelli: ingegnere chimico, ha conseguito il Diploma di Master Universitario di II Livello in “Progettazione e Gestione di Sistemi Nucleari Avanzati” dell’Università degli Studi di Bologna nel 2011. Dal Gennaio 2012 è Dottorando presso il Dipartimento di Ingegneria Energetica, Nucleare e del Controllo Ambientale (DIENCA) dell’Università di Bologna.