



## Ricerca di Sistema elettrico

# Analisi neutronica per valutazioni di sicurezza del nocciolo di start-up di un PWR da 900 MWe

*G. Glinatsis, G. Grasso, D. Mattioli, R. Pergreffi, F. Rocchi*

ANALISI NEUTRONICA PER VALUTAZIONI DI SICUREZZA DEL NOCCIOLO DI START-UP DI UN PWR  
DA 900 MWe

G. Glinatsis, G. Grasso, D. Mattioli, R. Pergreffi, F. Rocchi (ENEA)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV Generazione

Obiettivo: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare

Responsabile del Progetto: Felice De Rosa, ENEA

**Titolo**

**Analisi neutronica per valutazioni di sicurezza del nocciolo di start-up di un PWR da 900 MWe.**

**Descrittori**

Tipologia del documento:

Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE su sicurezza nucleare e reattori di IV generazione

Argomenti trattati: Reattori ad acqua leggera, PWR, Neutronica

**Sommario**

Questo rapporto mostra la neutronica quasi-statica ed per condizioni operazionali, ovvero non incidentali, del primo ciclo di funzionamento di un PWR da 900 MWe, mettendone in luce i principali punti di forza della safety di nocciolo, ovvero le distribuzioni di temperatura, i grandi margini di sicurezza rispetto alle distribuzioni di flusso e di potenza, il worth dei sistemi di controllo e la loro efficacia ecc. I calcoli sono fatti in teoria della diffusione, idonea per questo tipo di reattore termico, ricorrendo al codice di nocciolo CRONOS-2, usando le librerie di sezioni d'urto efficaci a due gruppi calcolate nella precedente annualità con il codice di cella APOLLO-2. L'accoppiamento con la termoidraulica di nocciolo, essenziale per valutare il feedback termico, è effettuato ricorrendo ai moduli semplificati presenti in CRONOS.

**Note**

Autori: G. Glinatsis, G. Grasso, D. Mattioli, R. Pergreffi, F. Rocchi

Copia n.

In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	03/09/2013	NOME	Federico Rocchi	Franca Padoani	Felice De Rosa
			FIRMA	<i>Federico Rocchi</i>	<i>Franca Padoani</i>	<i>Felice De Rosa</i>
REV.	DESCRIZIONE	DATA		REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE

Introduzione

Il PWR da 900 MWe è il tipo di reattore nucleare numericamente più diffuso in Europa. Quattordici delle ventisette centrali frontaliere sono PWR da 900 MWe francesi, della classe CP0, CP1 o CP2. Molti di tali reattori, costruiti agli inizi degli anni '70, hanno ormai superato i 30 anni di vita utile. Appare dunque strategico studiare nel dettaglio tali sistemi, focalizzando l'attenzione sugli aspetti che maggiormente impattano sulla loro sicurezza. Questo rapporto mostra nel dettaglio la neutronica quasi-statica ed per condizioni operazionali, ovvero non incidentali, del primo ciclo di funzionamento di un PWR da 900 MWe, mettendone in luce i principali punti di forza della safety di nocciolo, ovvero le distribuzioni di temperatura, i grandi margini di sicurezza rispetto alle distribuzioni di flusso e di potenza, il worth dei sistemi di controllo e la loro efficacia ecc. I calcoli sono fatti in teoria della diffusione, idonea per questo tipo di reattore termico, ricorrendo al codice di nocciolo CRONOS-2, usando le librerie di sezioni d'urto efficaci a due gruppi calcolate nella precedente annualità con il codice di cella APOLLO-2 [1]. L'accoppiamento con la termoidraulica di nocciolo, essenziale per valutare il feedback termico, è effettuato ricorrendo ai moduli semplificati presenti in CRONOS.

Lo studio della cinetica di alcuni transitori di nocciolo, di interesse per la sicurezza del reattore, è rimandato ad un rapporto successivo.

Descrizione della geometria e dello schema di calcolo adottati

La geometria implementata in Cronos è illustrata in Figura 1. La zonizzazione assiale (geometria di secondo livello) è semplicemente un'estrusione, opportunamente segmentata, della mappa trasversale. In Figura 1 sono altresì mostrati i raggruppamenti logici in gruppi di barre di controllo.

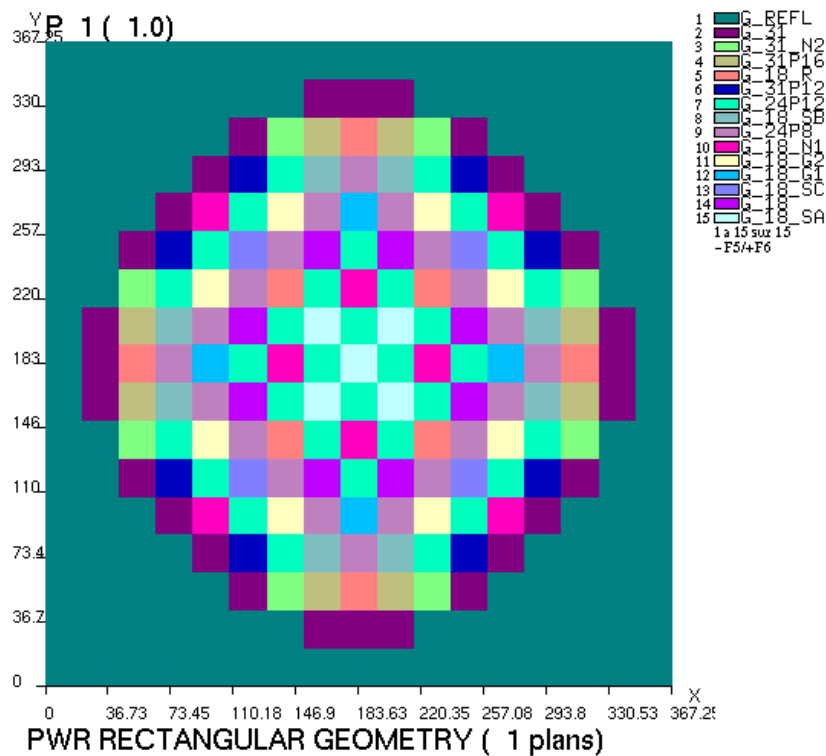


Fig. 1: Geometria e disposizione logica dei gruppi di barre di controllo.

In Figura 2 è invece mostrata la meshatura trasversale e la mappa delle composizioni in condizione ARO (All-rods-out).

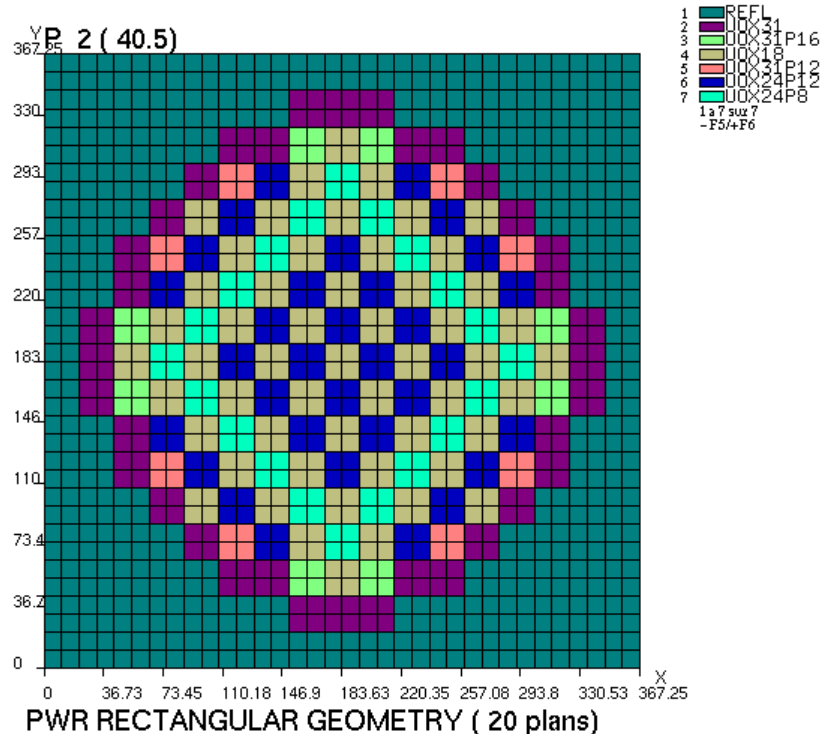


Fig. 2: Mesh trasversale e mappa delle composizioni.

I parametri della meshatura adottata sono i seguenti:

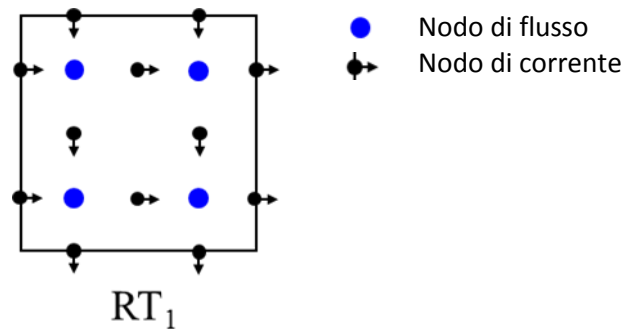
- larghezza assembly: 21.6031 cm;
- numero di suddivisioni lungo x: 35, uniformi;
- numero di suddivisioni lungo y: 35, uniformi;
- numero di suddivisioni trasversali per assembly: 4;
- numero di suddivisioni lungo z: 18 uniformi in zona attiva, 1 per il riflettore superiore, 1 per il riflettore inferiore;
- altezza riflettore superiore: 20 cm;
- altezza riflettore inferiore: 20 cm;
- altezza zona attiva: 368.106 cm.

Il numero di suddivisioni assiali è pari a quello standard comunemente usato per i PWR [2].

Il volume di una cella elementare in zona attiva risulta dunque pari a:

$$V = \frac{368.106 \cdot 21.6031^2}{18 \cdot 4} \cong 2386 \text{ cm}^3$$

I calcoli sono effettuati in approssimazione di diffusione utilizzando il risolutore MINOS. Tale risolutore è basato sul metodo agli elementi finiti misti duali con ADF. Gli elementi finiti utilizzati sono del tipo di Raviart-Thomas  $RT_1$ , ovvero parabolici nella corrente e lineari nel flusso; l'integrazione numerica è del tipo di Gauss.


 Fig. 3: Schema elemento finito  $RT_1$ .

In Figura 3 è riportato uno schema 2D dell'elemento finito di Raviart-Thomas  $RT_1$ , in cui sono graficamente distinti i nodi di flusso (due per ogni direzione) ed i nodi di corrente (due all'interfaccia ed uno centrale per ogni direzione). E' stato poi applicato il metodo di Chebyshev per l'accelerazione delle iterazioni esterne. Sono stati impostati i seguenti criteri di convergenza per i calcoli:

- criterio di convergenza su  $k_{eff}$ : 1 pcm;
- criterio di convergenza sul flusso (criterio integrale con norma in  $L_2$ ): 10 pcm;
- criterio di convergenza sul boro critico: 1 ppm.

Sono stati tenuti come isotopi particolarizzati, ovvero quelli per il cui bruciamento si ricorre alla risoluzione delle equazioni di Bateman, solo quelli presenti nelle catene dello xeno e del samario. Per tutti gli altri isotopi si ricorre ai calcoli di bruciamento effettuati precedentemente da Apollo ed alla loro incorporazione nei calcoli di Cronos tramite la funzione STATE\_UPDATE. Tale approssimazione è un ottimo compromesso tra qualità dei risultati e tempi di calcolo. Il feedback termoidraulico è tenuto in conto con il modello semplificato 1D implementato in Cronos. I parametri adottati per la termoidraulica del canale sono i seguenti:

- raggio esterno della guaina: 0.474364 cm;
- conducibilità termica della guaina: 0.12 W/cm $^2$ ·°C;
- raggio della pellet: 0.41266 cm;
- conducibilità termica della pellet: legge polinomiale del secondo ordine nella temperatura efficace, valida sino a 2500 °C; non sono tenute in considerazione variazioni con il burnup;
- raggio interno della guaina: 0.418 cm;
- coefficiente di scambio termico tra guaina e moderatore: 3.6 W/cm $^2$ ·°C;
- coefficiente di scambio termico tra pellet e guaina: 0.37 W/cm $^2$ ·°C; non sono tenute in considerazione variazioni con la potenza lineare e con il burnup;
- area di flusso idraulico: 0.852 cm $^2$ ;
- coefficienti di Rowland: 4/9 e 5/9;
- velocità di ingresso del refrigerante nel nocciolo: 4.78 m/s.

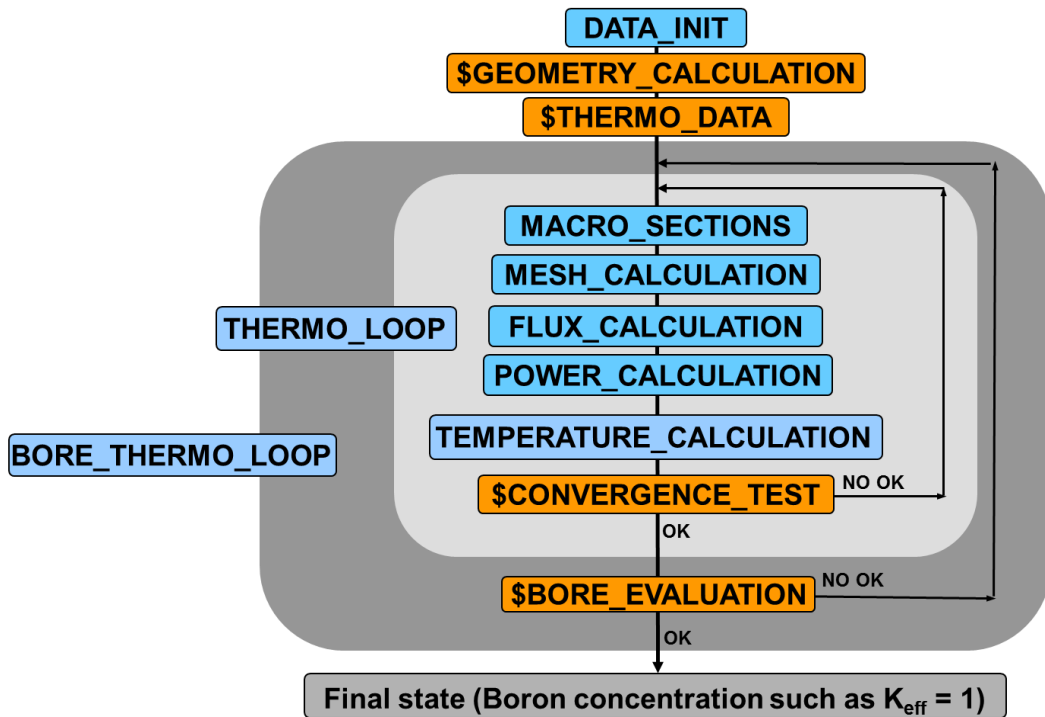


Figura 4: Loop di calcolo per parametri di criticità.

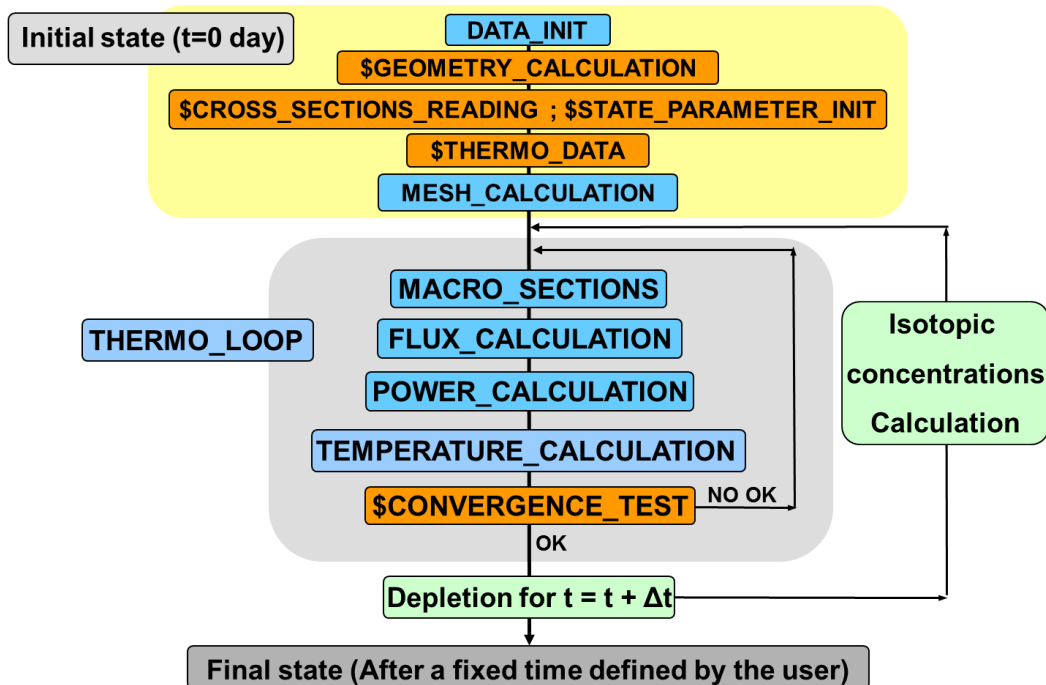



Figura 5: Loop di calcolo per deplezione.

In Fig. 4 e 5 sono illustrati gli schemi dei loop di calcolo per i parametri di criticità e per deplezione, rispettivamente. Calcoli di criticità al variare del bruciamento sono effettuati mediante combinazione opportuna dei due tipi di loop.

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	ADPFISS – LP1 – 006	0	L	6	34

La convergenza termoidraulica è verificata con una norma in L1. Si richiede che il massimo dell'errore relativo della potenza su tutte le mesh sia inferiore a 100 pcm (0.1%).

### Grandezze calcolate e risultati

L'avviamento a freddo di un PWR consiste nelle seguenti manovre:

- riempimento del primario;
- riscaldamento e pressurizzazione dell'acqua del primario sino a circa 27 bar e 90 °C mediante RHR in modalità inversa di funzionamento;
- estrazione delle barre di sicurezza sino al raggiungimento di una configurazione critica fredda;
- salita in temperatura sino a 180 °C;
- arresto del RHR, messa in servizio dei GV e del pressurizzatore;
- salita mediante GV e pressurizzatore sino a 286 °C e 155 bar;
- variazione della concentrazione di boro sino a rendere il sistema critico a caldo;
- salita in potenza mediante estrazione delle barre:
  - al 2% della potenza nominale si accoppiano primario e secondario;
  - al 20% della potenza nominale si passa alla regolazione in automatico delle barre di controllo ed al calcolo delle mappe di flusso; l'ulteriore salita avviene ad un rateo di circa il 3%/ora.

Il combustibile deve avere ad inizio ciclo un valore positivo di reattività totale  $\rho_T$  tale da controbilanciare, istante per istante, l'antireattività introdotta dal bruciamento del combustibile e quella dovuta alla transizione da freddo a caldo, agli avvelenamenti da xeno e samario, ed al blocco incidentale entro il nocciolo di una barra di controllo, ovvero:

$$\rho_T = \rho_R + \rho_V$$

in cui  $\rho_R$ , detta riserva di reattività, è la reattività asservita a controbilanciare il bruciamento del combustibile, e  $\rho_V$ , detta reattività vitale, è la reattività atta a controbilanciare la transizione freddo-caldo, l'avvelenamento da xeno e samario, ed il blocco di una barra di controllo:

$$\rho_V = -(\Delta\rho_M + \Delta\rho_F + \Delta\rho_X + \Delta\rho_G)$$

essendo

- $\Delta\rho_M = \alpha_M \cdot \Delta T_M < 0$  la variazione di reattività dovuta al riscaldamento del moderatore;
- $\Delta\rho_F = \alpha_F \cdot \Delta T_F < 0$  la variazione di reattività dovuta al riscaldamento del fuel (effetto Doppler);
- $\Delta\rho_X < 0$  la variazione di reattività dovuta all'avvelenamento da xeno e samario;
- $\Delta\rho_G < 0$  la variazione di reattività dovuta al blocco incidentale di una barra di controllo nel nocciolo.

Il bilancio di reattività è illustrato schematicamente in Figura 6 (non in scala). In tale figura sono illustrati i seguenti stati:

- 1: arresto a freddo;
- 2: critico a freddo, potenza nulla (CZP, è lo stato di massima reattività);



- 3: critico a caldo, potenza nulla (HZP);
- 4: critico a caldo, piena potenza, BOC (HFP);
- 5: critico a caldo, piena potenza, equilibrio di Xe e Sm (XSP).

A tali stati segue l'andamento nel tempo, in cui a EOC la concentrazione di boro è stata praticamente annullata per compensare l'antireattività dovuta al bruciamento (ovvero il venir meno della riserva di reattività); nel fuel rimane dunque la sola reattività vitale. Si nota che il decremento di riserva di reattività è ipotizzato lineare nello schema, tuttavia tale può non essere se nel nocciolo sono presenti grandi quantità di veleni bruciabili. Il decremento di concentrazione di boro è di circa 3 ppm/giorno, che corrisponde ad un decremento di circa 30-35 pcm/giorno.

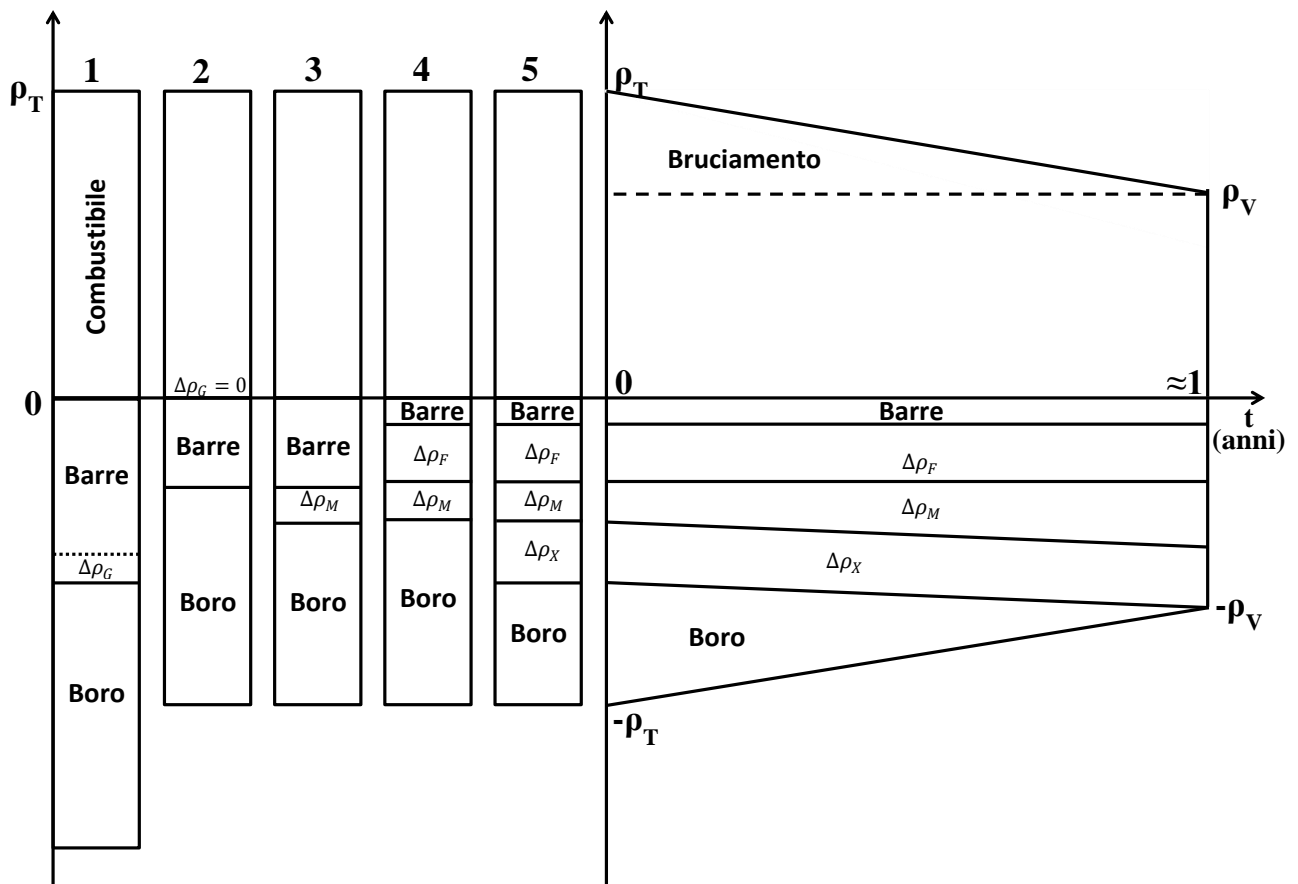


Figura 6: Schema del bilancio di reattività.

In Tabella 1, sono riportati i valori calcolati per il keff dei principali stati del reattore, in ipotesi di ARO (all-rods-out).

Stato del reattore (ARO)	Keff
CZP (isoterma 20 °C e 1 bar)	1.17265
HZP (isoterma 286 °C e 155 bar)	1.16283
HFP – BOC	1.13364
HFP – XSP (equilibrio di Xe e Sm)	1.10364

Tabella 1: Keff in corrispondenza ad alcuni stati di funzionamento del reattore (ARO).

Contributi al bilancio di reattività (ARO) (pcm)	
$\rho_R$	10364
$\Delta\rho_F$	-255
$\Delta\rho_M$	-3646
$\Delta\rho_X$	-2727 (Xe) / -273 (Sm) = -3000
$\rho_T$	17265

Tabella 2: Bilancio di reattività (ARO).

In Tabella 2 sono splittati i vari contributi al bilancio di reattività.

In Fig. 7 è mostrato l'andamento del keff al variare del bruciamento sino al raggiungimento del valore keff=1, ovvero tra BOC ed EOC. Il primo rapidissimo calo di reattività è dovuto in massima parte all'avvelenamento da xeno e samario, sino al punto di XSP; si registra successivamente una piccola zona di plateau, essenzialmente dovuta al bruciamento dei veleni bruciabili ed al raggiungimento della saturazione di Pu-239, dopodichè la curva cala pressoché linearmente.

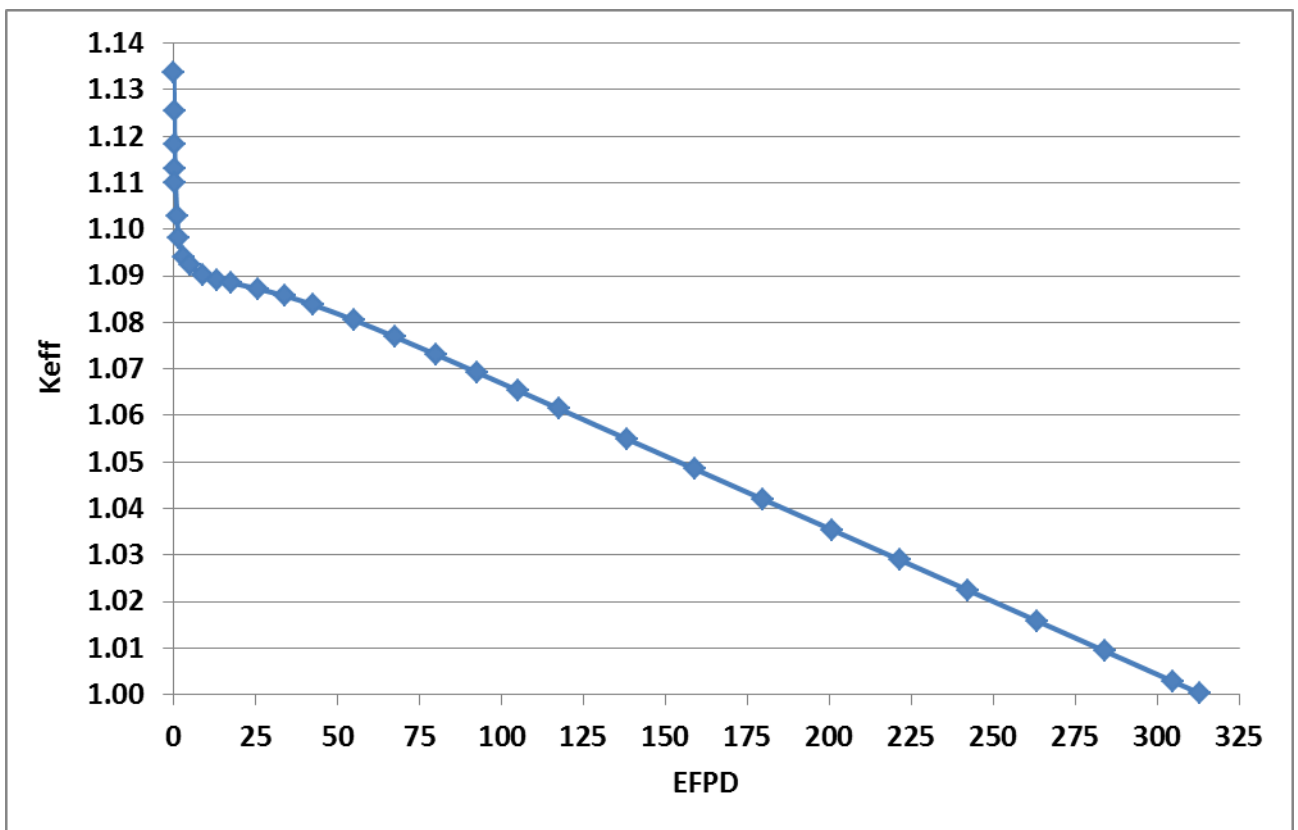


Figura 7: Andamento di Keff all'aumentare del bruciamento (ARO).

In Fig. 8 è mostrata la curva di letdown del boro; presenta l'andamento classico dei PWR. Il valore iniziale è di circa 1050 ppm, ben al di sotto del limite di sicurezza pari a circa 1500-2000 ppm. La curva assomiglia nel suo trend a quella di keff; il worth del boro varia infatti relativamente poco al variare del bruciamento. Tale grandezza è graficata in Fig. 9 secondo due diverse definizioni, ovvero come  $\rho/C$ , essendo  $\rho = (k_{eff} - 1)/k_{eff}$  e C la concentrazione di boro, ovvero come  $(k_{eff} - 1)/C$ . Come teoricamente predetto dalla Fisica del Reattore, il worth scende rapidamente da un valore iniziale compreso tra 11 e 12 pcm/ppm a causa dell'indurimento dello spettro dovuto essenzialmente al build-up del plutonio, e si stabilizza poi a valori pressoché costanti attorno a 10-11 pcm/ppm poiché lo spettro neutronico ha raggiunto la sua forma di EOC. Negli ultimi 10-20 EFPD la curva

presenta un andamento anomalo, dovuto molto probabilmente al fallimento dei metodi numerici quando la concentrazione di boro si avvicina a zero.

In Tab. 3 è mostrato il bilancio di massa tra BOC ed EOC per alcuni isotopi. E' interessante notare come il contributo di <sup>235</sup>U renda conto di circa 261 EFPD; i rimanenti 50 EFPD sono da imputare al build-up di altri fissili a partire da <sup>238</sup>U, primo fra tutti al build-up di <sup>239</sup>Pu.

In Fig. 10 è mostrata la correlazione, pressoché lineare, tra EFPD e burnup medio di nocciolo. Il burnup medio di nocciolo risulta correlato agli EFPD dalla seguente relazione:

$$BU \text{ (GWd/MTU)} = 0.0383 * t \text{ (EFPD)}$$

E' interessante valutare la variazione tra BOC ed EOC di alcune proprietà di nocciolo.

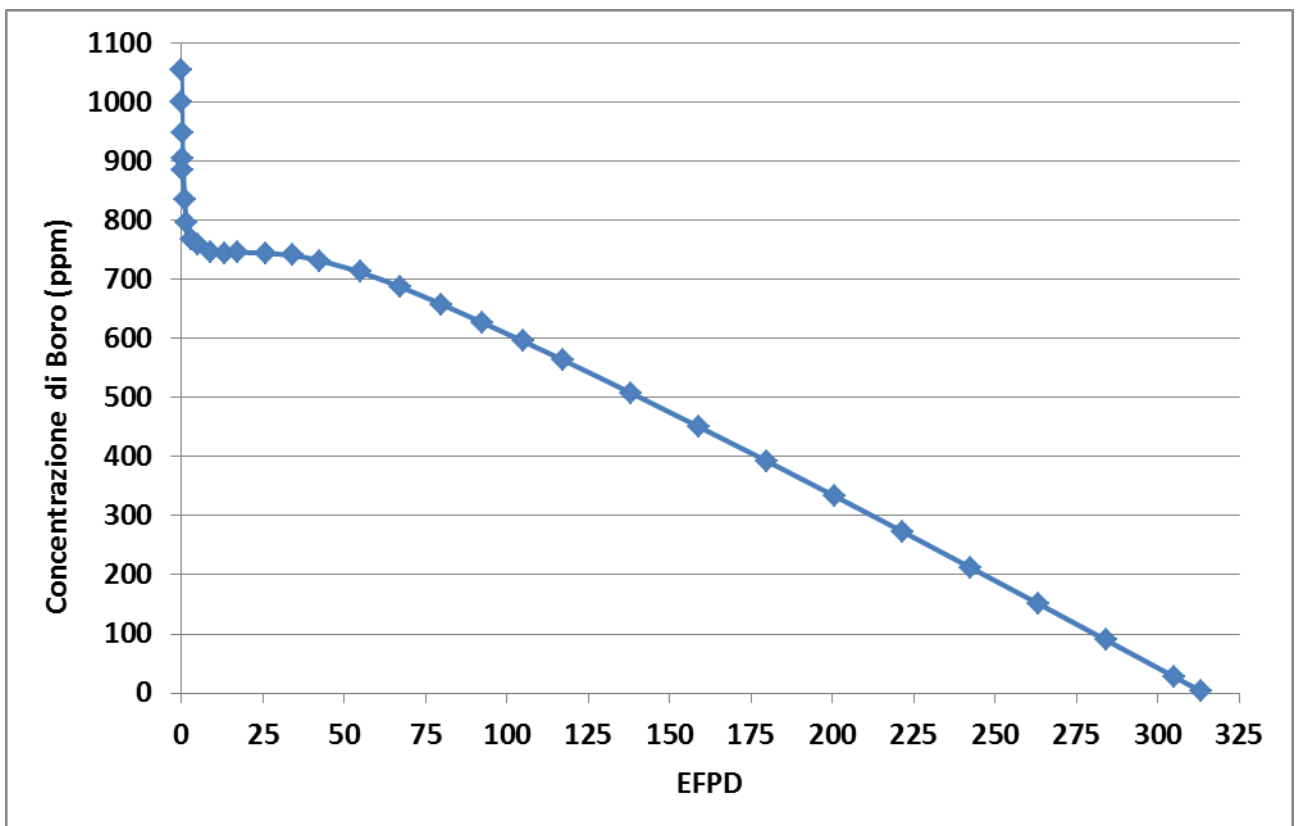


Figura 8: Curva di letdown del boro (ARO).

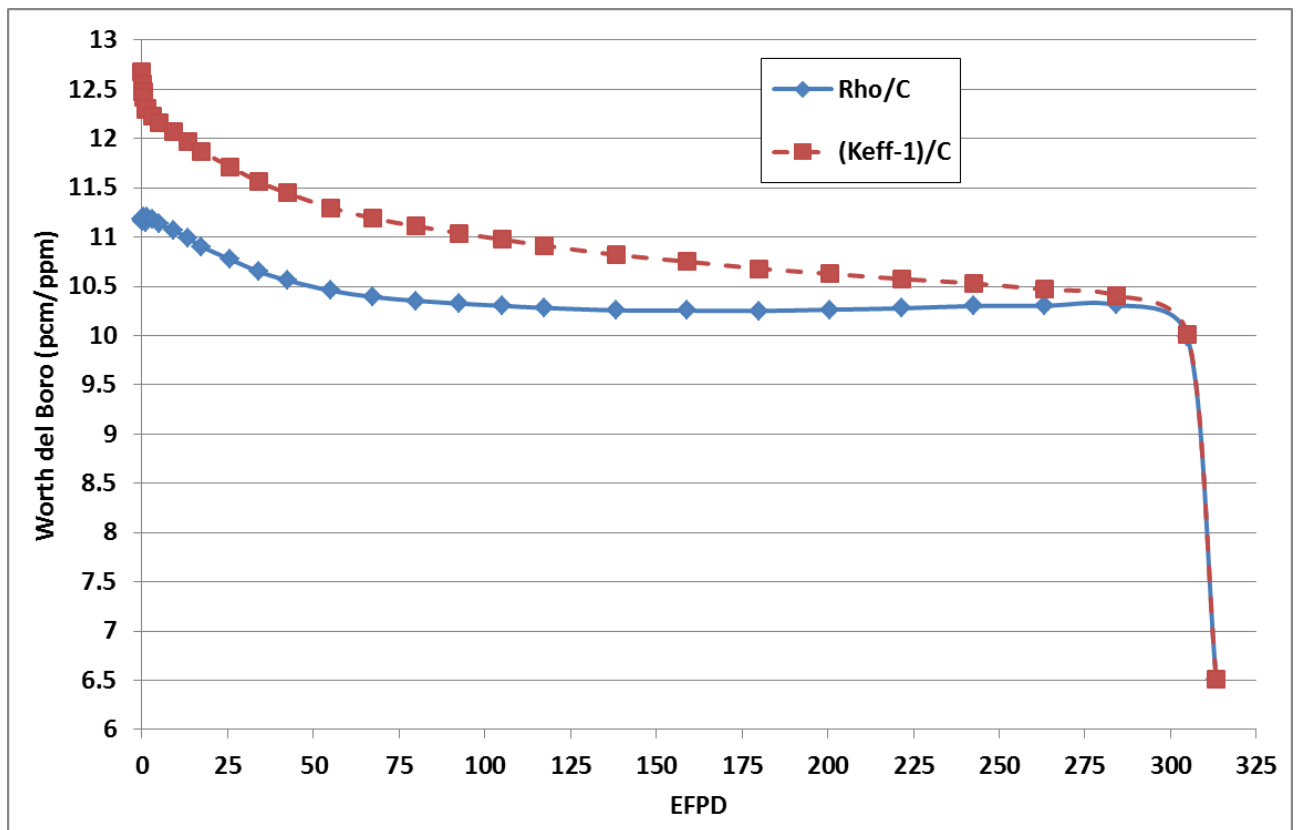


Figura 9: Worth del boro all'aumentare del bruciamento (ARO).

Isotopo	BOC (kg)	EOC (kg)	Variazione (kg)
U235	1760	1030	-730 ( $\approx$ 261 EFPD)
Pu239	0	276	276
U236	0	126	126
Pu240	0	68.1	68.1
Pu241	0	33.0	33.0

Tabella 3: Bilancio di masse di alcuni attinidi.

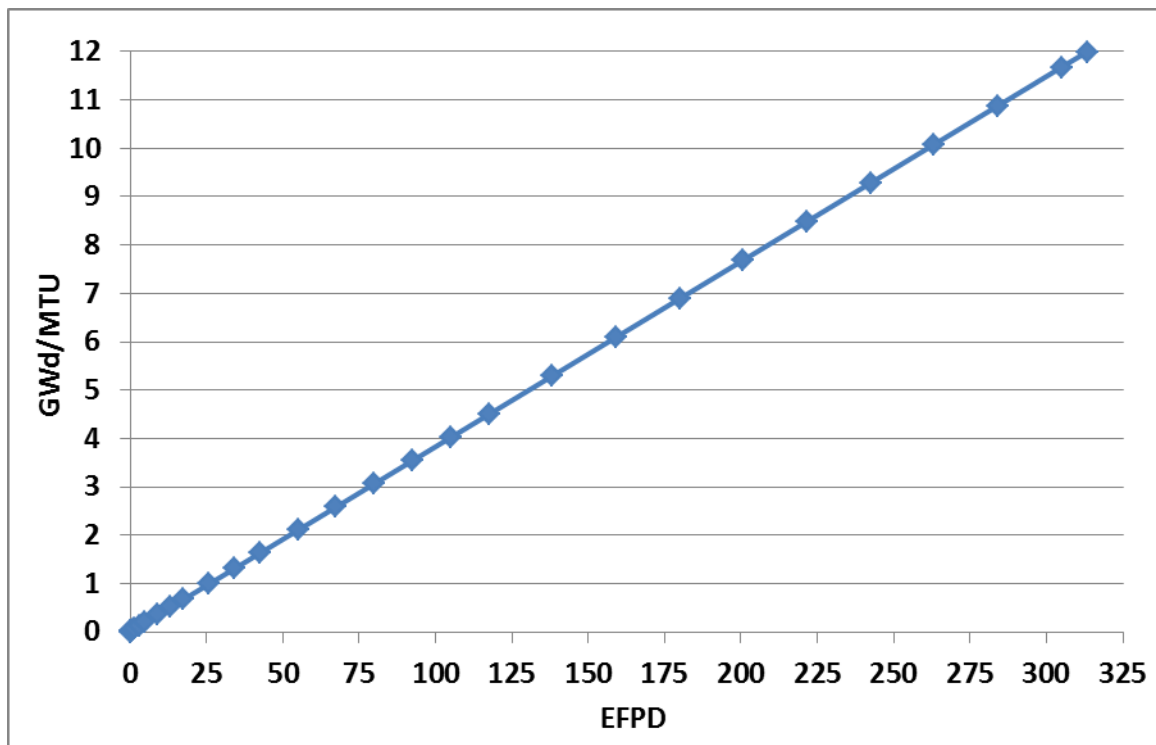



Figura 10: Burnup medio di nocciolo (ARO) al variare del tempo.

Nelle Figg. 11 e 12 sono mostrate le distribuzioni della temperatura efficace TCOM a BOC ed EOC rispettivamente. Nelle Figg. 13 e 14 sono mostrati degli zoom sui piani 10 e 4 della temperatura efficace a BOC ed EOC; nelle Figg. 15 e 16 sono riportate le distribuzioni della temperatura di esterno pellet, sempre a BOC ed EOC; nelle Figg. 17 e 18 sono infine riportate le distribuzioni di temperatura di center line, ancora una volta a BOC ed EOC. Si osserva molto bene, dal raffronto delle figure, come la distribuzione di temperatura si sia enormemente uniformata, dunque con un forte abbassamento dei valori massimi, per effetto del bruciamento, inizialmente maggiore al centro che in periferia, e poi sempre più accentuato in periferia. E' questa una importantissima caratteristica di sicurezza intrinseca, tipica dei PWR, per i quali all'aumentare del bruciamento si ha un abbassamento della temperatura del fuel anziché un innalzamento; tale diminuzione comporta infatti un ampliamento del margine di sicurezza termico, già molto ampio, di ulteriori 300 gradi circa (center line). In Figg. 19-20 sono mostrate le distribuzioni di densità di moderatore DMOD a BOC ed EOC. In Figg. 21 e 22 sono mostrate le distribuzioni di concentrazione di  $^{235}\text{U}$ , sempre a BOC ed EOC; si può notare molto bene l'effetto del bruciamento su questa grandezza. In Fig. 23 è invece mostrata la concentrazione ad EOC di  $^{239}\text{Pu}$ ; si può notare come questa sia pressoché uniforme ed abbia ormai raggiunto la sua distribuzione di equilibrio. In Figg. 24 e 25 sono mostrate le distribuzioni del fattore di forma per la densità di potenza a BOC ed EOC rispettivamente. Si nota, fatto assai positivo, come ad EOC la distribuzione sia decisamente più uniforme che a BOC. Per ricavare il valore di potenza reale espresso da ciascuna cella elementare occorre moltiplicare il valore del fattore di forma per:

$$2775/(157 \cdot 4 \cdot 18) = 0.2455 \text{ MW}$$

E' interessante notare come il fattore di forma sia sempre molto inferiore al valore di 2.32, che è considerato il limite superiore di sicurezza per il PWR da 900 MWe; si ricorda inoltre che un fattore di forma pari a 2.5 corrisponde ad una potenza lineare di circa 450 W/cm. La potenza lineare media di nocciolo per il PWR in esame risulta pertanto pari a circa 180 W/cm. L'abbassamento dei fattori di forma tra BOC ed EOC è un'altra caratteristica ad impatto fortemente positivo sulla safety del PWR; è

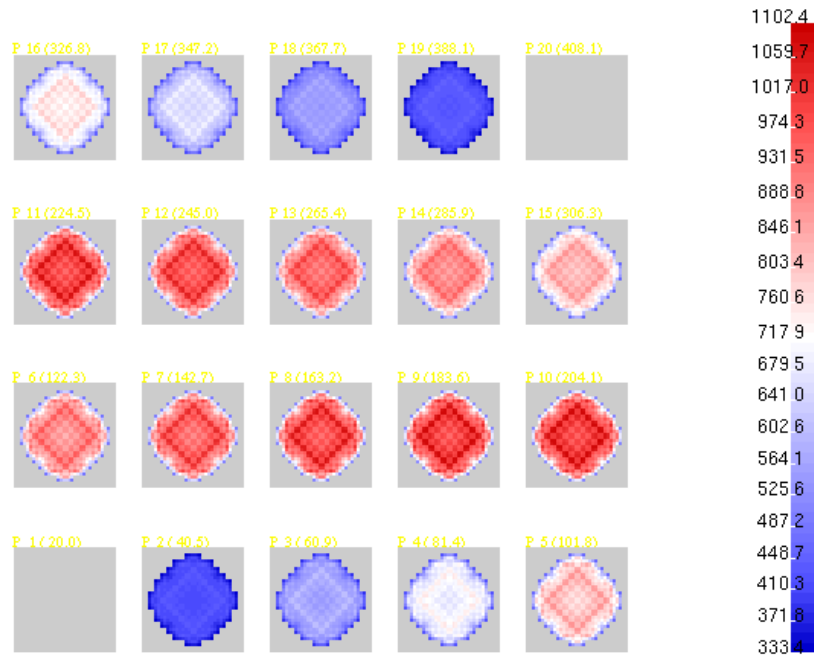
 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	ADPFISS – LP1 – 006	0	L	12	34

in effetti una delle cause per cui si ha l'abbassamento, poco sopra menzionato, delle temperature massime con il burnup. In Fig. 26 è mostrato uno zoom sul piano P4 del fattore di forma ad EOC. In Fig. 27 è riportata la distribuzione del burnup ad EOC; il valore massimo si attesta attorno ai 17 GWd/MTU e quello minimo a 1.6 GWd/MTU.

In Tab. 4 sono riportate le variazioni tra EOC e BOC di alcuni parametri di nocciolo.

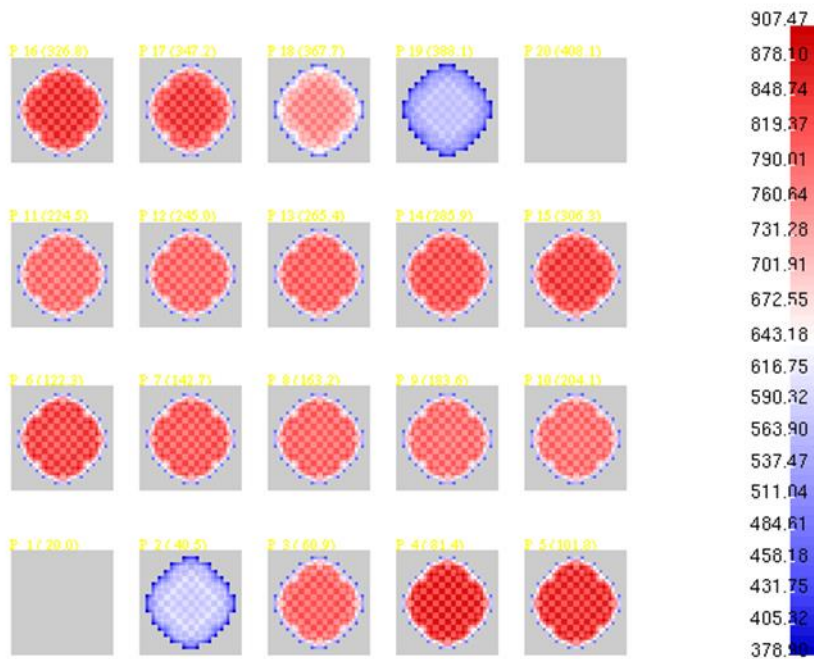
In Figg. 28 e 29 sono riportati i profili radiali a BOC ed EOC rispettivamente del flusso veloce e termico nel piano di mezzeria. In Figg. 30 e 31 sono riportati i profili assiali a BOC ed EOC rispettivamente del flusso veloce e termico sull'asse centrale del reattore. Per i profili radiali, i ripple presenti sono ovviamente dovuti ai diversi arricchimenti; il bruciamento attenua i ripple stessi e rende leggermente più uniforme la distribuzione. Il profilo assiale a BOC presenterebbe la caratteristica forma per cui il massimo sarebbe nella parte inferiore del nocciolo a causa della diversa moderazione assiale dovuta alla distribuzione non uniforme di DMOD; tuttavia una variazione di DMOD altera nello stesso senso anche la concentrazione di boro, che compensa lo shift verso il basso rendendo il profilo assiale praticamente simmetrico rispetto alla mezzeria del nocciolo. Il bruciamento, come già osservato, procede dalla parte centrale del nocciolo e, man mano che la zona centrale stessa si impoverisce di  $^{235}\text{U}$ , coinvolge sempre più le zone periferiche, producendo ad EOC un profilo praticamente piatto. Questo giustifica l'abbassamento sopra menzionato delle temperature di fuel, e quindi è in ultima analisi la ragione dell'aumentato margine di sicurezza termico con il burnup dei PWR.

In Fig. 32 è mostrato un confronto tra profili assiali di burnup normalizzati; la curva relativa al calcolo CRONOS è riferita all'assembly centrale ad EOC, con un burnup medio pari a 13.25 GWd/MTU; la curva di confronto è quella calcolata per l'assembly A85 del reattore USA di Seabrook [2]. Si tratta di un PWR da 1200 MWe; l'assembly A85 era un W 17x17 (tipo WS161), con arricchimento pari a 1.61 w%, bruciato sino a 12.36 GWd/MTU. Il raffronto è ottimo.



Value of TCOM ( 20 plans)

Figura 11: Distribuzione di TCOM (°C) a BOC (ARO).



Value of TCOM ( 20 plans)

Figura 12: Distribuzione di TCOM (°C) a EOC (ARO).

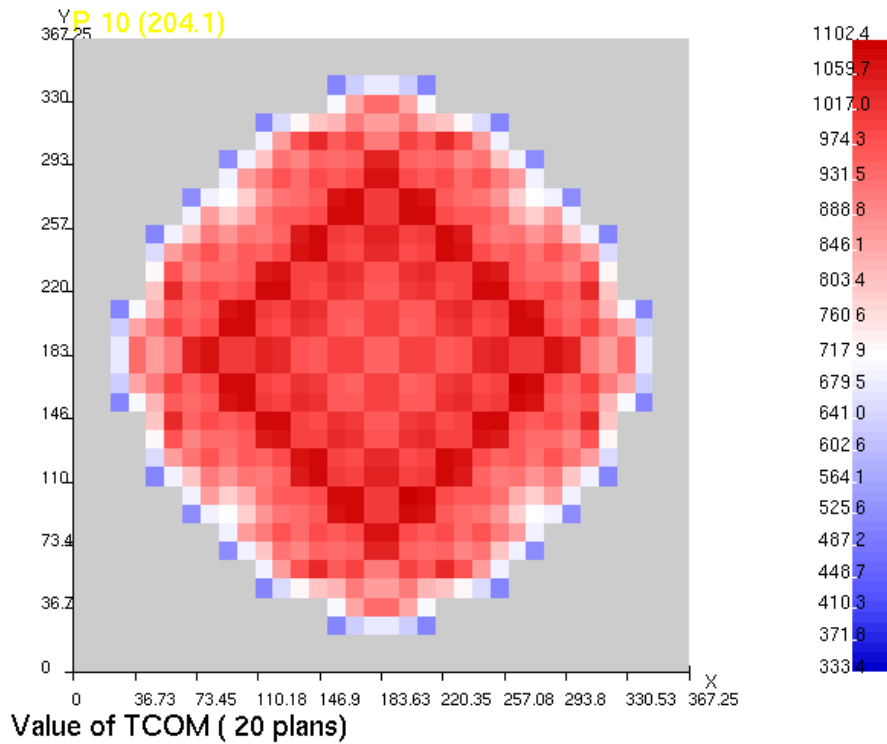


Figura 13: Dettaglio del piano P10 (204.1 cm) (da Fig. 11).

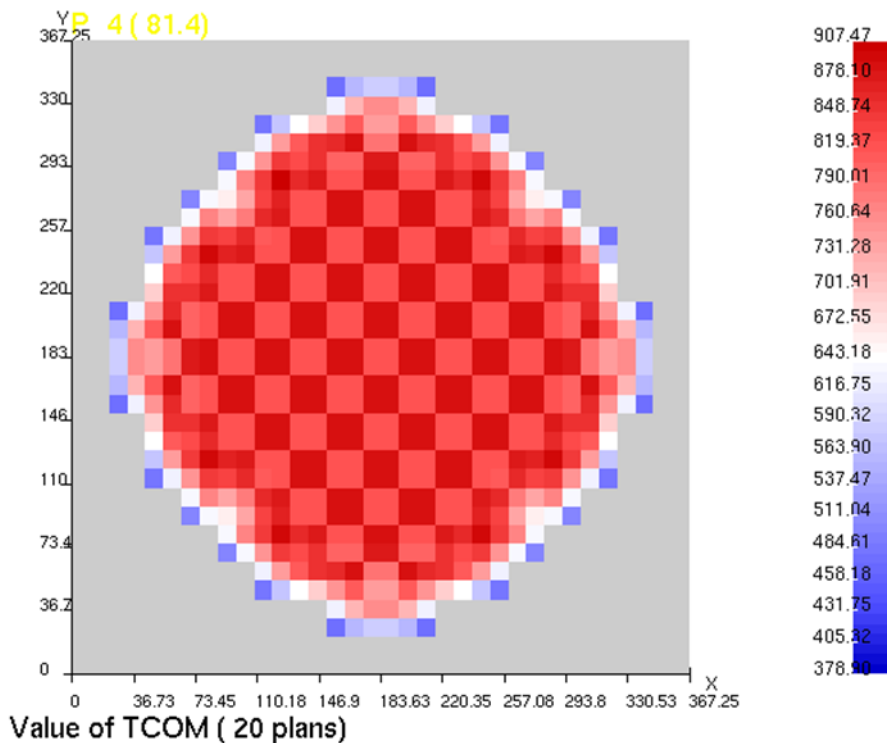


Figura 14: Dettaglio del piano P4 (81.4 cm) (da Fig. 12).



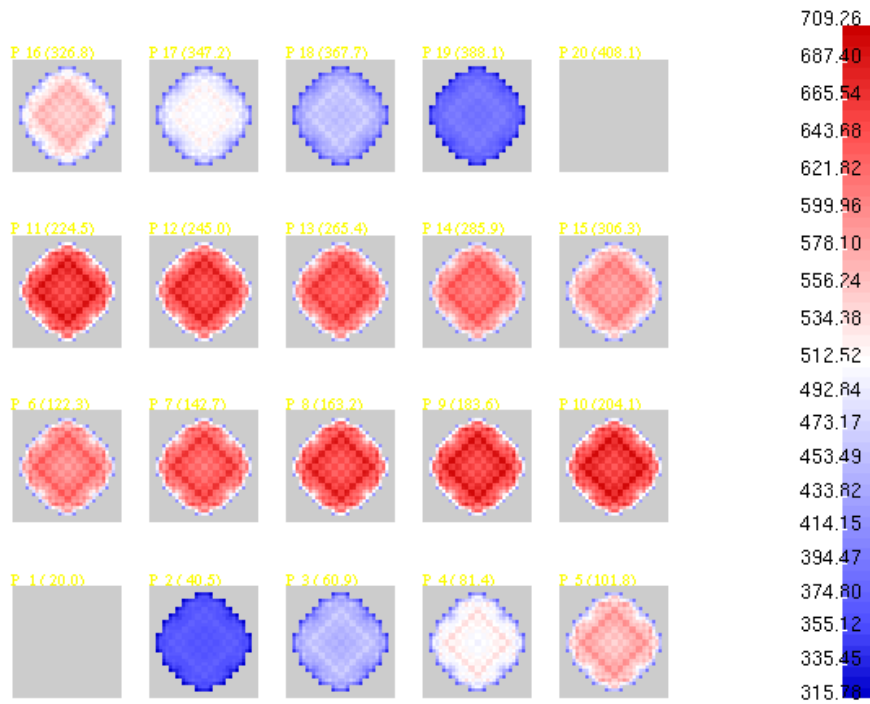


Figura 15: Distribuzione di temperatura esterno pellet (°C) a BOC (ARO).

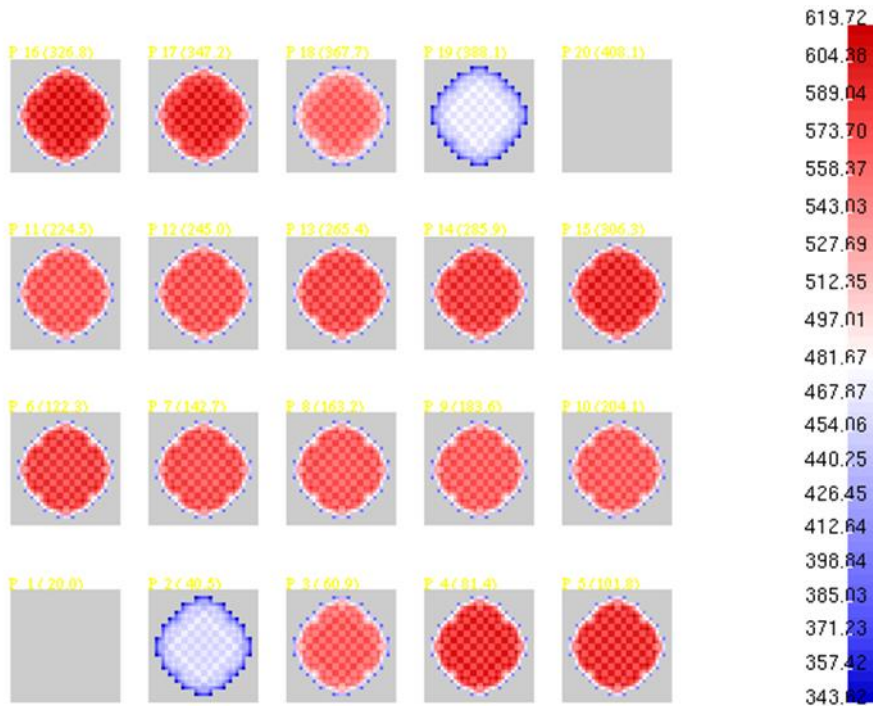


Figura 16: Distribuzione di temperatura esterno pellet (°C) a EOC (ARO).

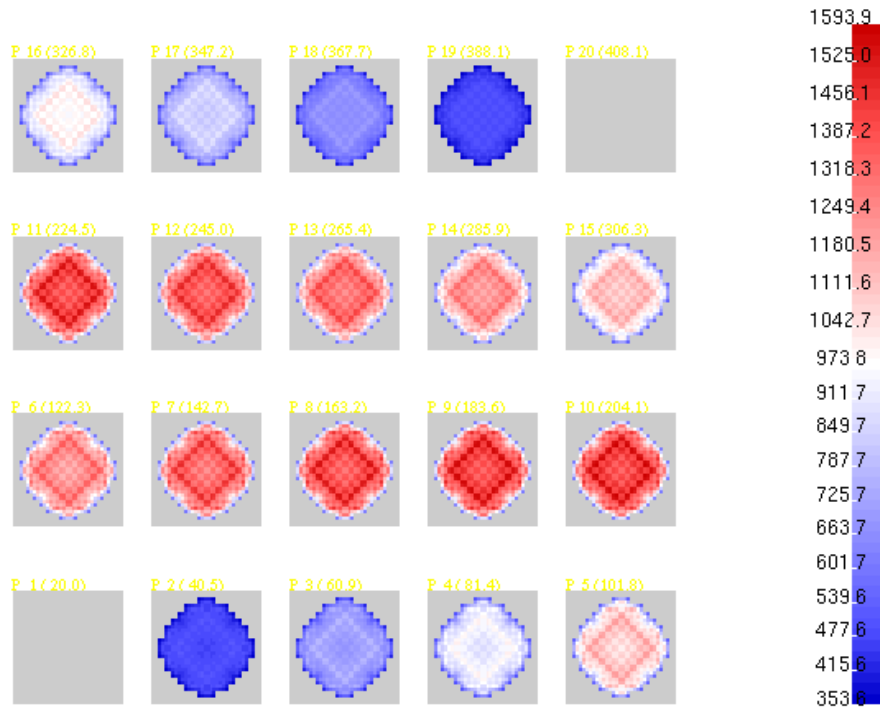


Figura 17: Distribuzione di temperatura center line (°C) a BOC (ARO).

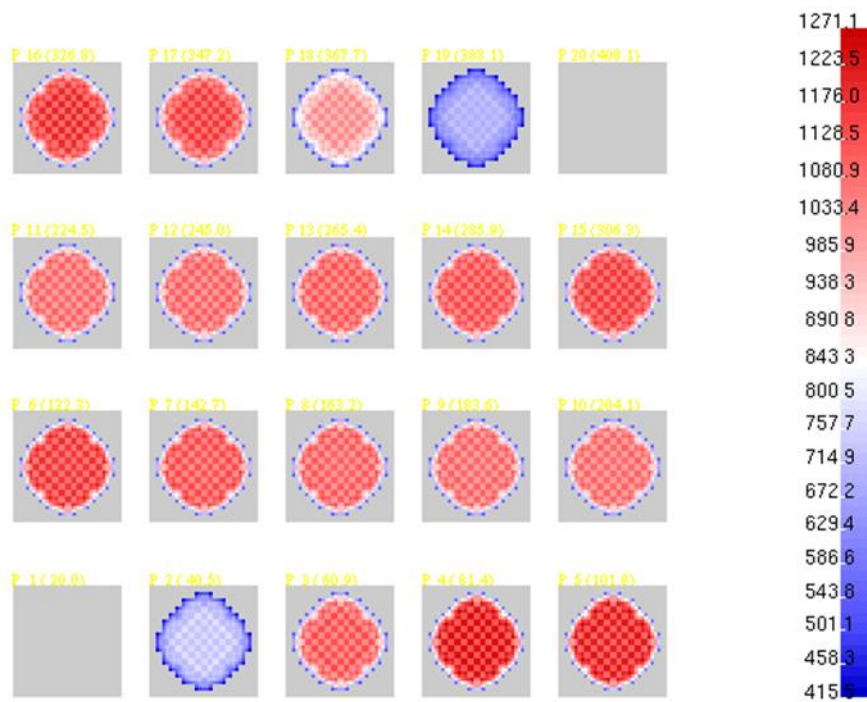
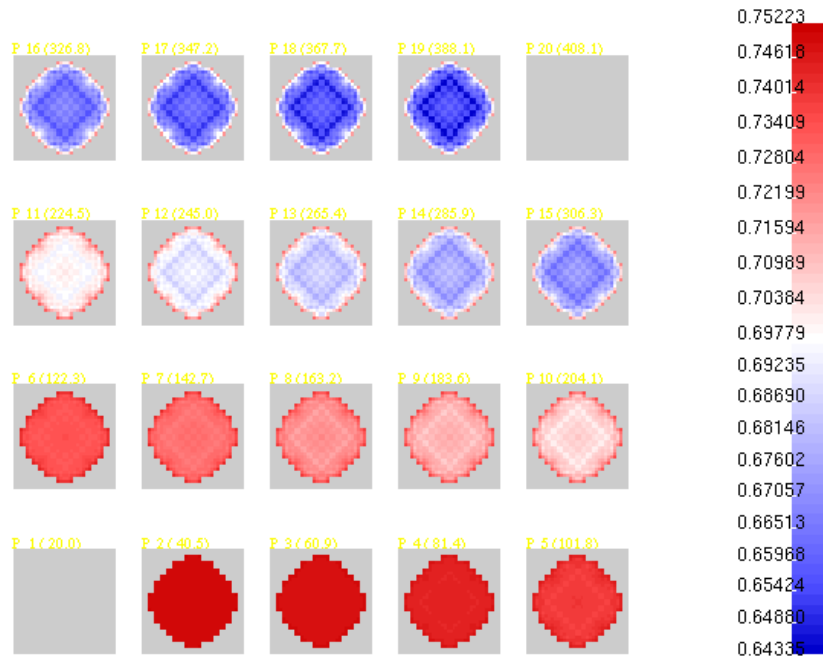
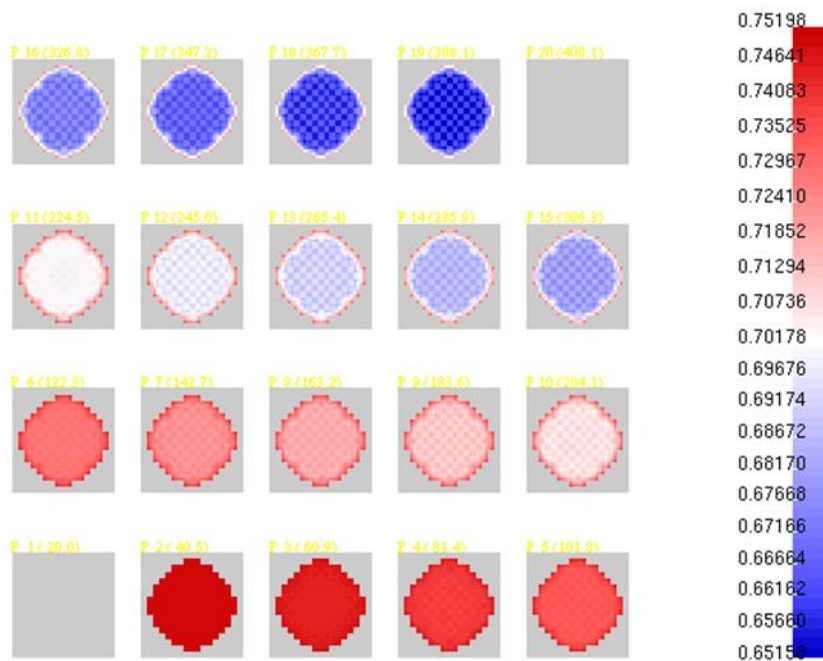


Figura 18: Distribuzione di temperatura center line (°C) a EOC (ARO).



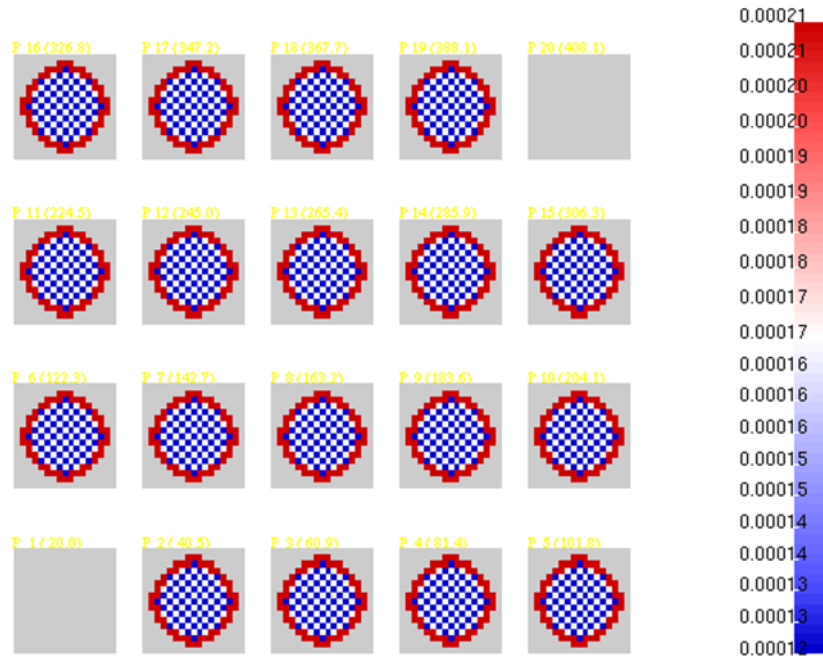
Value of DMOD ( 20 plans)

Figura 19: Distribuzione di DMOD ( $g/cm^3$ ) a BOC (ARO).



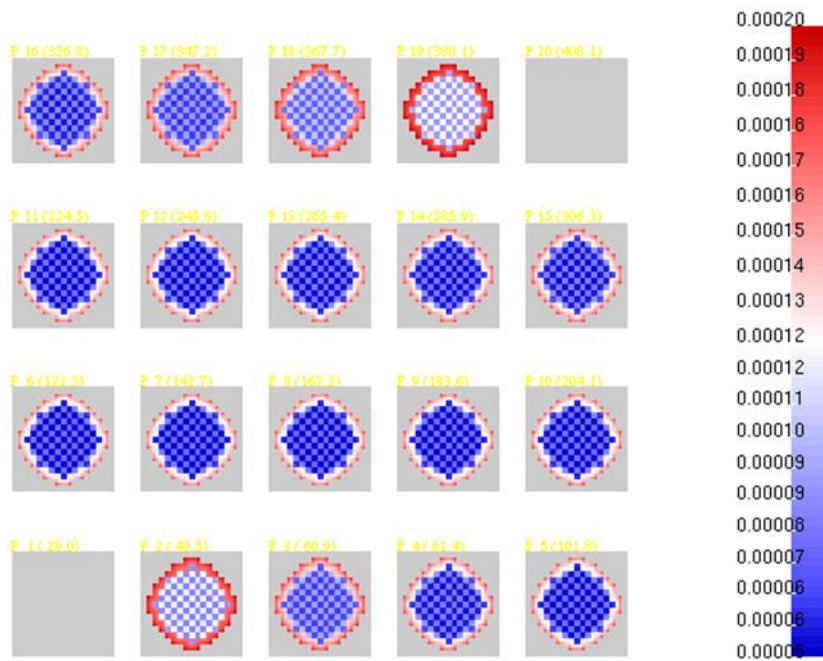
Value of DMOD ( 20 plans)

Figura 20: Distribuzione di DMOD ( $g/cm^3$ ) a EOC (ARO).



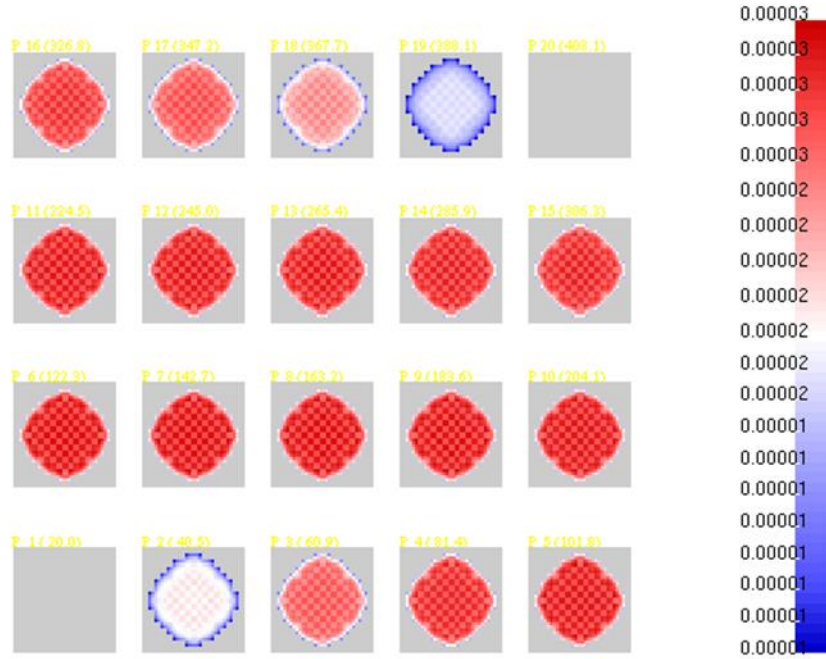
Concentration of U235 ( 20 plans)

Figura 21: Distribuzione di U235 (#/b-cm) a BOC (ARO).



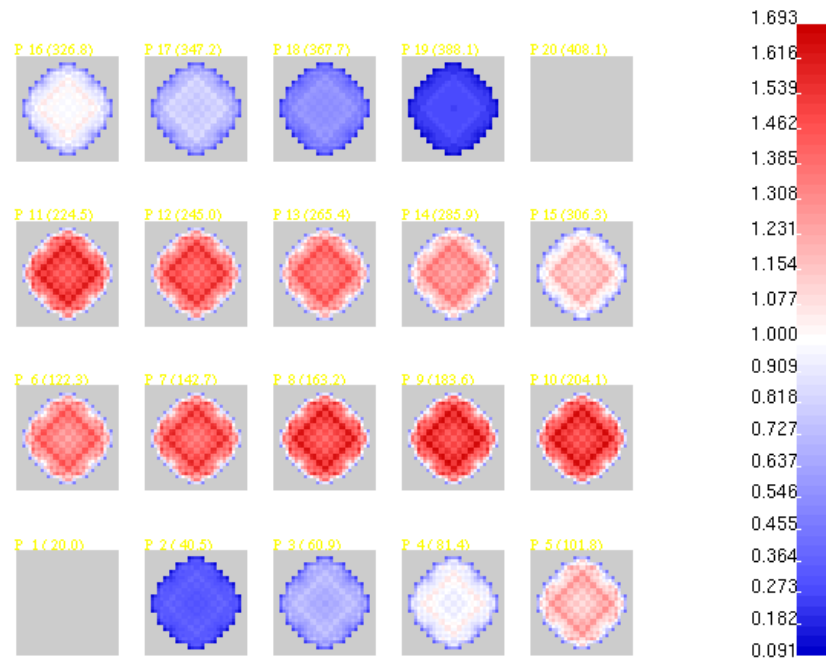
Concentration of U235 ( 20 plans)

Figura 22: Distribuzione di U235 (#/b-cm) a EOC (ARO).



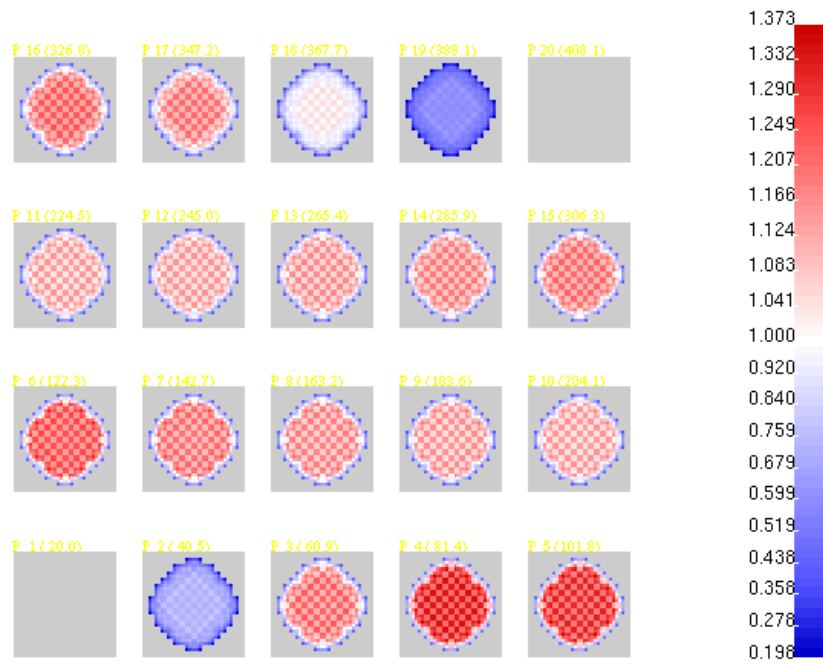
**Concentration of PU239 ( 20 plans)**

Figura 23: Distribuzione di Pu239 (#/b-cm) a EOC (ARO).



**Power ( 20 plans)**

Figura 24: Distribuzione del fattore di forma della densità di potenza a BOC (ARO).



Power ( 20 plans)

Figura 25: Distribuzione del fattore di forma della densità di potenza a EOC (ARO).

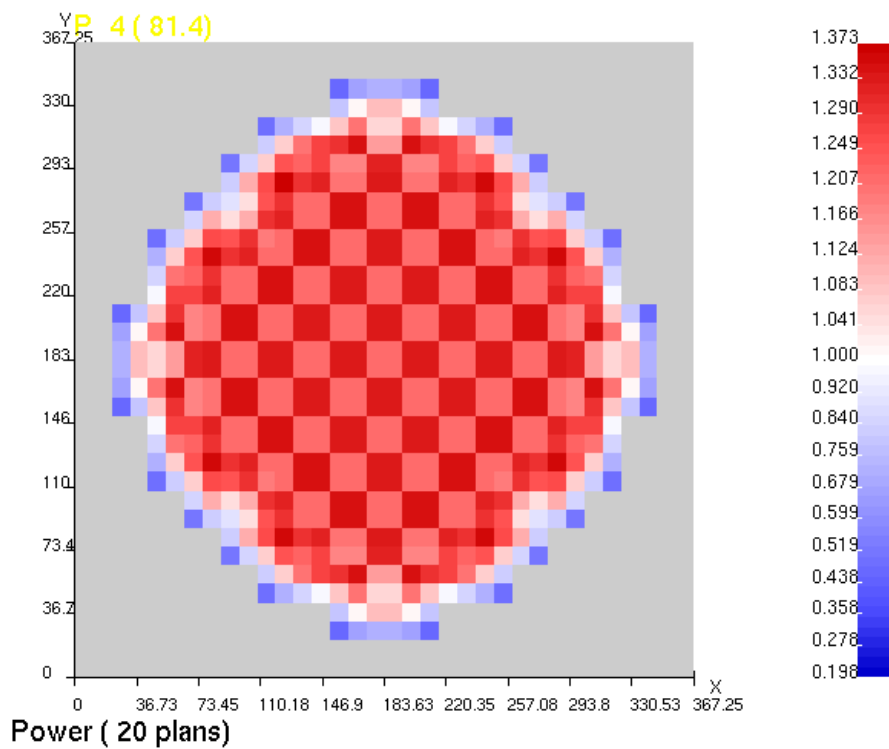
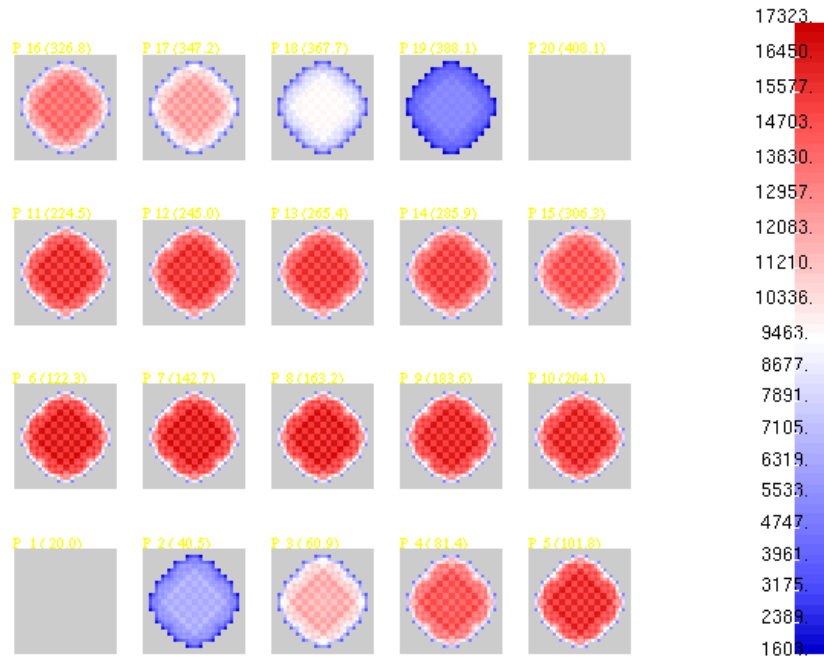


Figura 26: Dettaglio del piano P4 (81.4 cm) (da Fig. 25).



Value of MACR ( 20 plans)

Figura 27: Distribuzione di burnup (MWd/MTU) a EOC (ARO).

	BOC	EOC	$\Delta$
Max $T_{eff}$ (°C)	1102	907	-195
Max $T_{Cl}$ (°C)	1594	1271	-323
Max $T_{ext}$ (°C)	709	620	-89
Concentrazione minima 235U (#/b·cm)	0.00012	0.00005	-0.00007
Concentrazione massima 235U (#/b·cm)	0.00021	0.00020	-0.00001
Concentrazione minima 239Pu (#/b·cm)	-	0.00001	0.00001
Concentrazione massima 239Pu (#/b·cm)	-	0.00003	0.00003
FF massimo densità di potenza	1.693	1.373	-0.320
FF minimo densità di potenza	0.091	0.198	0.107
Burnup minimo (GWd/MTU)	-	1.6	-
Burnup massimo (GWd/MTU)	-	17.3	-

Tab. 4: Variazioni tra BOC ed EOC di alcune grandezze.

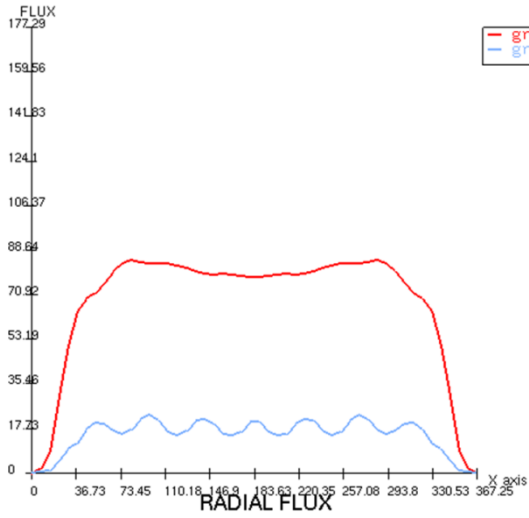


Fig. 28: Profilo radiale di flusso (u.a.) nel piano di mezzeria a BOC (ARO).

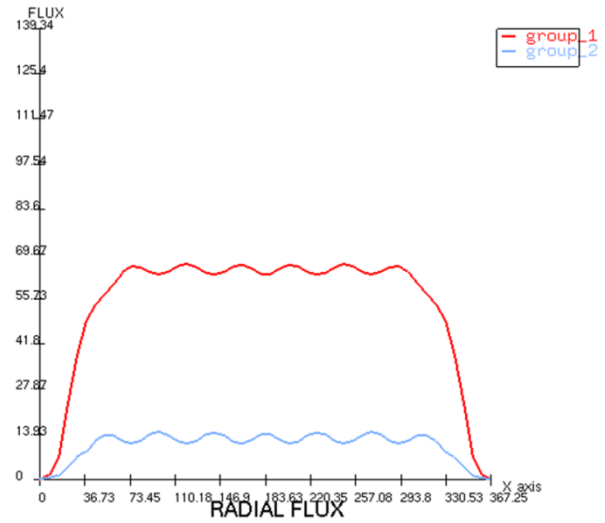


Fig. 29: Profilo radiale di flusso (u.a.) nel piano di mezzeria a EOC (ARO).

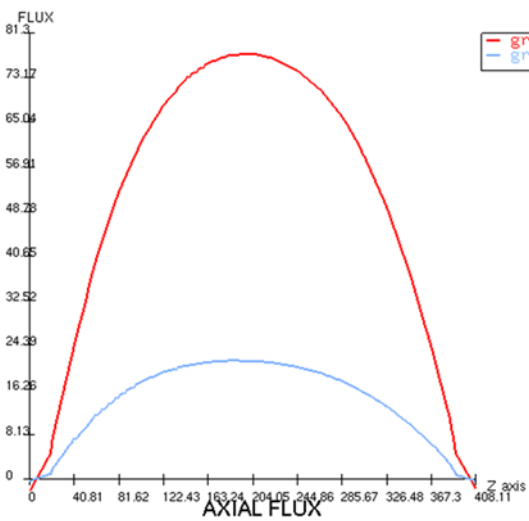


Fig. 30: Profilo assiale di flusso (u.a.) al centro del nocciolo a BOC (ARO).

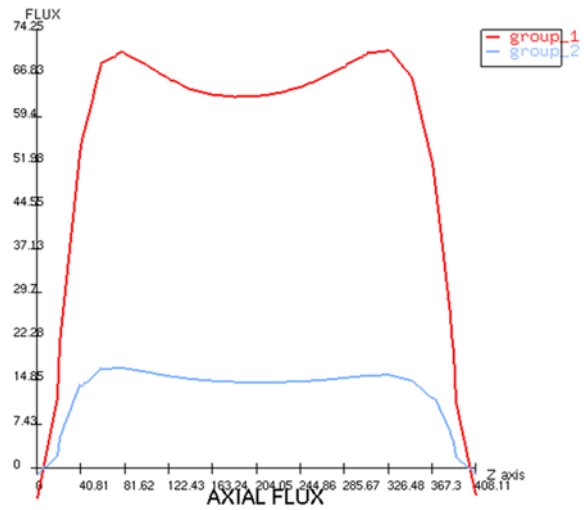


Fig. 31: Profilo assiale di flusso (u.a.) al centro del nocciolo a EOC (ARO).



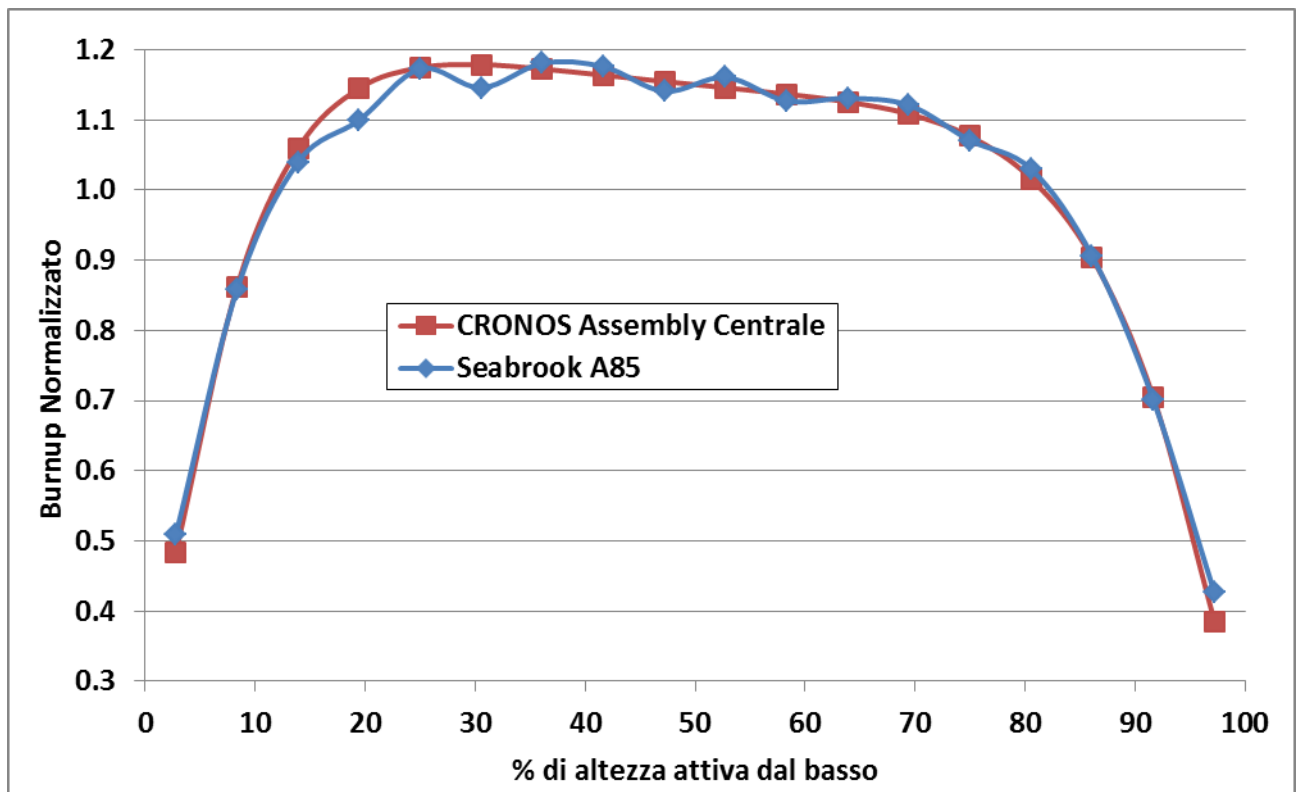


Fig. 32: Confronto tra profili assiali di burnup ad EOC.

Al fine di valutare le caratteristiche di sicurezza del PWR 900 MWe è necessario valutare l’efficacia del sistema di controllo. In Tab. 5 sono riportati i worth in pcm degli otto gruppi di barre di controllo a piena potenza ed a potenza zero, a BOC ed EOC. I valori si riferiscono a barre completamente inserite. Si può notare ad EOC una leggera diminuzione, con l’eccezione dei gruppi G\_18\_N1 e G\_18\_SC, del worth causata principalmente, come noto [3], dall’indurimento dello spettro, a sua volta dovuto al build-up del plutonio. L’effetto non è molto marcato perché i valori di burnup raggiunti non sono ancora tali da implicare grandi quantitativi di plutonio nel combustibile.

	Full Power BOC	Zero Power BOC	Full Power EOC	Zero Power EOC
G_18_R	1444.31	1351.18	1336.90	1249.98
G_18_G1	498.46	461.05	446.61	417.90
G_18_G2	906.67	848.65	902.09	858.53
G_18_N1	1052.27	928.03	1109.80	1009.24
G_31_N2	684.24	724.29	669.10	670.52
G_18_SA	485.84	404.17	477.37	417.97
G_18_SB	1233.20	1227.63	1166.89	1137.63
G_18_SC	681.71	620.75	684.94	640.98

Tab. 5: Worth totale (pcm) dei vari gruppi di barre di controllo.

In Figg. 33-35 sono riportati i grafici del worth delle barre di controllo in funzione della profondità di inserzione in zona attiva a BOC, rispettivamente a piena potenza, a potenza zero, e la loro differenza. L’andamento dei worth è quello tipico delle c.d. “curve ad S”. In Figg. 36-38 sono riportati grafici analoghi ad EOC. Si noti la profonda differenza di forma tra i grafici di Figg. 33, 34 e 36 da un lato e Fig. 37 dall’altro.

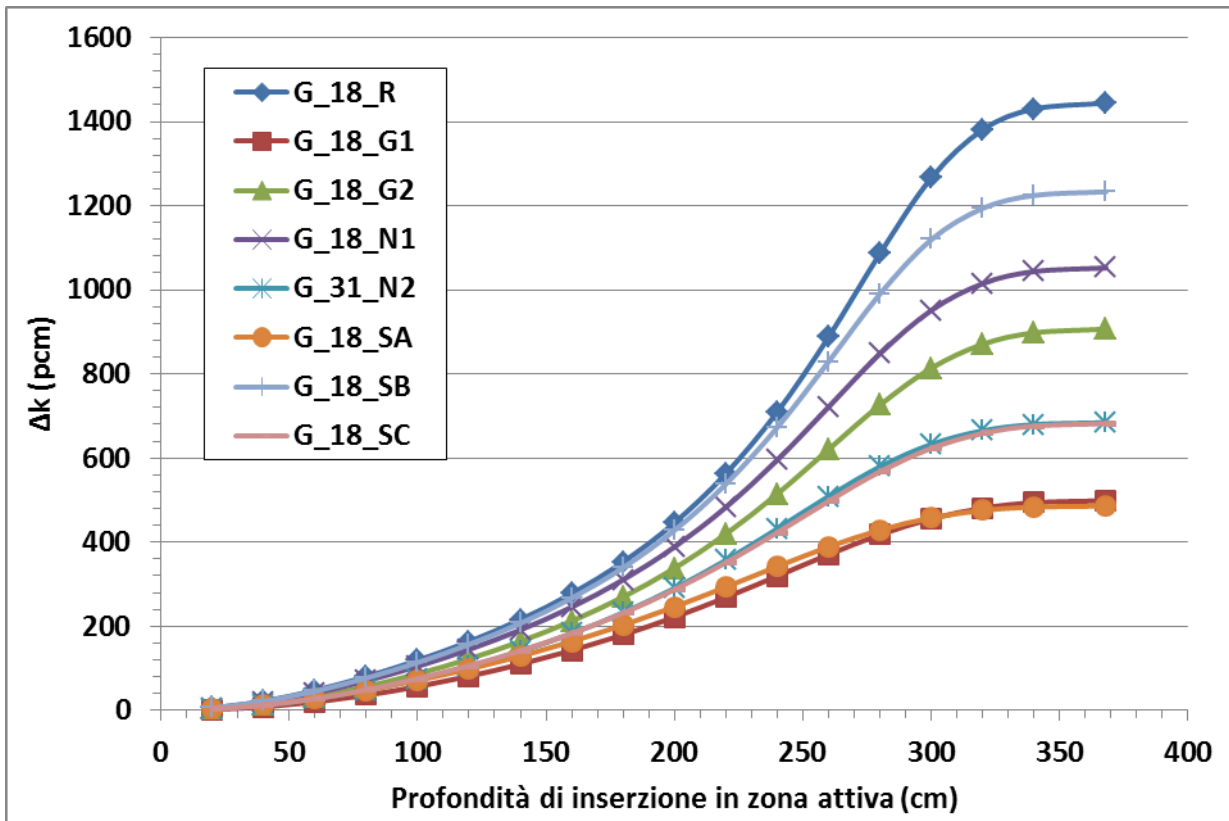


Fig. 33: Worth dei gruppi di barre a BOC, full power.

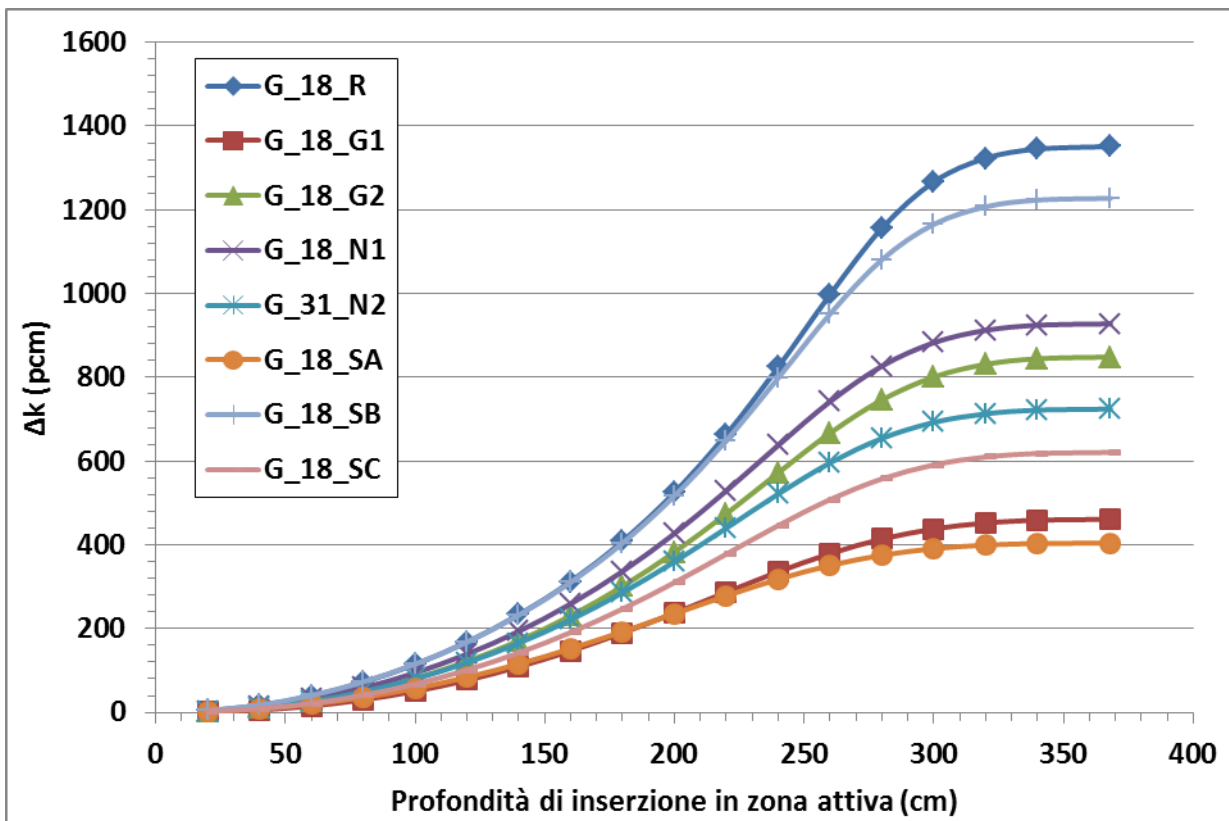


Fig. 34: Worth dei gruppi di barre a BOC, zero power.

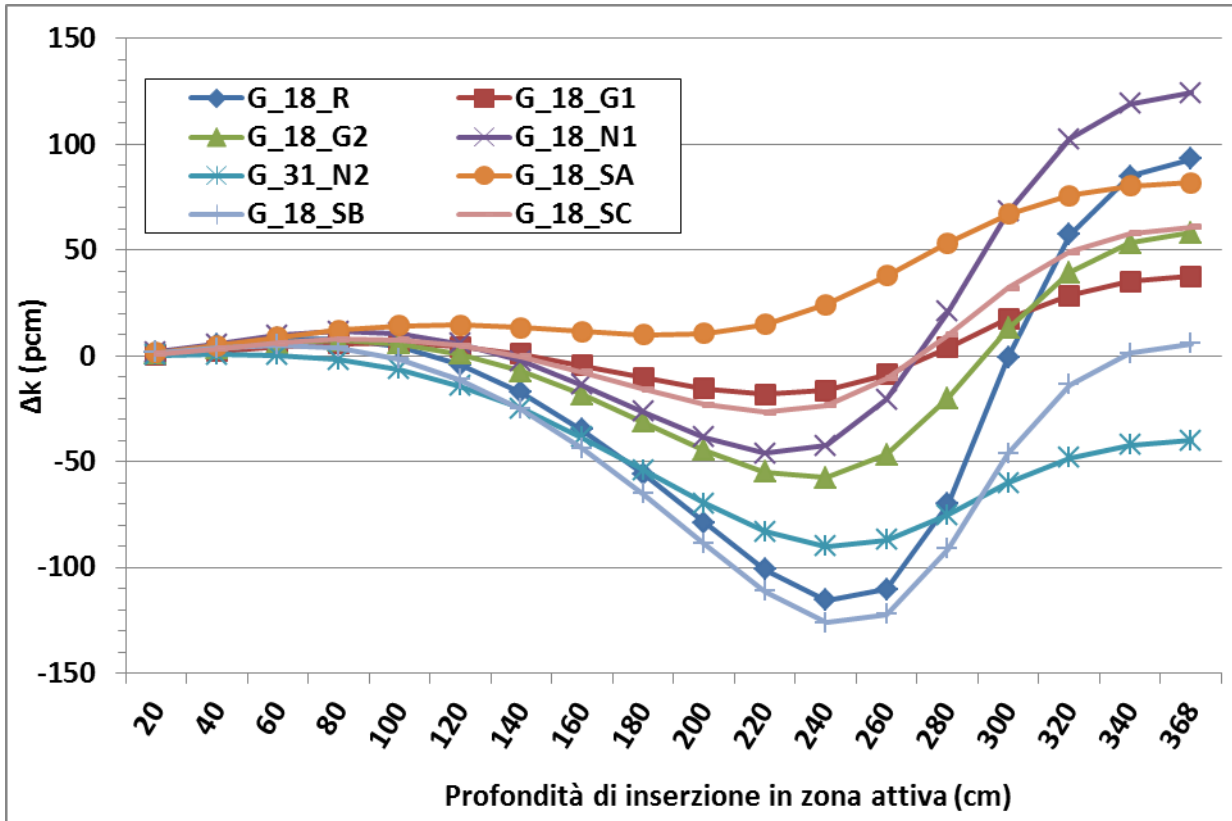


Fig. 35: Differenza di worth dei gruppi di barre a BOC tra full power e zero power.

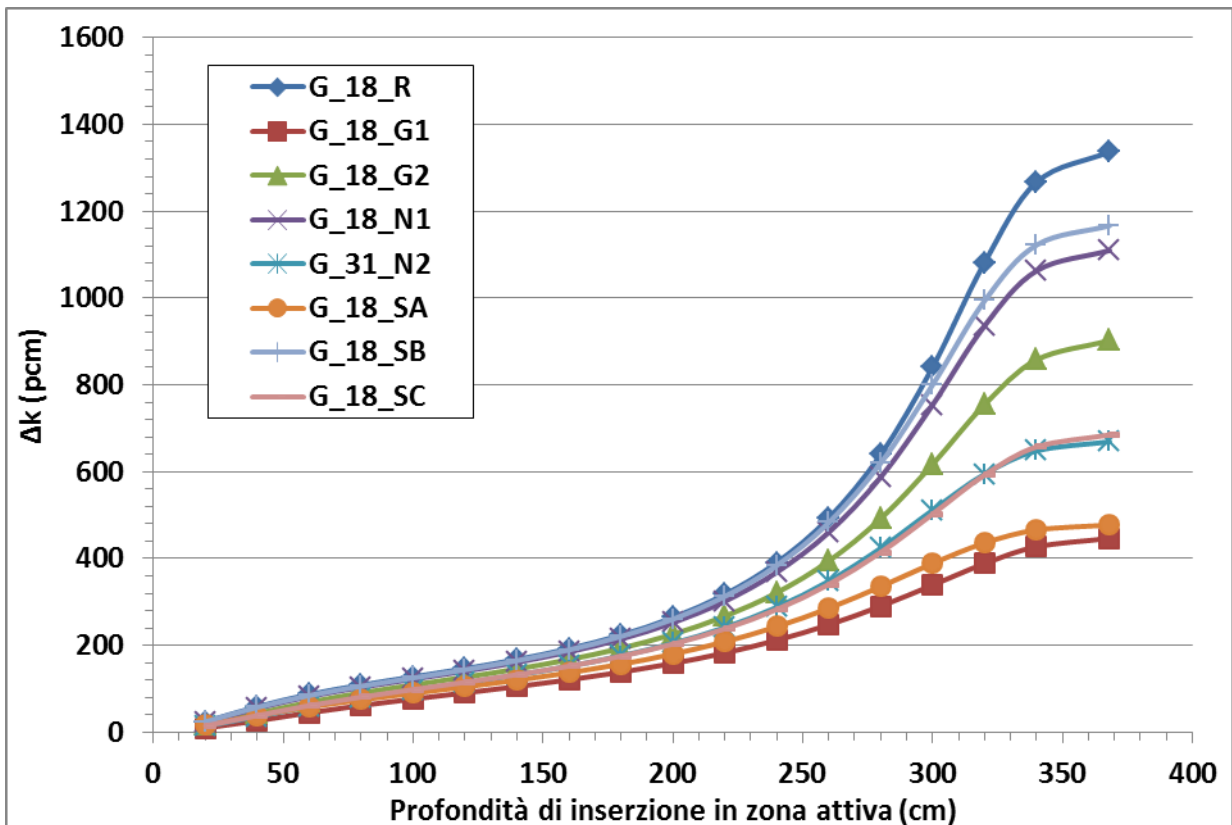


Fig. 36: Worth dei gruppi di barre ad EOC, full power.

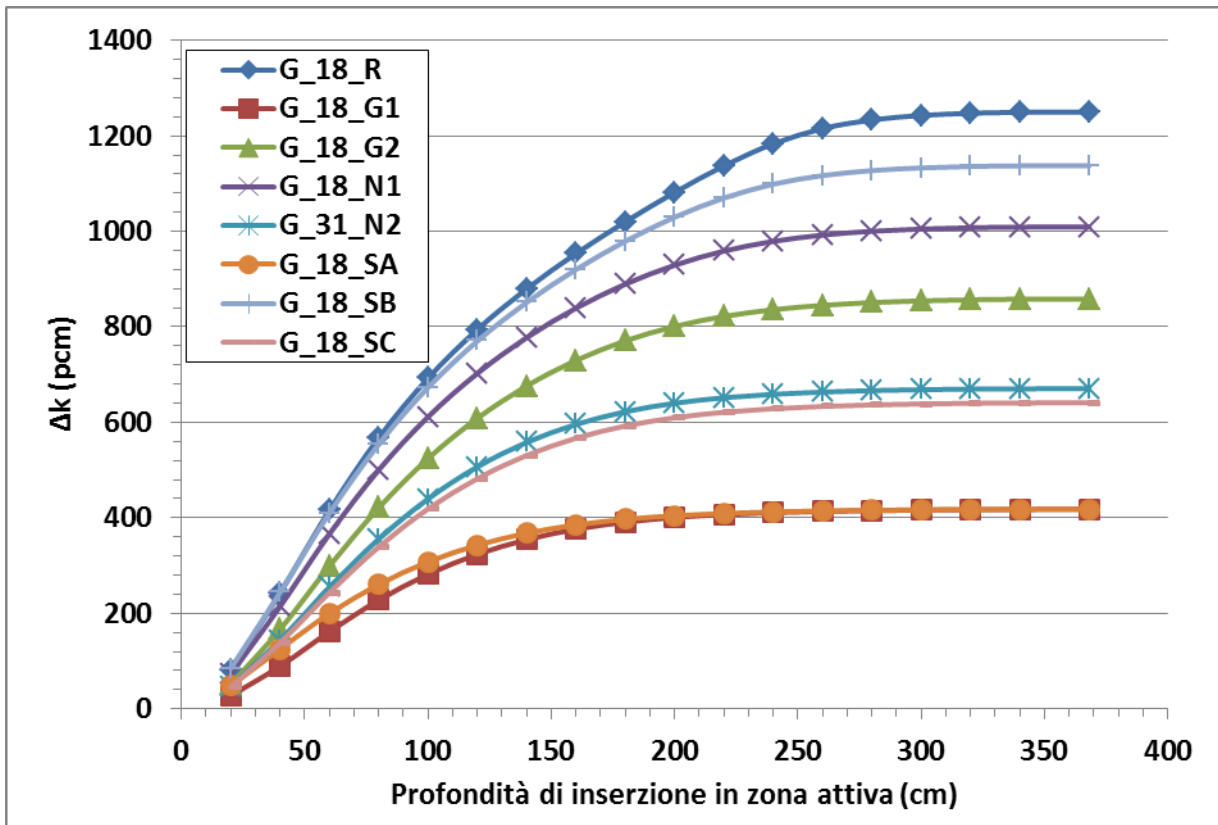


Fig. 37: Worth dei gruppi di barre ad EOC, zero power.

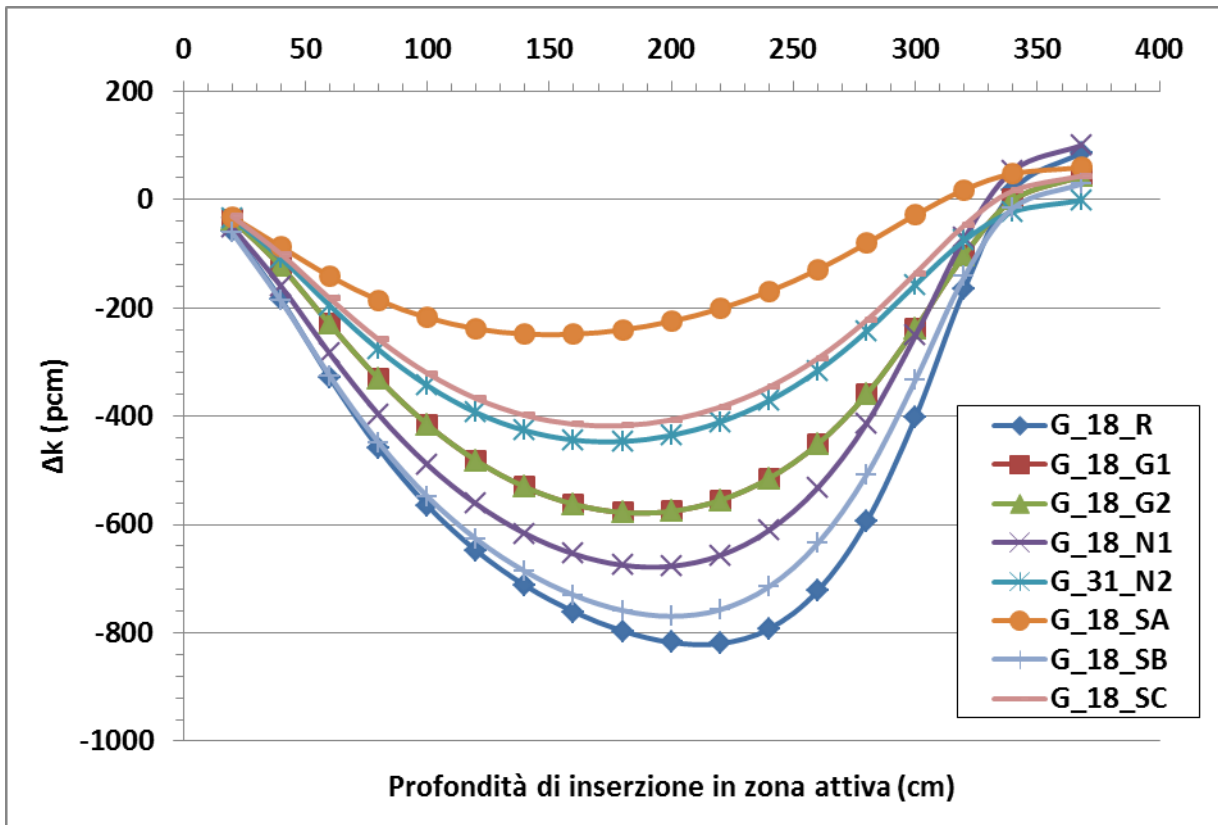


Fig. 38: Differenza di worth dei gruppi di barre ad EOC tra full power e zero power.

La congruità fisica tra le quattro figure è giustificata se si tiene in conto che:

- ad EOC la zona del nocciolo ad importanza neutronica maggiore è quella alta, poiché durante il ciclo è stata bruciata leggermente di più la zona bassa del nocciolo (cfr. Fig. 32) a causa della maggiore moderazione dovuta ad una densità maggiore del moderatore (cfr. Figg. 19-20);
- a potenza zero la densità del moderatore è uniforme nel nocciolo poiché non si ha generazione di calore nel fuel e dunque la temperatura del moderatore rimane ovunque pari a quella di ingresso;
- a piena potenza ed EOC la diversa densità del moderatore tende a rendere simmetrico il flusso e dunque la potenza rispetto al piano di mezzeria (cfr. Fig. 31);
- a BOC la concentrazione assiale di boro è proporzionale alla densità del moderatore, cosicché nella parte bassa, ove si ha più moderazione, c'è anche più assorbimento da parte del boro; i due fenomeni tendono a rendere simmetrico il flusso (cfr. Fig. 30);
- ad EOC la concentrazione del boro nel moderatore è quasi nulla (cfr. Fig. 8).

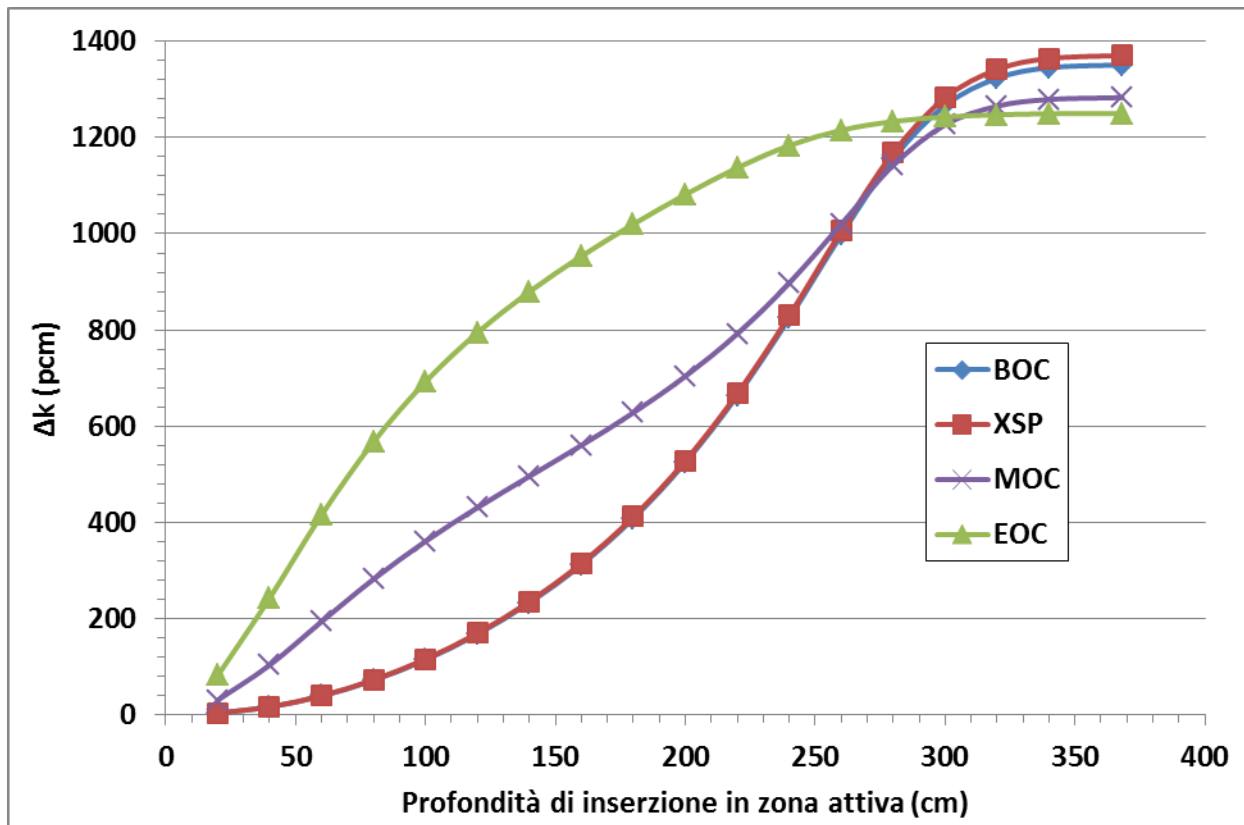


Fig. 39: Evoluzione del worth del gruppo G\_18\_R tra BOC ed EOC, zero power.

A riprova di quanto asserito si mostra in Fig. 39 l'andamento in funzione del burnup del worth del gruppo G\_18\_R a potenza zero, ovvero in condizioni per cui le uniche variazioni assiali di simmetria dell'importanza neutronica siano imputabili al solo bruciamento. Si nota come il profilo a MOC sia intermedio tra quello a BOC ed EOC.

La caratteristica appena illustrata è un'ulteriore prova dell'intrinseca sicurezza dei PWR: a burnup non nullo ed a potenza zero è sufficiente inserire pochissimo le barre di controllo per spegnere in sicurezza il reattore.

In Figg. 40-41 sono mostrate le differenze in worth delle barre di controllo tra EOC e BOC, a piena potenza ed a potenza zero rispettivamente.

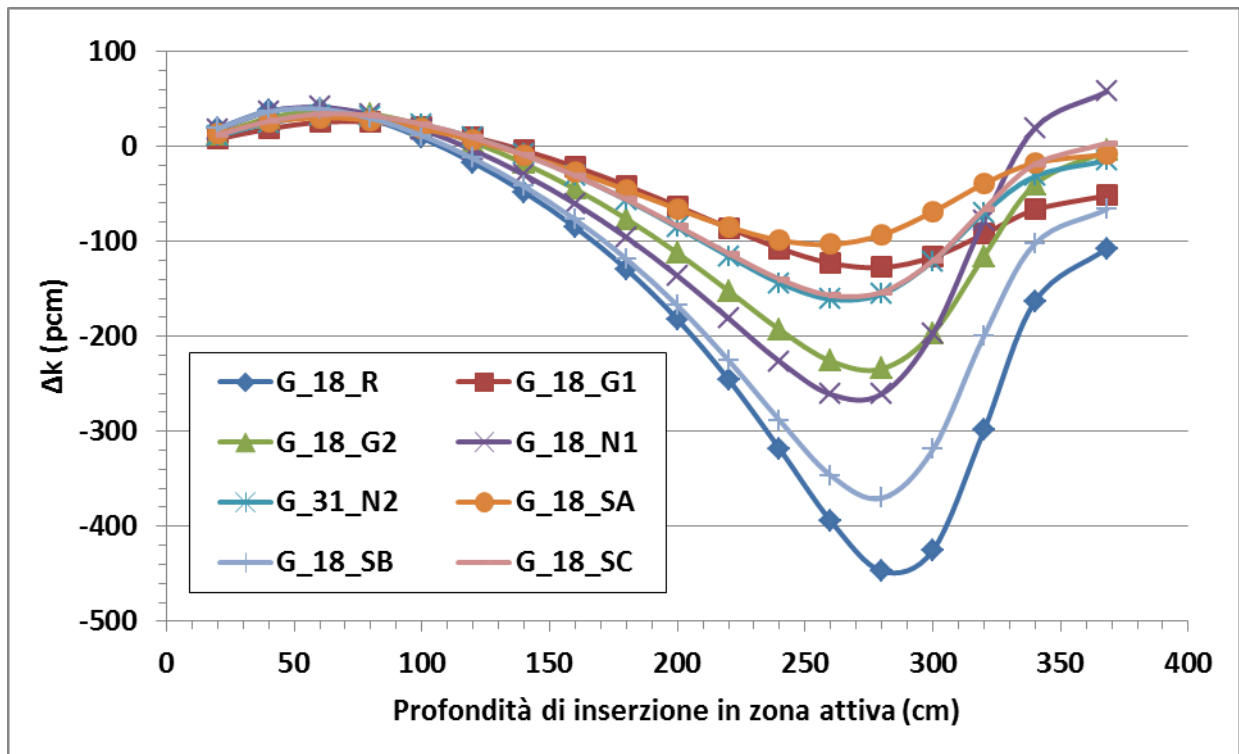


Fig. 40: Differenza di worth dei gruppi di barre tra EOC e BOC, full power.

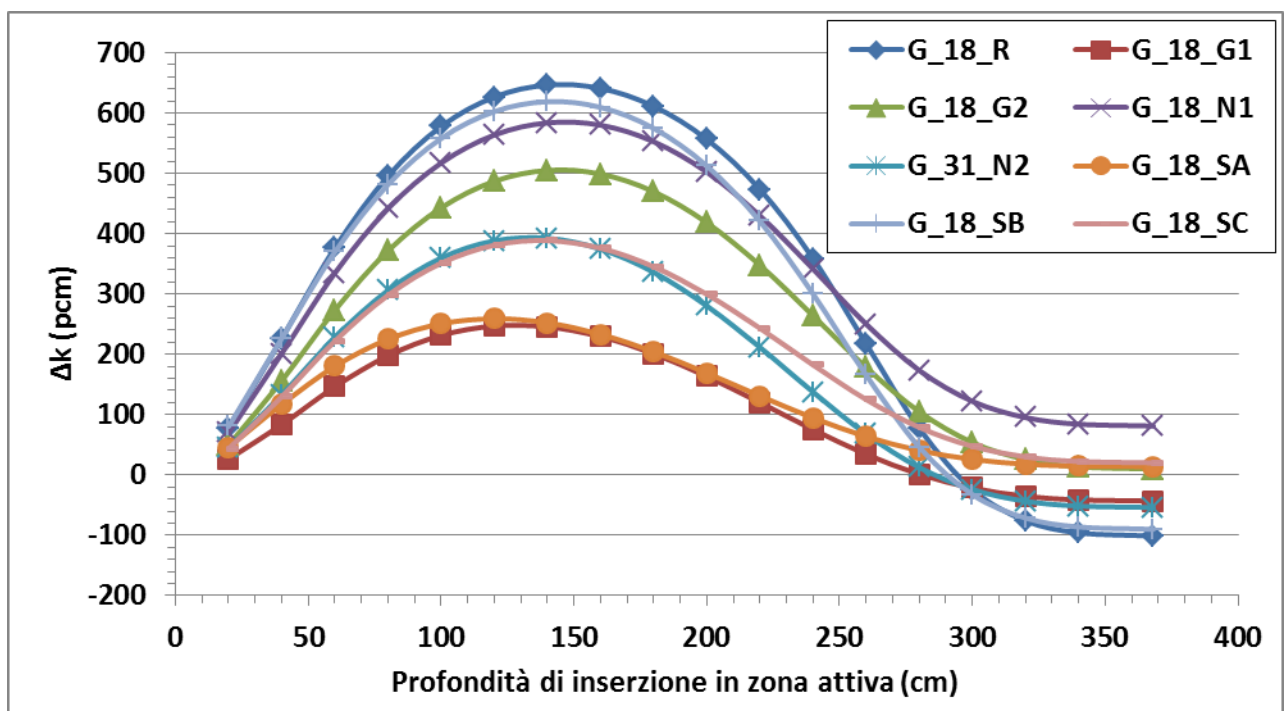


Fig. 41: Differenza di worth dei gruppi di barre tra EOC e BOC, zero power.

Al fine di valutare meglio i margini di sicurezza neutronica dei PWR occorre anche calcolare quanto si distorce la distribuzione di densità di potenza nel nocciolo a seguito dell’inserimento delle barre, in condizioni di criticità, ovvero in condizioni per cui l’antireattività introdotta dalle barre viene compensata da una diminuzione di boro nel moderatore. La valutazione viene effettuata solamente a BOC, poiché ad EOC non si dispone fisicamente di un margine di reattività positiva in grado di compensare l’inserimento di un gruppo di barre (cfr. Fig. 6). La situazione è riassunta in Fig. 42. E’ riportato il valore limite di 2.32 per il fattore di forma della densità di potenza, al di sotto del quale è garantita l’integrità del combustibile e delle guaine; sono poi graficati i valori massimi del fattore di forma in funzione della profondità di inserzione in zona attiva dei vari gruppi di barre; il valore del fattore di forma riportato non si manifesta ovviamente alla quota di inserzione, ma ad una quota diversa non riportata nel grafico. Va comunque detto che, anche tenendo conto del fattore di sicurezza H(z) di cui occorre correggere, abbassandolo, il valore limite di 2.32, nessun gruppo è in grado di causare una distorsione tale da compromettere l’integrità della prima e della seconda barriera.

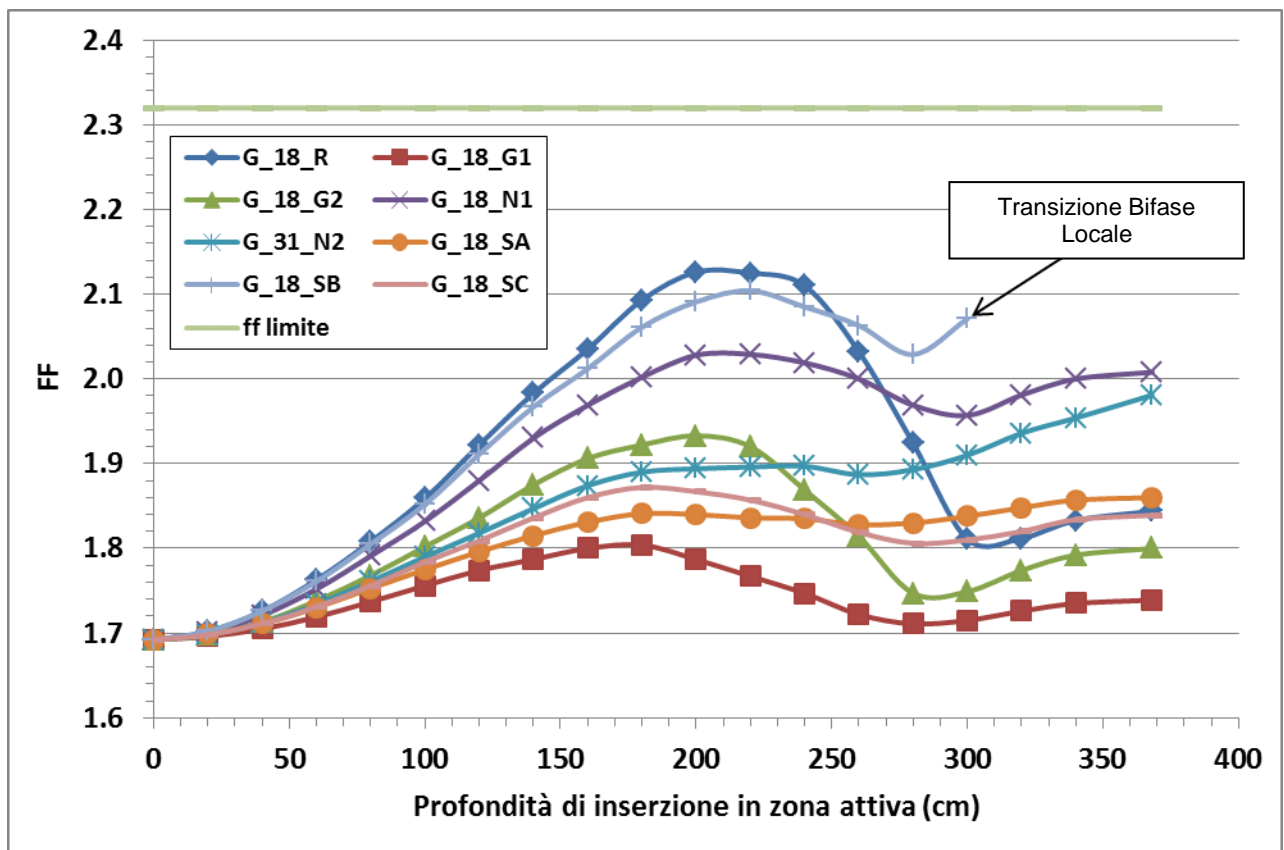
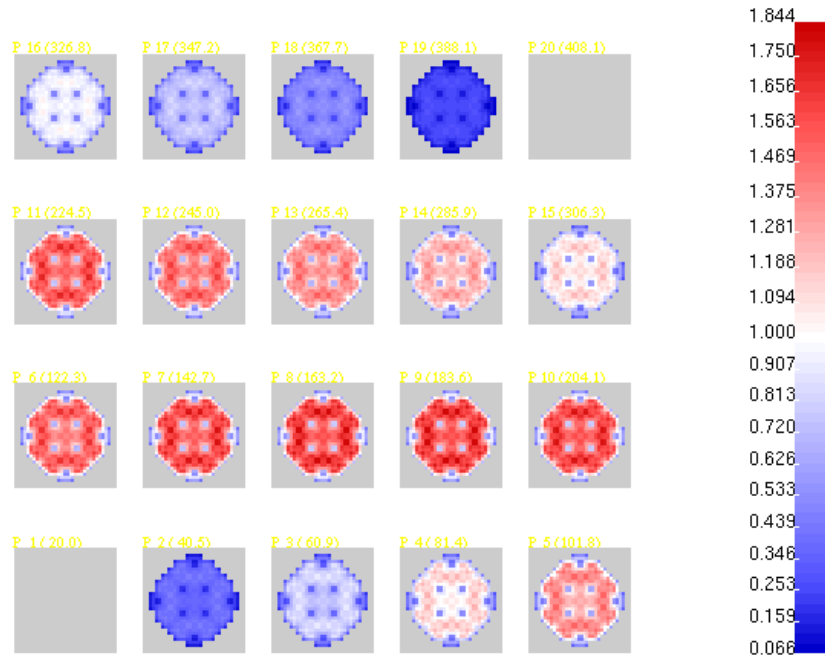


Fig. 42: Variazione del fattore di forma massimo al variare della profondità di inserzione, BOC.

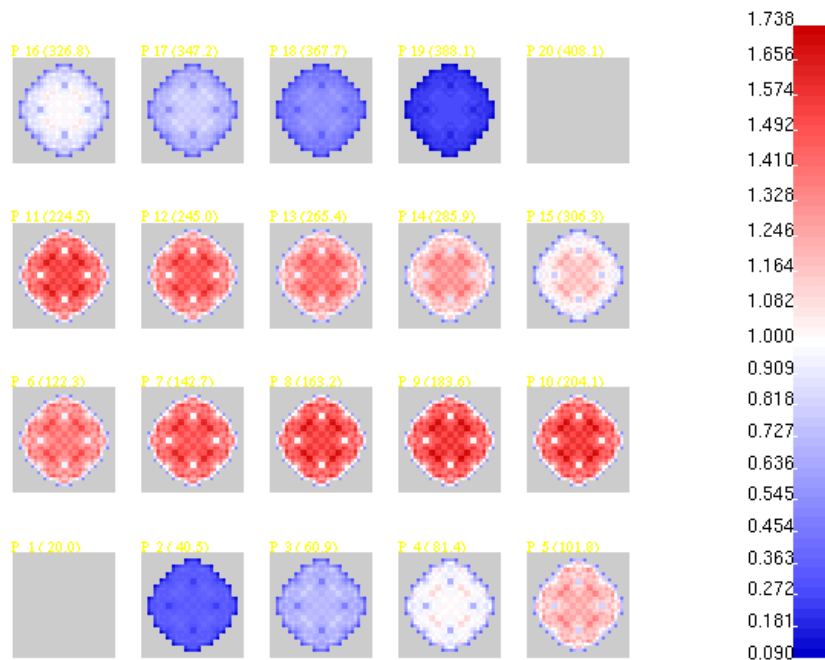
L’unico problema riscontrato è nell’inserzione del potente gruppo G\_18\_SB; l’inserzione a piena potenza con compensazione dell’antireattività mediante diluzione del boro deve essere limitata per tale gruppo a circa 300 cm; oltre tale profondità, la distorsione della potenza è tale da far transire a bifase il moderatore in alcuni canali del nocciolo (effetto di vuoto locale); va tuttavia precisato che il modulo di termoidraulica di nocciolo implementato in CRONOS è a sottocanali indipendenti e dunque non è in grado di tenere in conto gli importanti flussi trasversali che si instaurano tra canali adiacenti, uno dei quali in transizione bifase; tali flussi sono certamente in grado di compensare le differenze termiche e di smorzare i picchi di temperatura del moderatore e di limitare l’ebollizione

nei canali interessati. L'analisi dettagliata di questi effetti deve tuttavia essere rimandata all'utilizzo di uno specifico codice di termoidraulica di nocciolo 3D come FLICA-4.



**Power ( 20 plans)**

Fig. 43: Distribuzione del fattore di forma a BOC, HFP, con inserimento completo del gruppo G\_18\_R.



**Power ( 20 plans)**

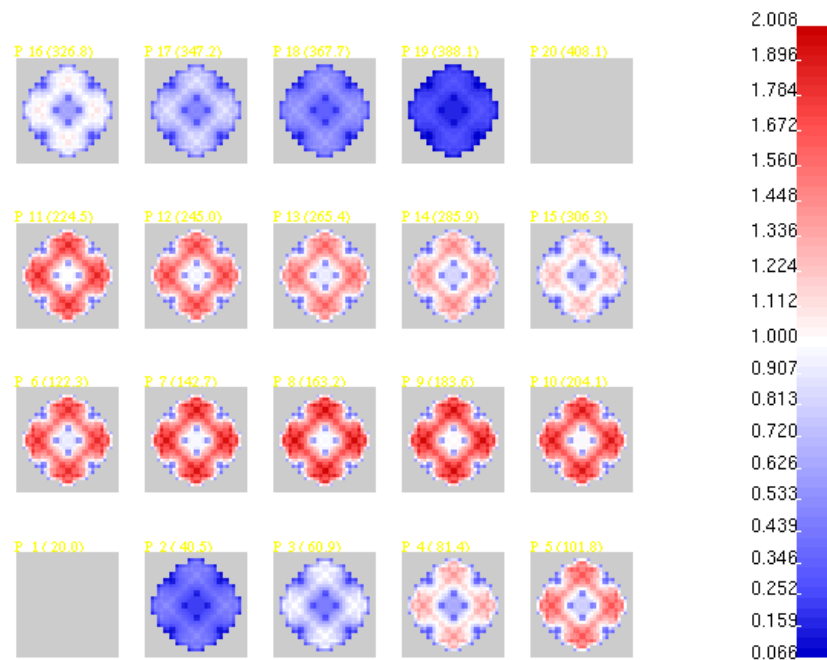
Fig. 44: Distribuzione del fattore di forma a BOC, HFP, con inserimento completo del gruppo G\_18\_G1.





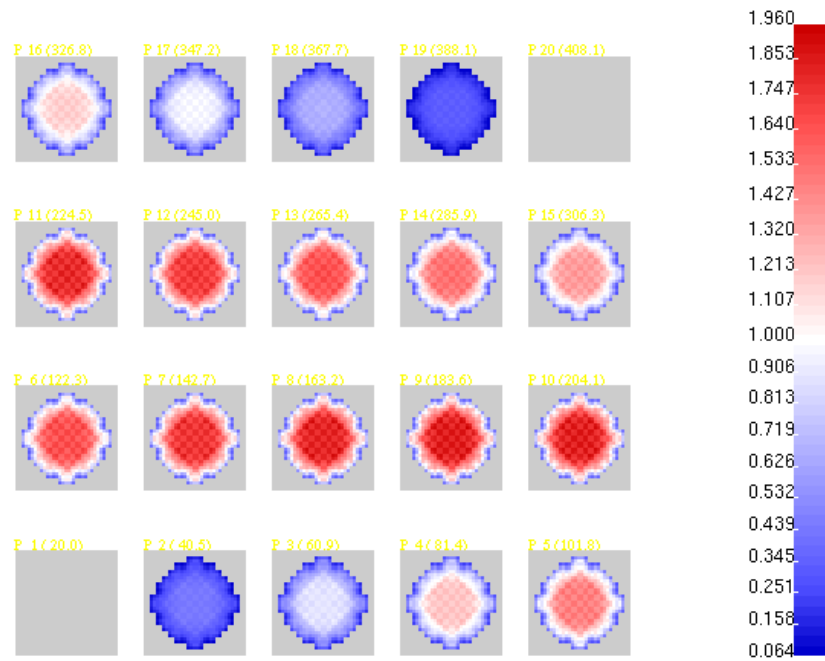
**Power ( 20 plans)**

Fig. 45: Distribuzione del fattore di forma a BOC, HFP, con inserimento completo del gruppo G<sub>18\_G2</sub>.



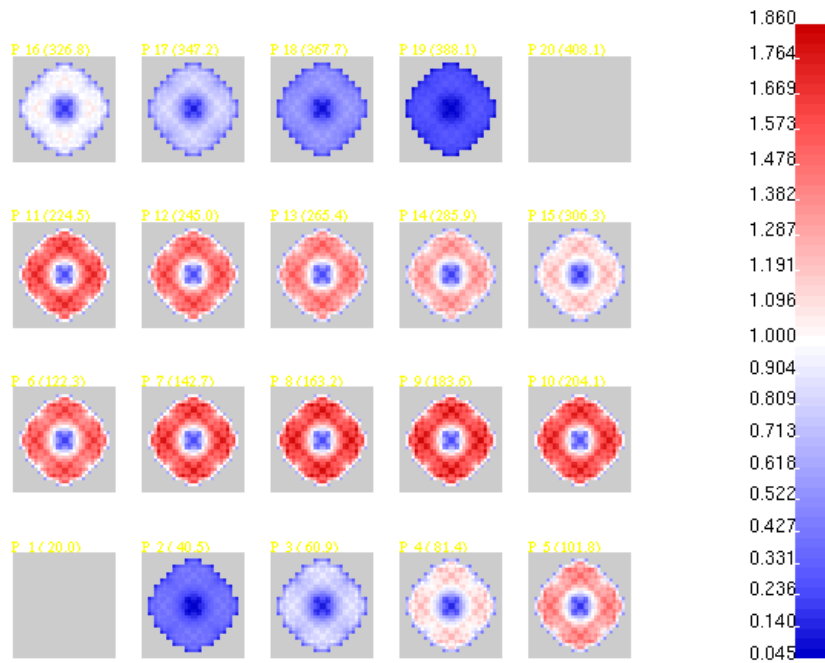
**Power ( 20 plans)**

Fig. 46: Distribuzione del fattore di forma a BOC, HFP, con inserimento completo del gruppo G<sub>18\_N1</sub>.



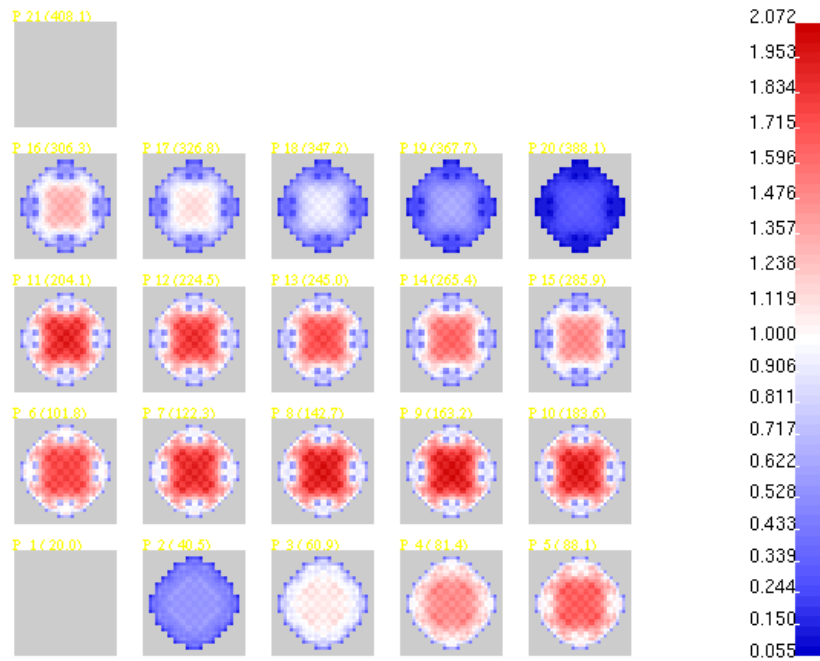
**Power ( 20 plans)**

Fig. 47: Distribuzione del fattore di forma a BOC, HFP, con inserimento completo del gruppo G\_18\_N2.



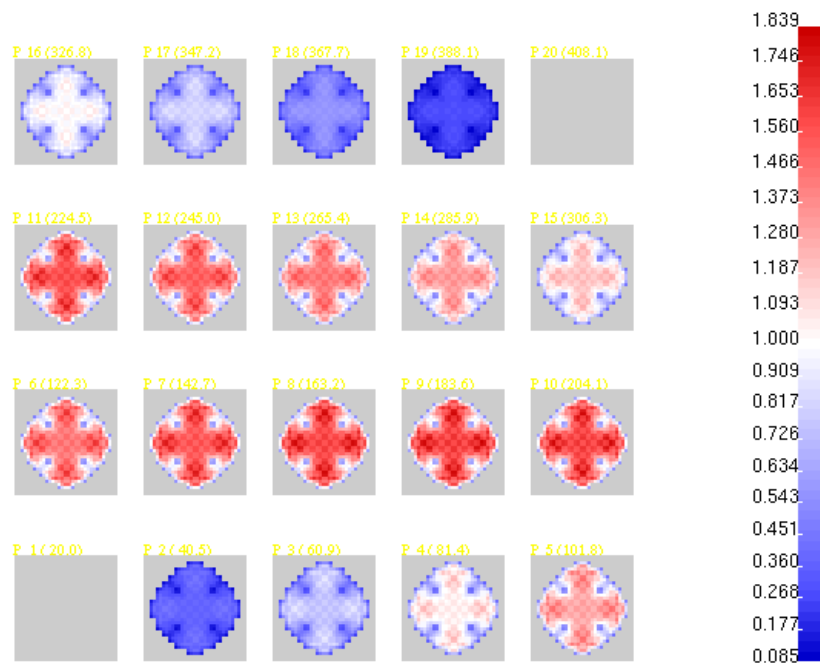
**Power ( 20 plans)**

Fig. 48: Distribuzione del fattore di forma a BOC, HFP, con inserimento completo del gruppo G\_18\_SA.




Power ( 21 plans)

Fig. 49: Distribuzione del fattore di forma a BOC, HFP, con inserimento a 300 cm del gruppo G\_18\_SB.



Power ( 20 plans)

Fig. 50: Distribuzione del fattore di forma a BOC, HFP, con inserimento completo del gruppo G\_18\_SC.

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	ADPFISS – LP1 – 006	0	L	34	34

Nelle Figg. 43-50 sono rappresentate le distribuzioni della densità di potenza (ovvero, fattori di forma) a BOC e HFP, per inserimento completo di ciascun gruppo di barre di controllo; per il solo gruppo G\_18\_SB l'inserimento è limitato, come già osservato, a 300 cm.

#### Riferimenti Bibliografici

[1] R. Pergreffi, F. Rocchi, M. Sumini, A. Guglielmelli, Calcoli per la determinazione della composizione isotopica del combustibile di un PWR da 900 MWe al variare del bruciamento, Rapporto Tecnico ENEA NNFISS-LP2-082, 2012.

[2] R. J. Cacciapuoti, S. van Volkinburg, Axial Burnup Profile Database for Pressurized Water Reactors, YAEC-1937, Maggio 1997.

[3] 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.

#### Elenco delle Abbreviazioni e degli Acronimi

ADF: Assembly Discontinuity Factor.  
 ARO: All Rods Out.  
 BOC: Beginning of Cycle.  
 CZP: Cold Zero Power.  
 EFPD: Effective Full Power Day.  
 EOC: End of Cycle.  
 FF: Fattore di Forma.  
 GV: Generatore di Vapore.  
 HZP: Hot Zero Power.  
 HFP: Hot Full Power.  
 MOC: Middle of Cycle.  
 RHR: Residual Heat Removal System.  
 XSP: Xenon Saturation Point.

#### Indice

Introduzione	2
Descrizione della geometria e dello schema di calcolo adottati	2
Grandezze calcolate e risultati	6
Riferimenti Bibliografici	34
Elenco delle Abbreviazioni e degli Acronimi	34