

Laboratorio Ingegneria Nucleare
Energy Engineering - Nuclear Track

Reactivity Analysis for NUWARD Small Modular Reactor

Patrik Shytaj
Daniele Timpano
Carola Villa

Report Presentation

Indice

Laboratorio di Ingegneria Nucleare



NUWARD - Introduzione

Reactivity Analysis

Coefficienti di prestazione del
combustibile

Controllo della reattività

Sviluppi futuri

Caratteristiche e peculiarità

k-eff e rapporto moderator-to-fuel

Arricchimento ottimale e Gd2O3

Selezione della migliore geometria

Moderator Temperature Coefficient

Fuel Temperature Coefficient

Void Coefficient

Power Axial Offset

Possibili analisi aggiuntive

NUWARD - Introduzione

Passive Safety Systems

sistemi di sicurezza che non richiedono l'intervento di un operatore e l'ausilio di elettricità



Boron-free design

eliminazione del boro come metodo di controllo reattività

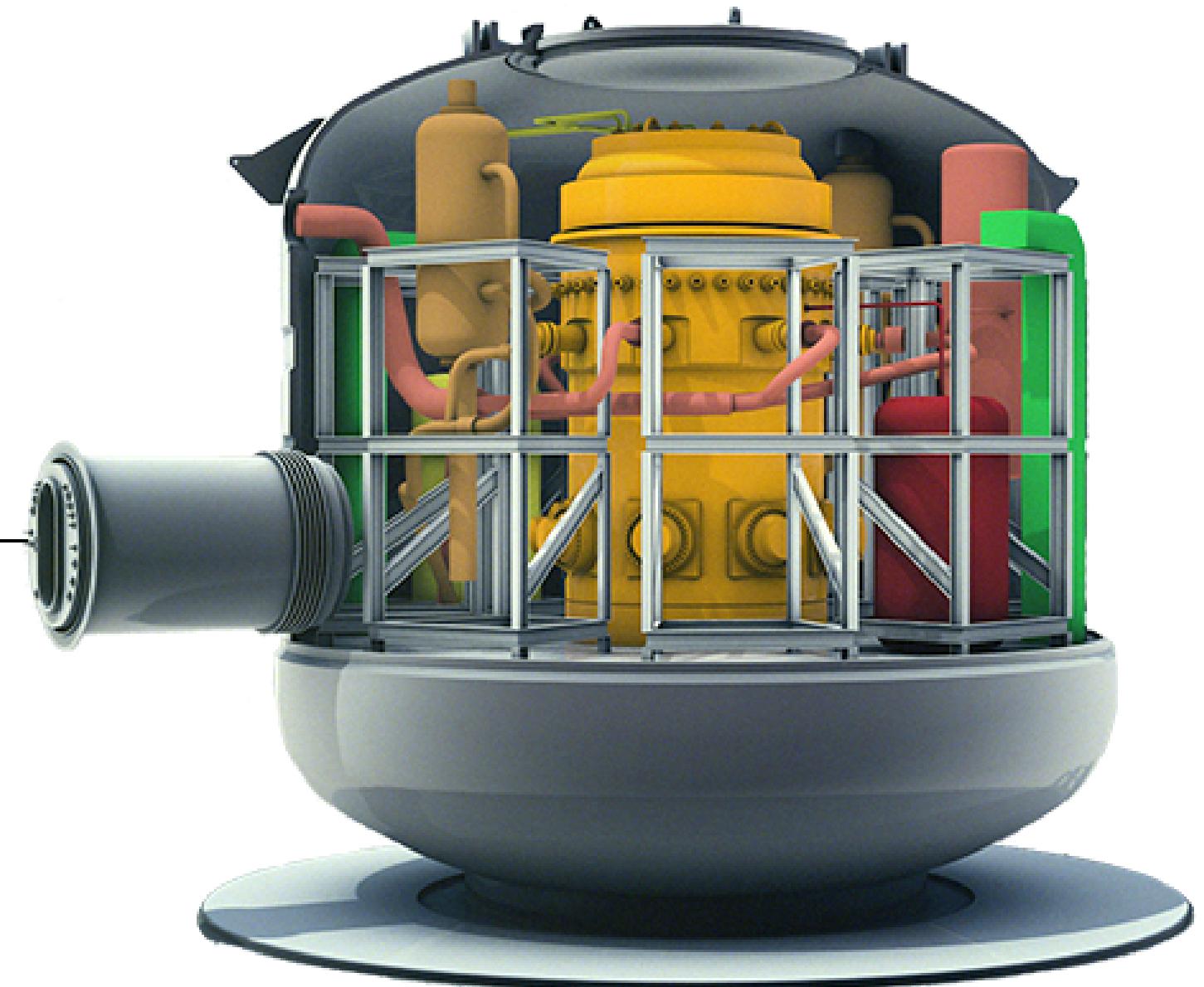


Modularisation and System integration

ridurre i tempi di costruzione, semplificando il design

Staggered Deployment

integrazione con le rinnovabili e riduzione del rischio finanziario



Modularisation



Compactness



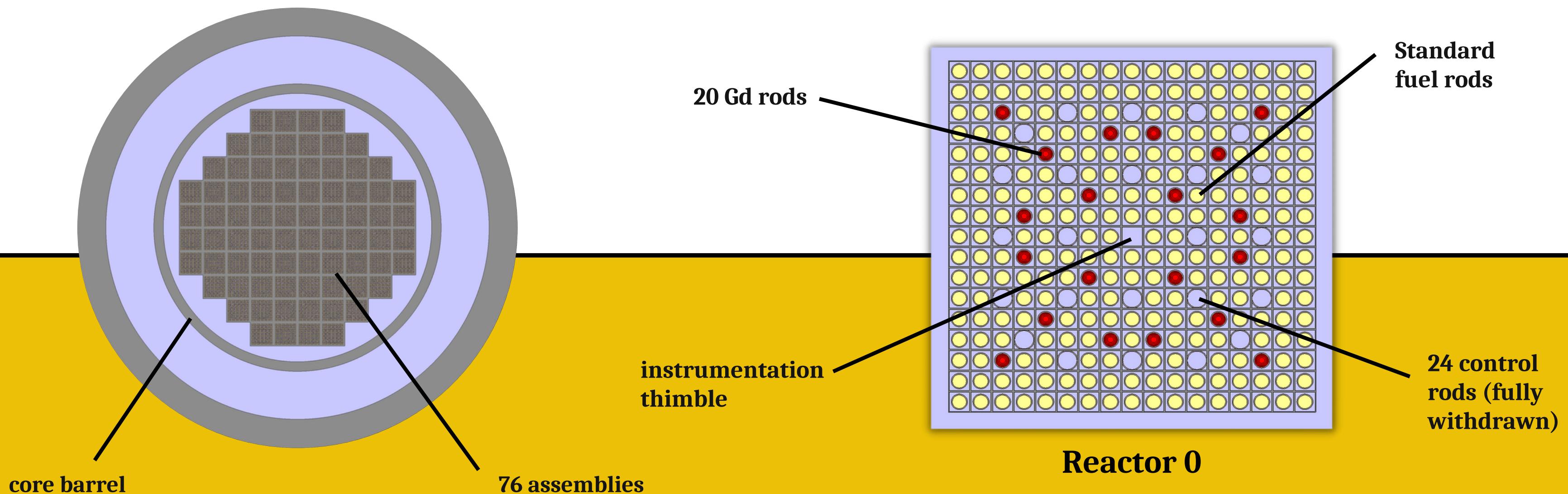
Economics



Safety

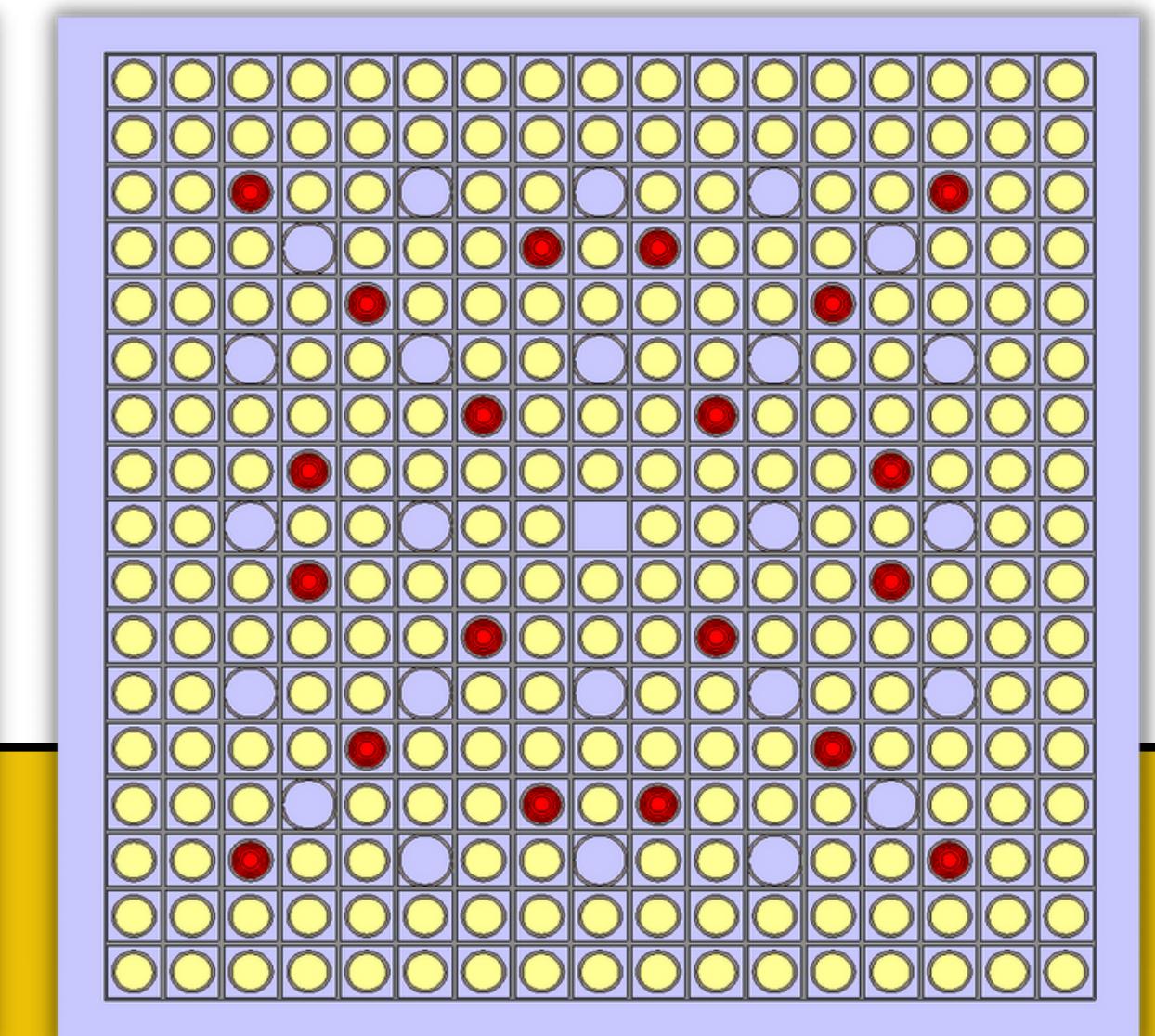
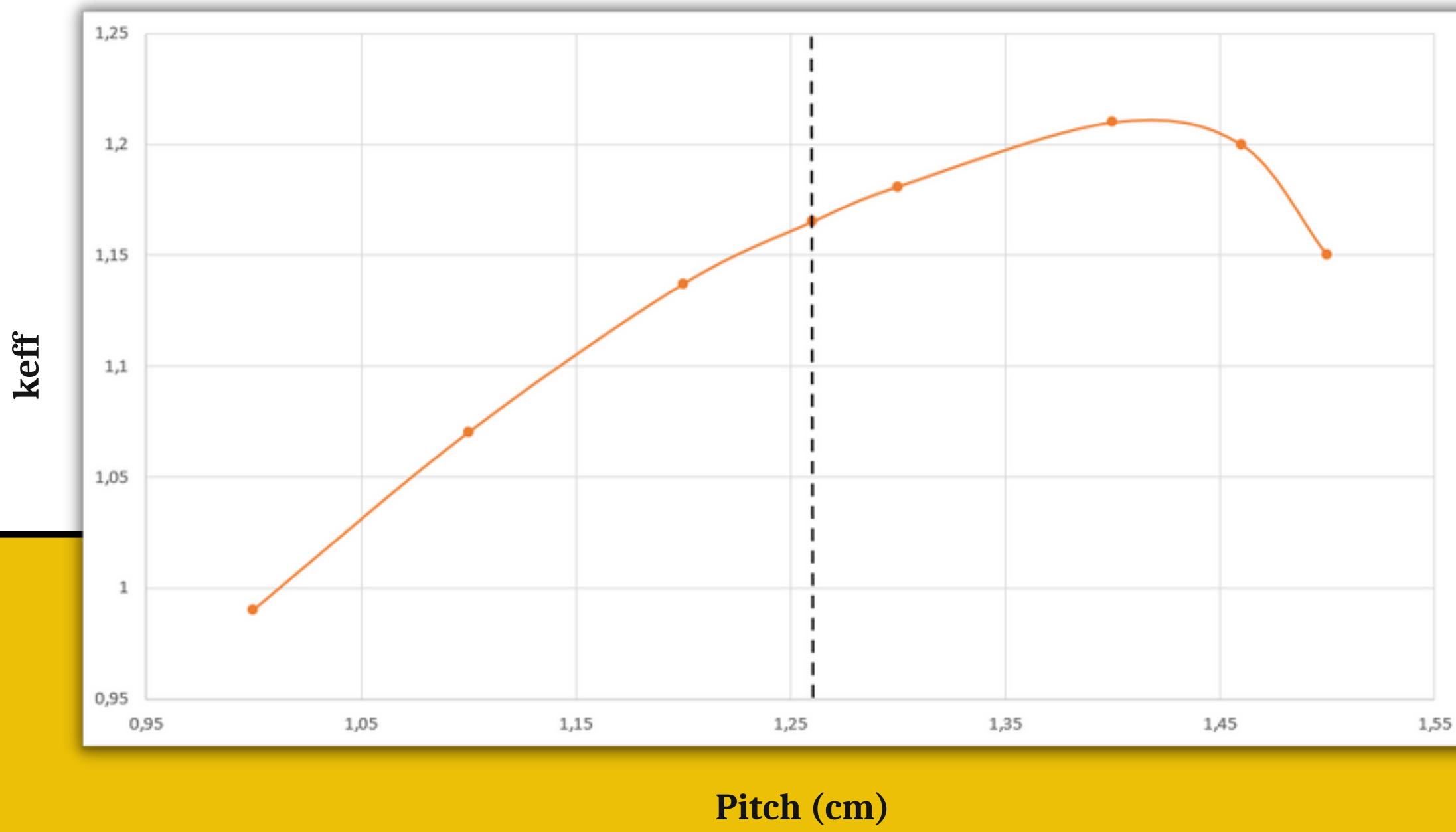
Keff and Pitch - Preliminary Results

Reactivity Analysis



Keff and Pitch - Preliminary Results

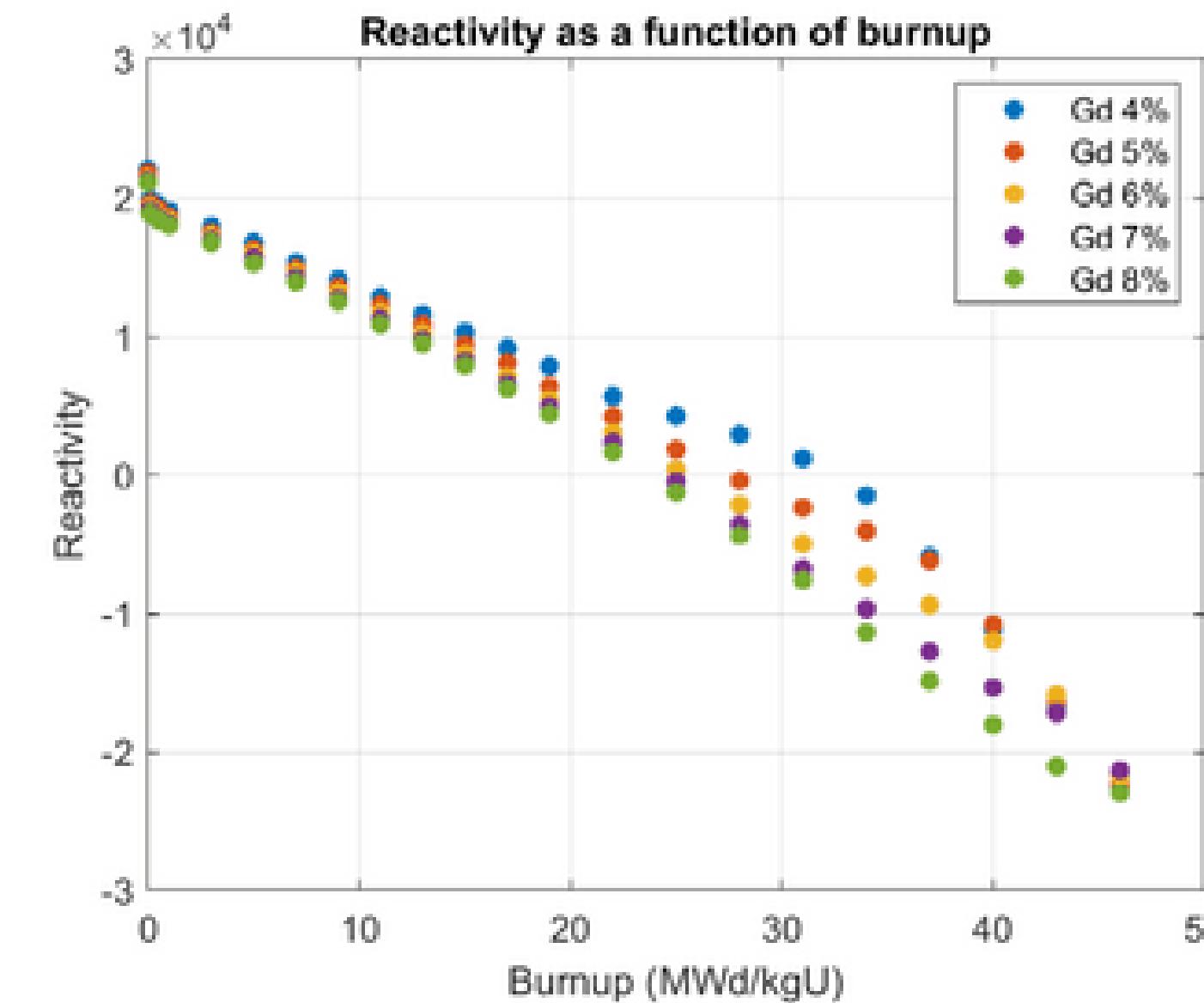
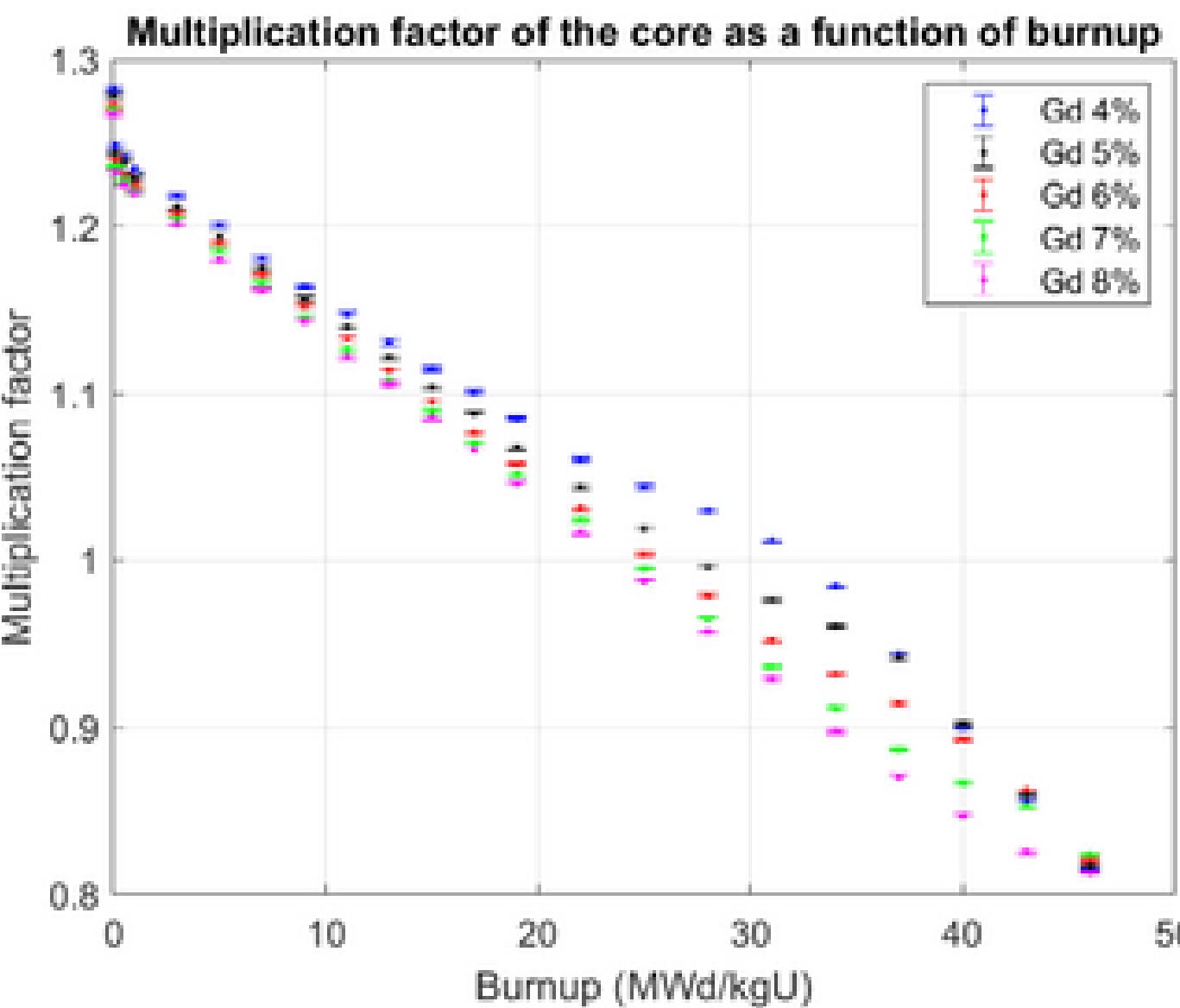
Reactivity Analysis



Reactor 0

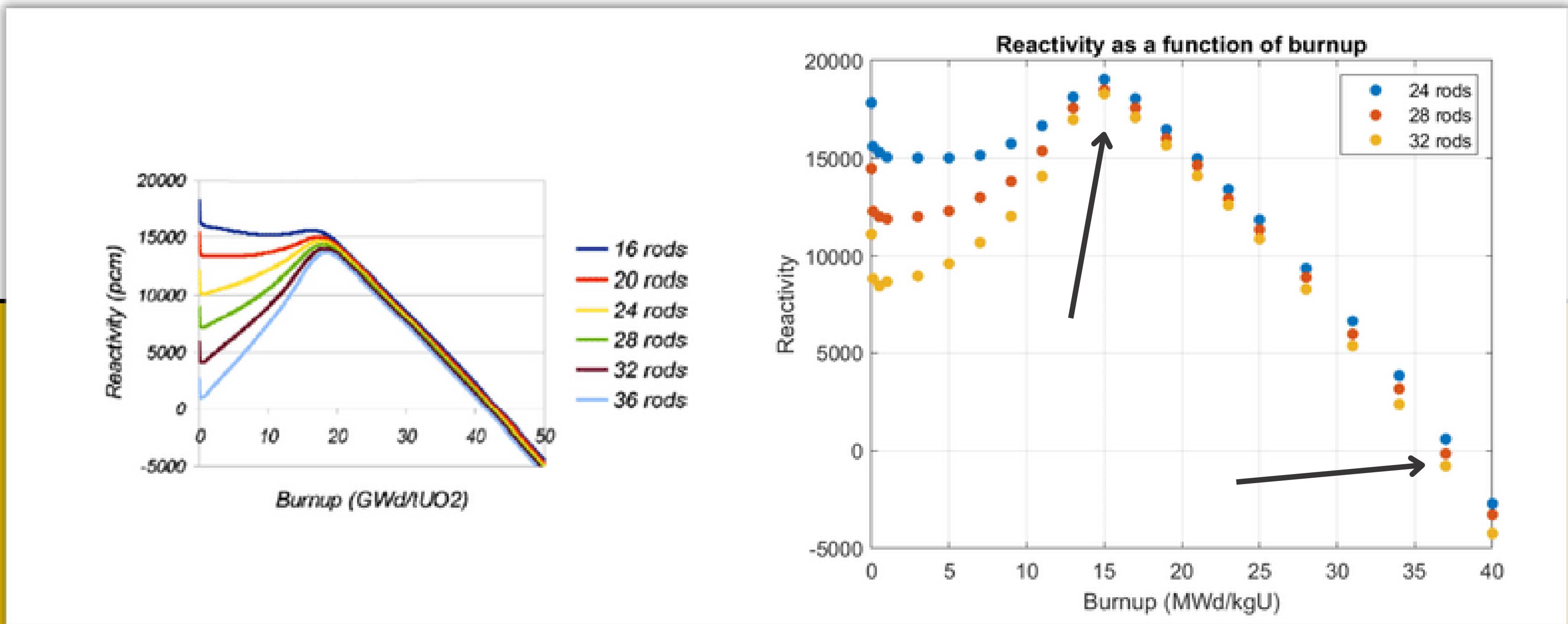
Influenza della percentuale di Gadolinio

Analisi di reattività



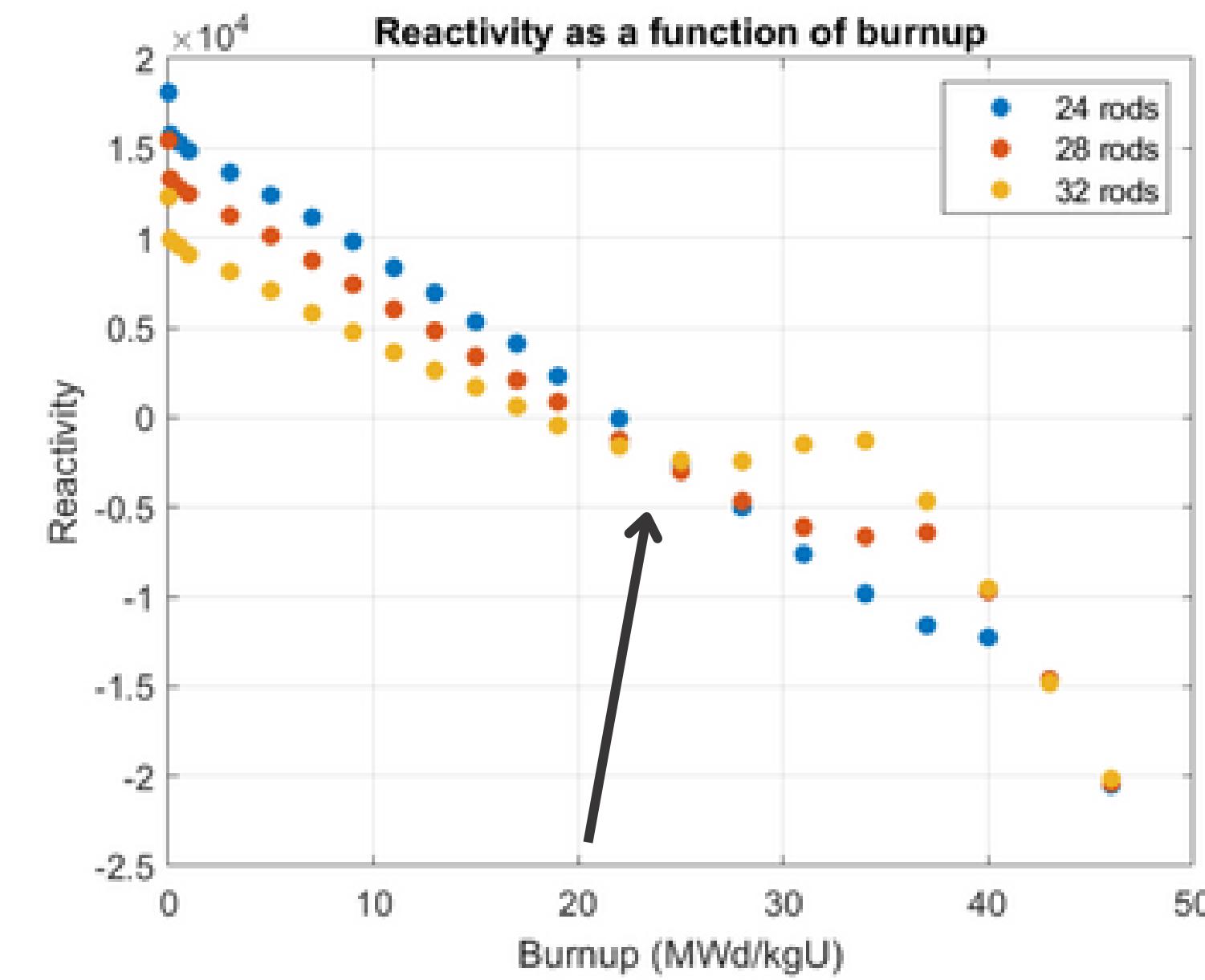
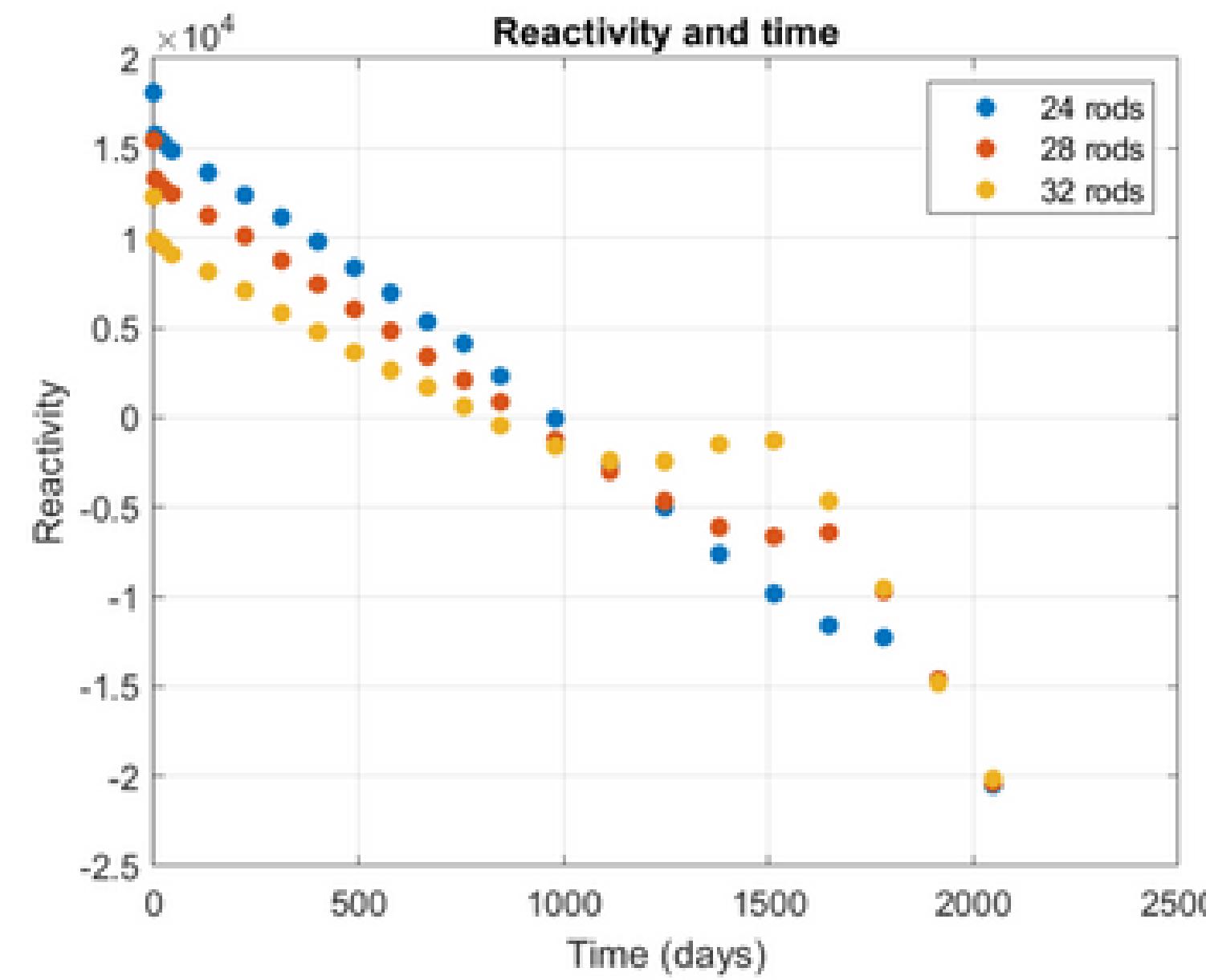
Influenza del numero di poisoned rods

Analisi di reattività - Core 2D



Influenza del numero di poisoned rods

Analisi di reattività - Core 3D



Differenze 2D e 3D

Analisi di reattività

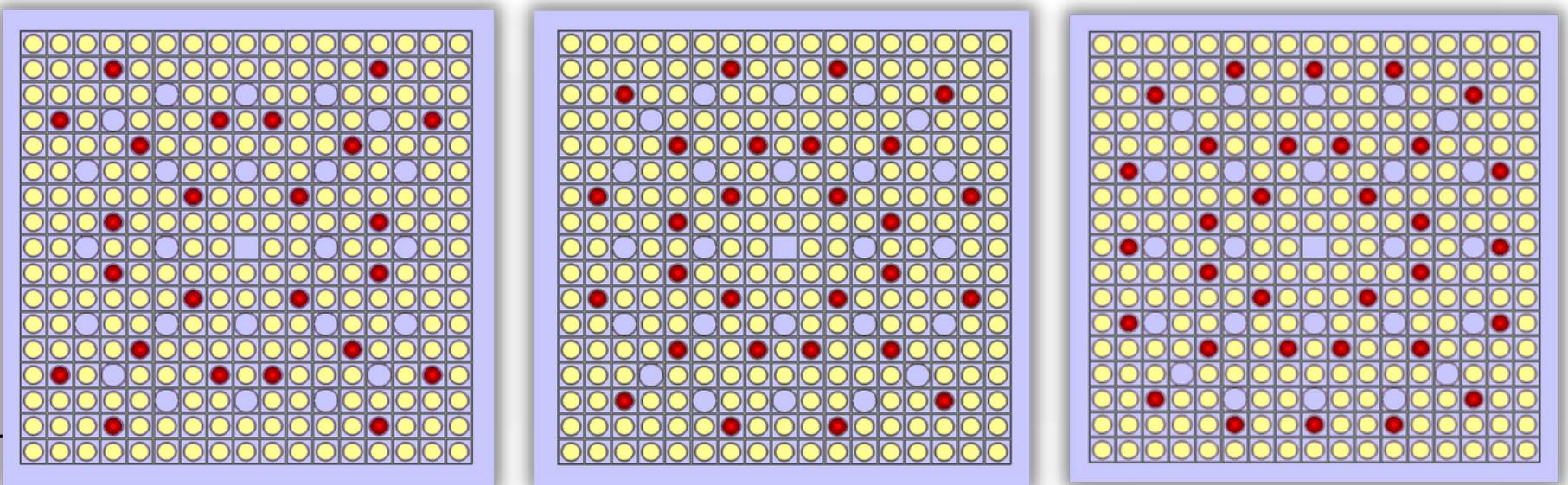
Leakage

Le boundary conditions delle simulazioni 3D sono settate su "black".



Aumento significativo del neutron flux

Consumo più rapido del Gadolinio nelle configurazioni 3D a dispetto di un numero superiore di poisoned rods.

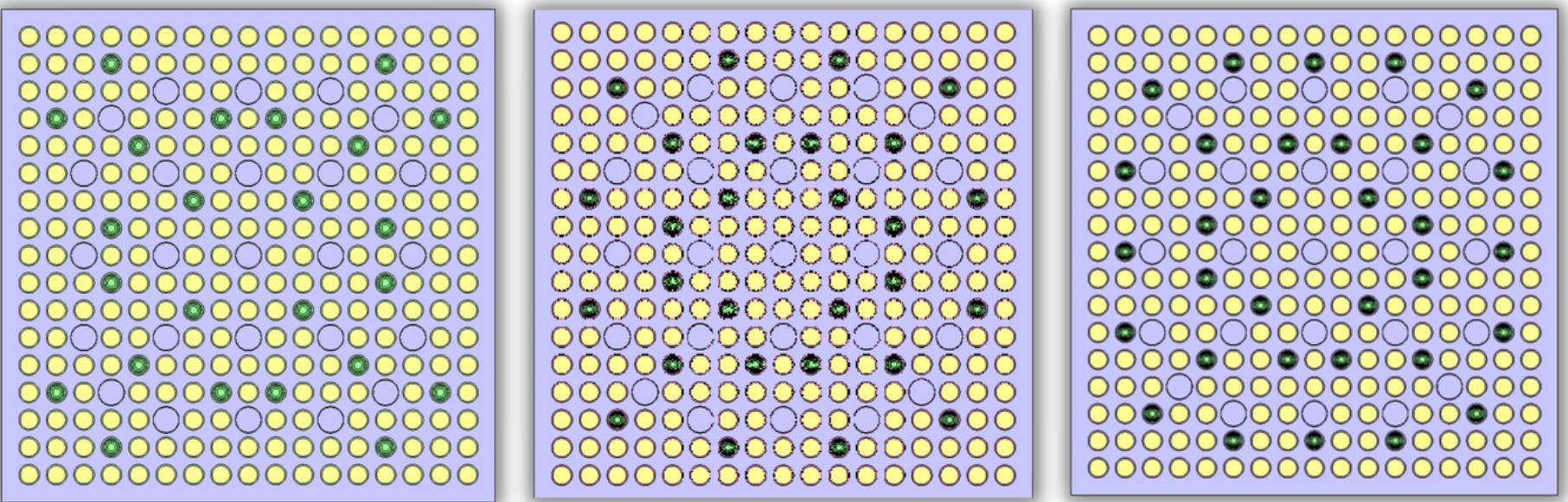


Migliore economia neutronica

L'assenza di leakage giustifica il flusso neutronico più basso nello studio 2D.

Rapidità di consumo del gadolinio non differenziale

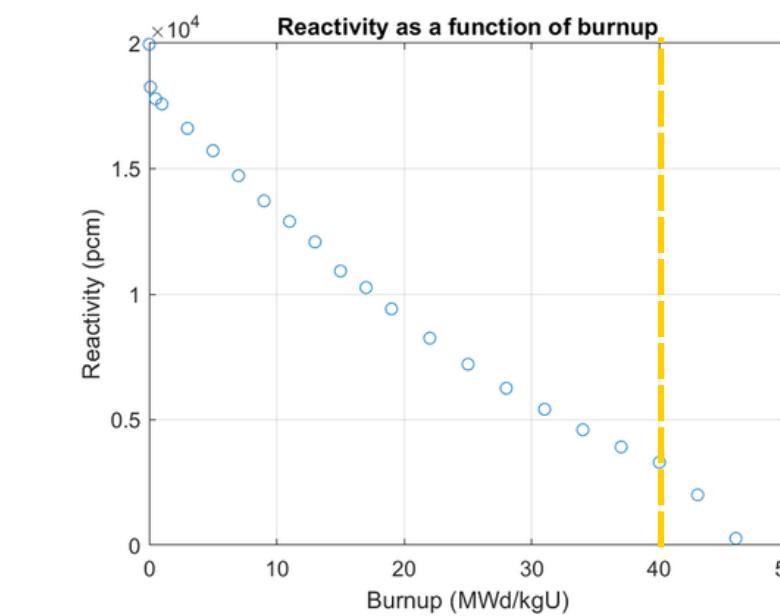
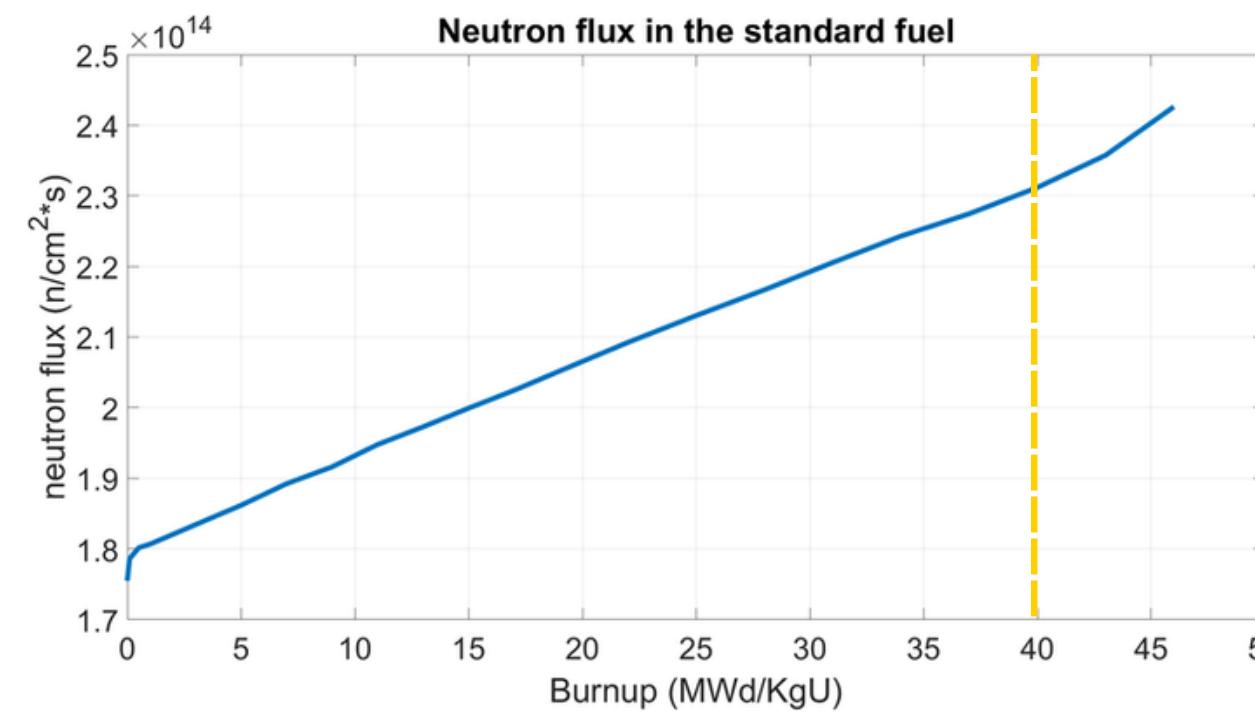
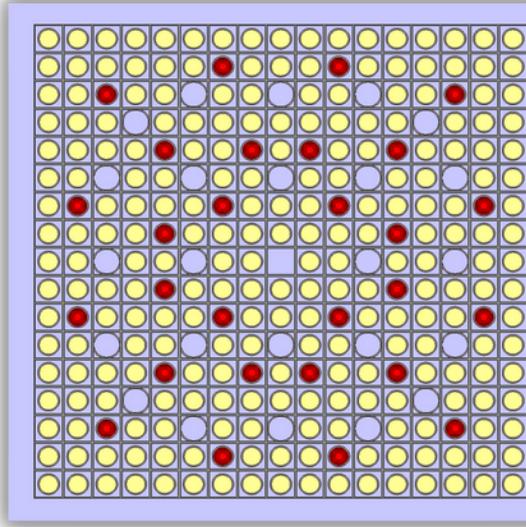
Diretta conseguenza della migliore economia neutronica è che il picco di gadolinio non si sposta.



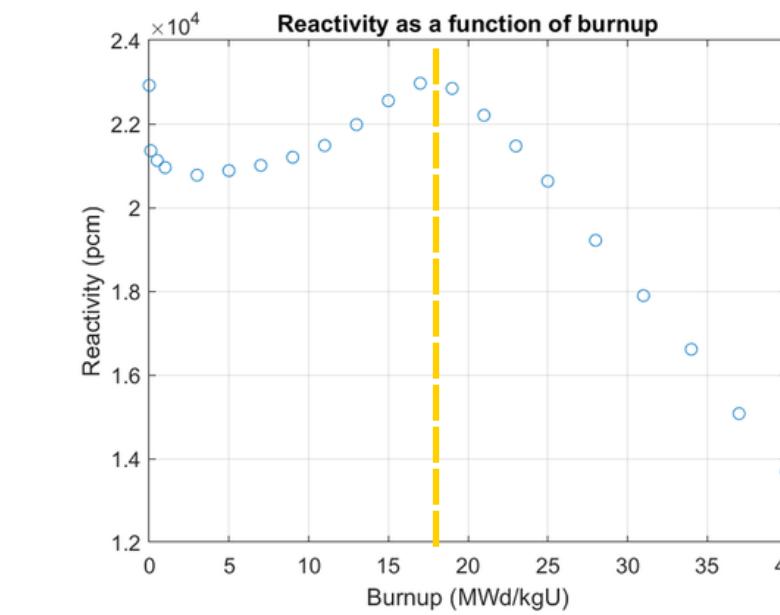
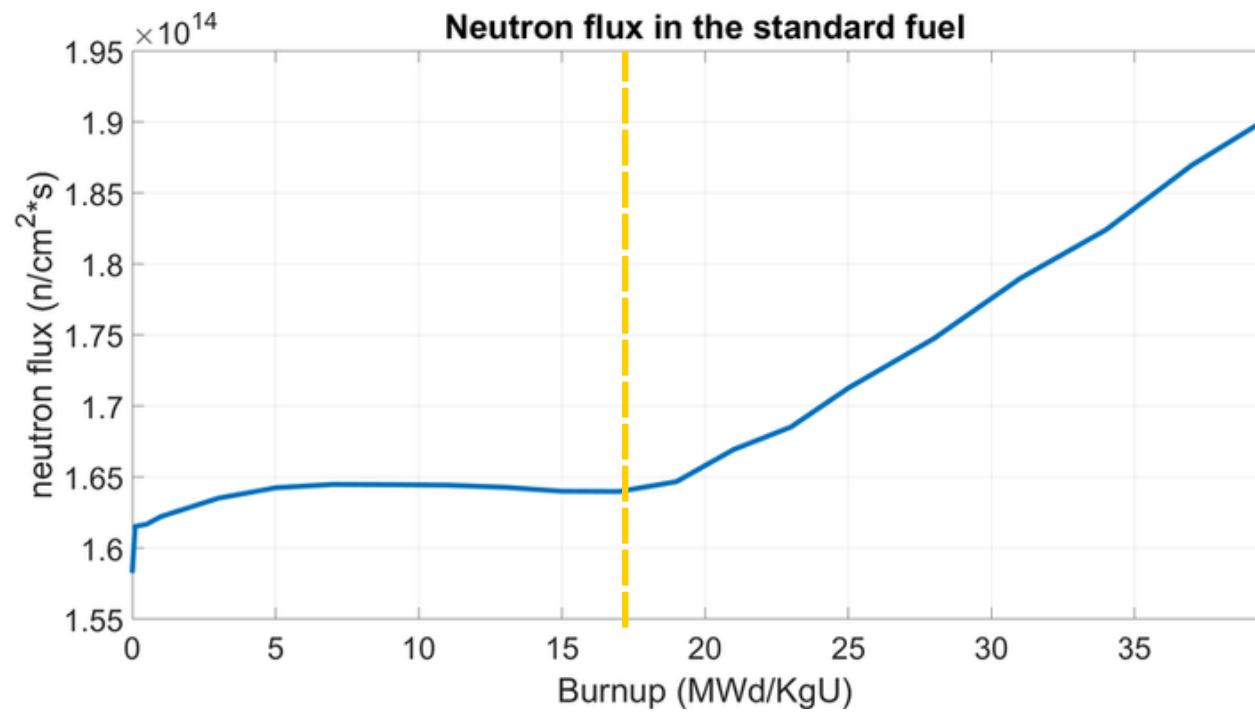
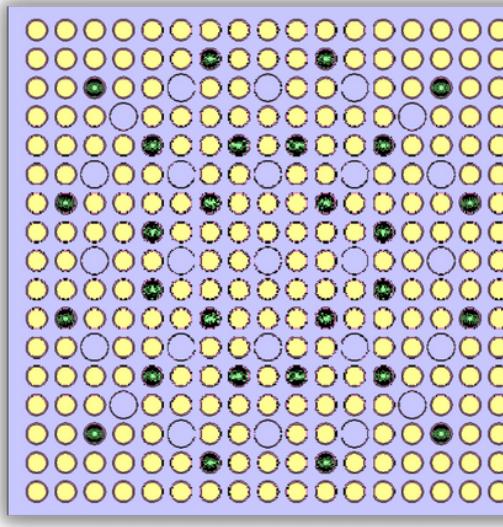
Differenze 2D e 3D

Analisi di reattività e flussi neutronici

28 rods | 3D core



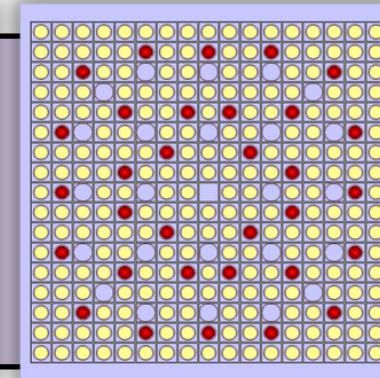
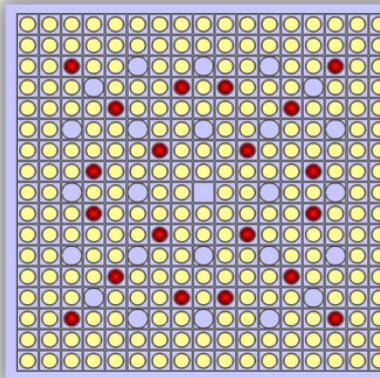
28 rods | 2D core



U-235 7% -wt | Gd 5% -wt

Selezione della geometria

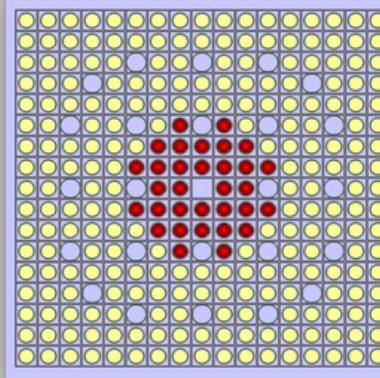
Analisi di reattività



Distribuzione Omogenea

Reactor 0 **20 poisoned rods** | Reactor 1 **32 poisoned rods**

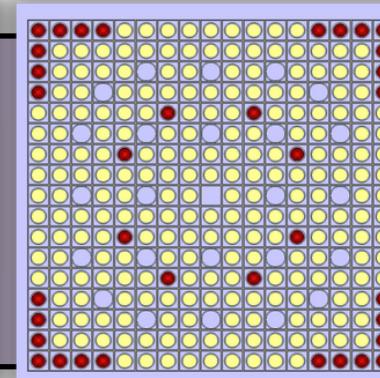
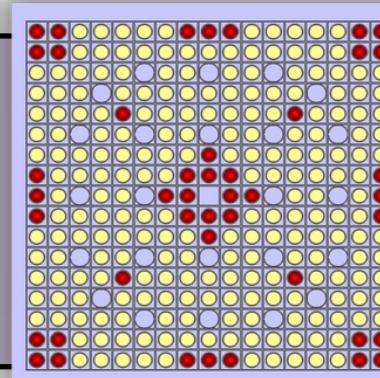
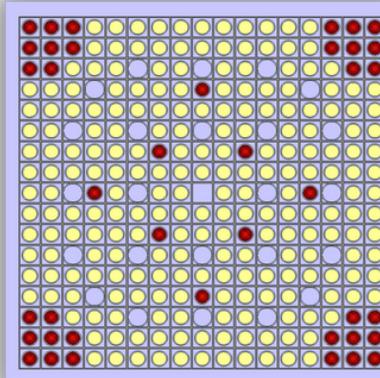
- **Contributo di antireattività** delle poisoned rods proporzionale al numero di rods inserite
- **Consumo uniforme** delle poisoned rods.



Distribuzione Eterogenea

Reactor 2 **32 poisoned rods**

- **Contributo di antireattività** delle poisoned rods dipendente dalla superficie efficace di "fresh poison", ridotta in fase di BOL.
- **Consumo differenziale** dei vari anelli di veleno neutronico permette di spostare il picco di gadolinio più avanti nella vita del reattore.



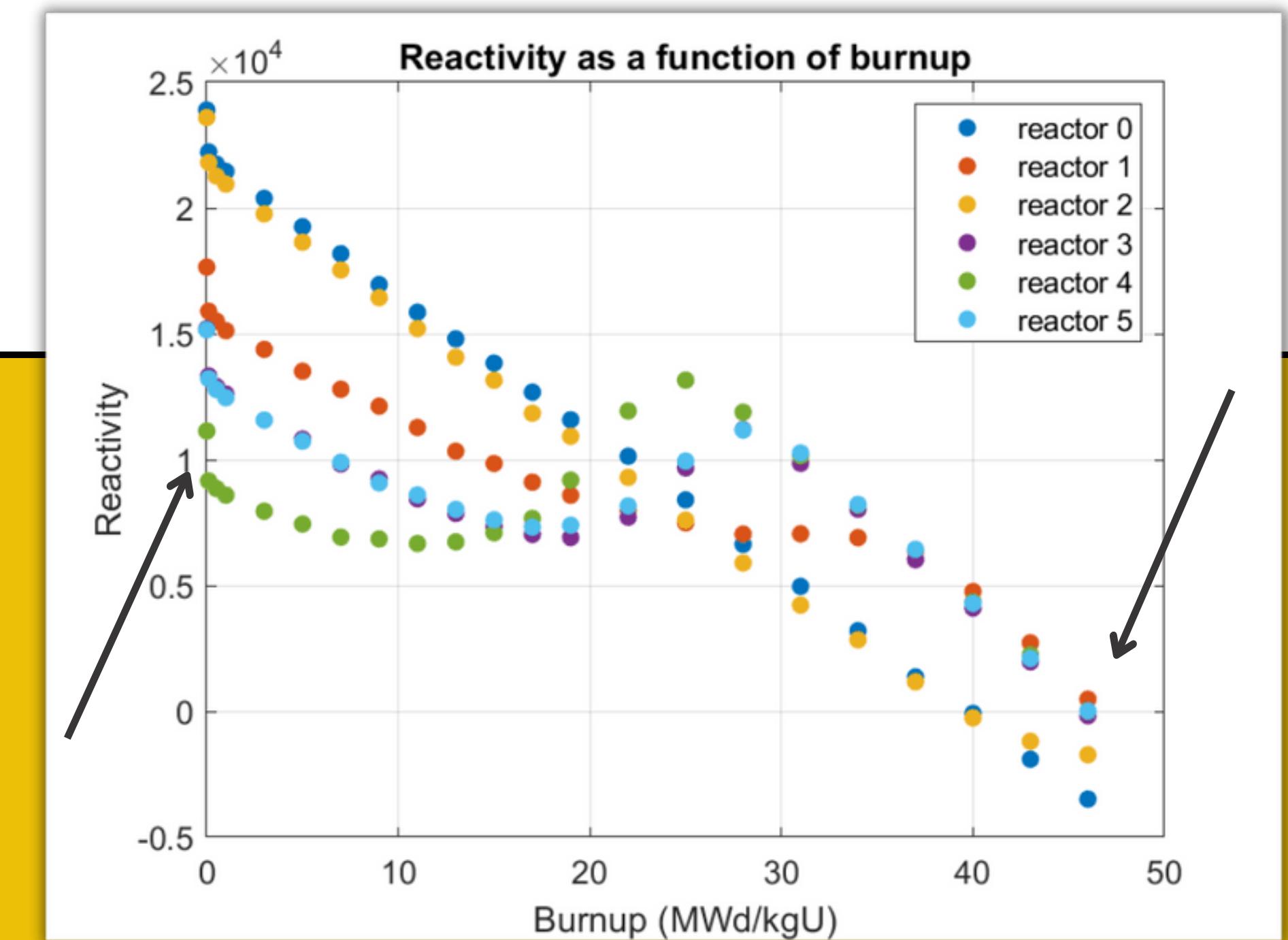
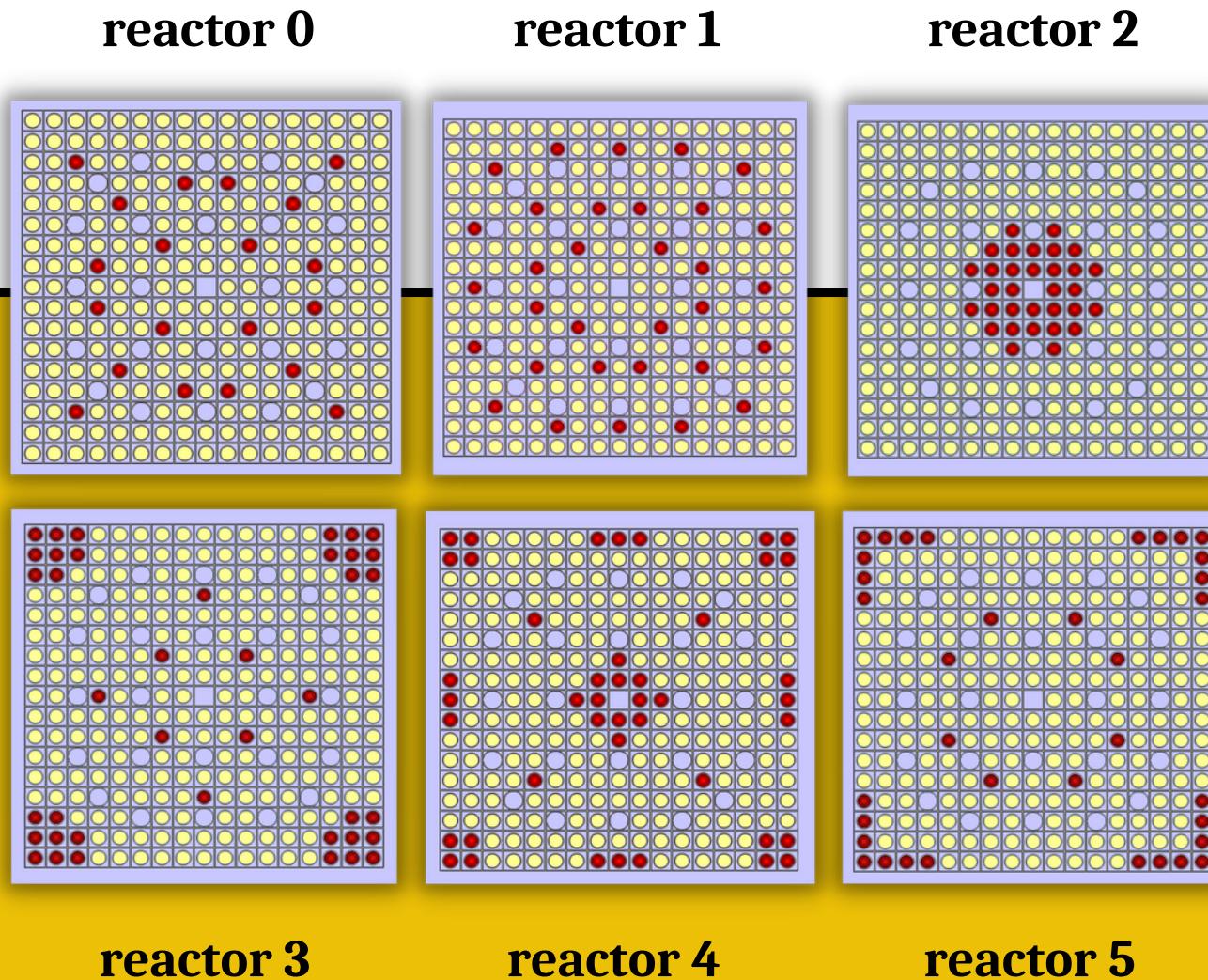
Distribuzione Mista

Reactor 3 **40 poisoned rods** | Reactor 4 **44 poisoned rods**
Reactor 5 **36 poisoned rods**

- **Ottimizzazione dei pro e dei contro** delle due configurazioni precedenti, con compromesso tra valori di reattività iniziali e cut-off burnup.

Selezione della geometria

Analisi di reattività



U-235 7% -wt | Gd 5% -wt

Selezione della geometria

Analisi di reattività



Reactor Design	Gd Rods	Position	Gd%	U%
Reactor 0	20	Homogeneous	5%	7%
Reactor 1	32	Homogeneous	5%	7%
Reactor 2	32	Cluster	5%	7%
Reactor 3	40	Mixed	5%	7%
Reactor 4	44	Mixed	5%	7%
Reactor 5	36	Mixed	5%	7%

Caratterizzazione del combustibile

Introduzione ai coefficienti di reattività



$$\alpha_F = \frac{\partial \rho}{\partial T_F}$$

$$\alpha_M = \frac{\partial \rho}{\partial T_M}$$

$$\alpha_P = \frac{\partial \rho}{\partial P}$$

$$\alpha_V = \frac{\partial \rho}{\partial x}$$

Reactor 4	44	Mixed	5%	7%
-----------	----	-------	----	----

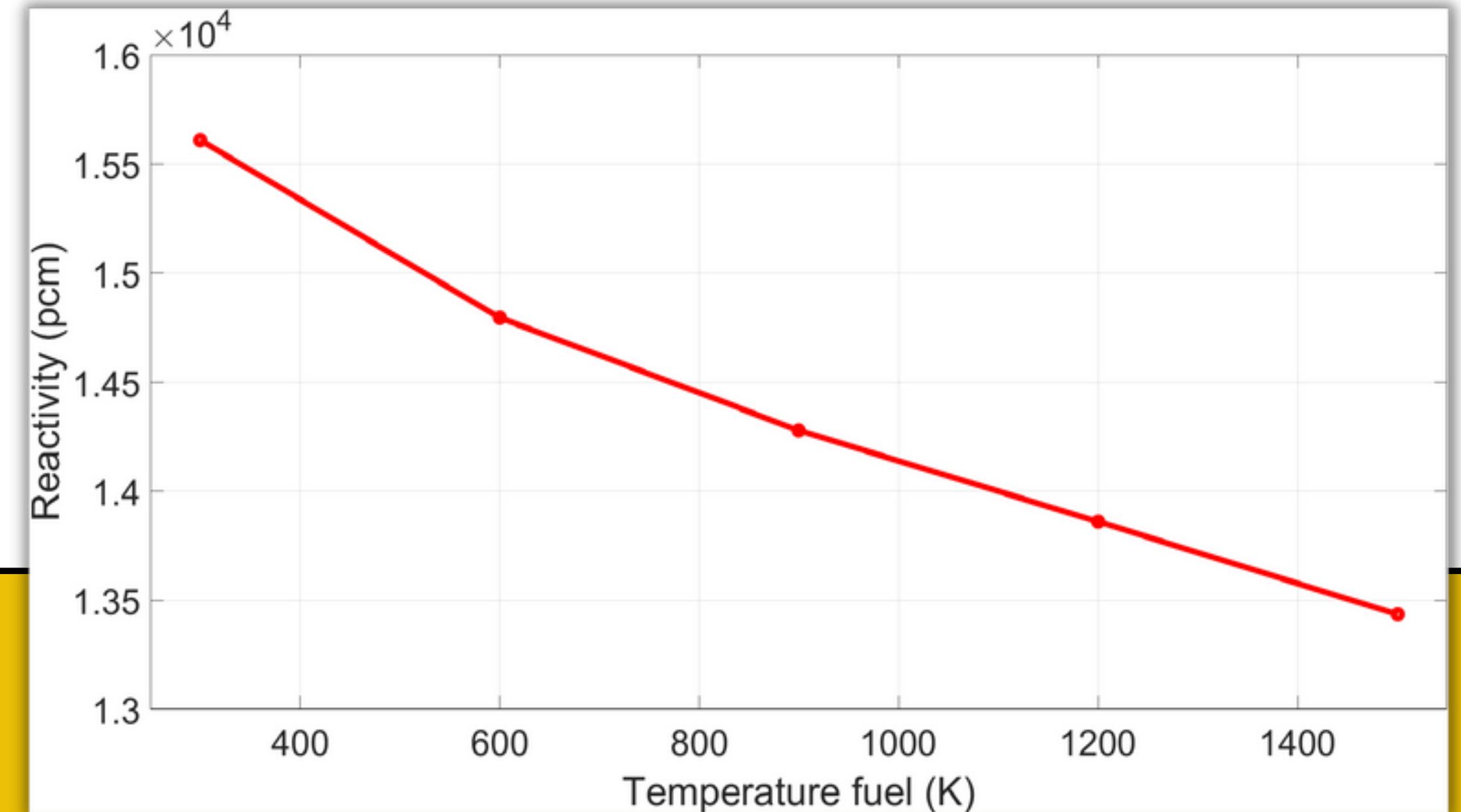
Caratterizzazione del combustibile

Fuel Temperature Coefficient

$$\alpha_F = \frac{\partial \rho}{\partial T_F}$$

$$\alpha_F = -2.7 \frac{pcm}{K} \div -1.4 \frac{pcm}{K}$$

- Effetto **immediato**
- **Doppler**



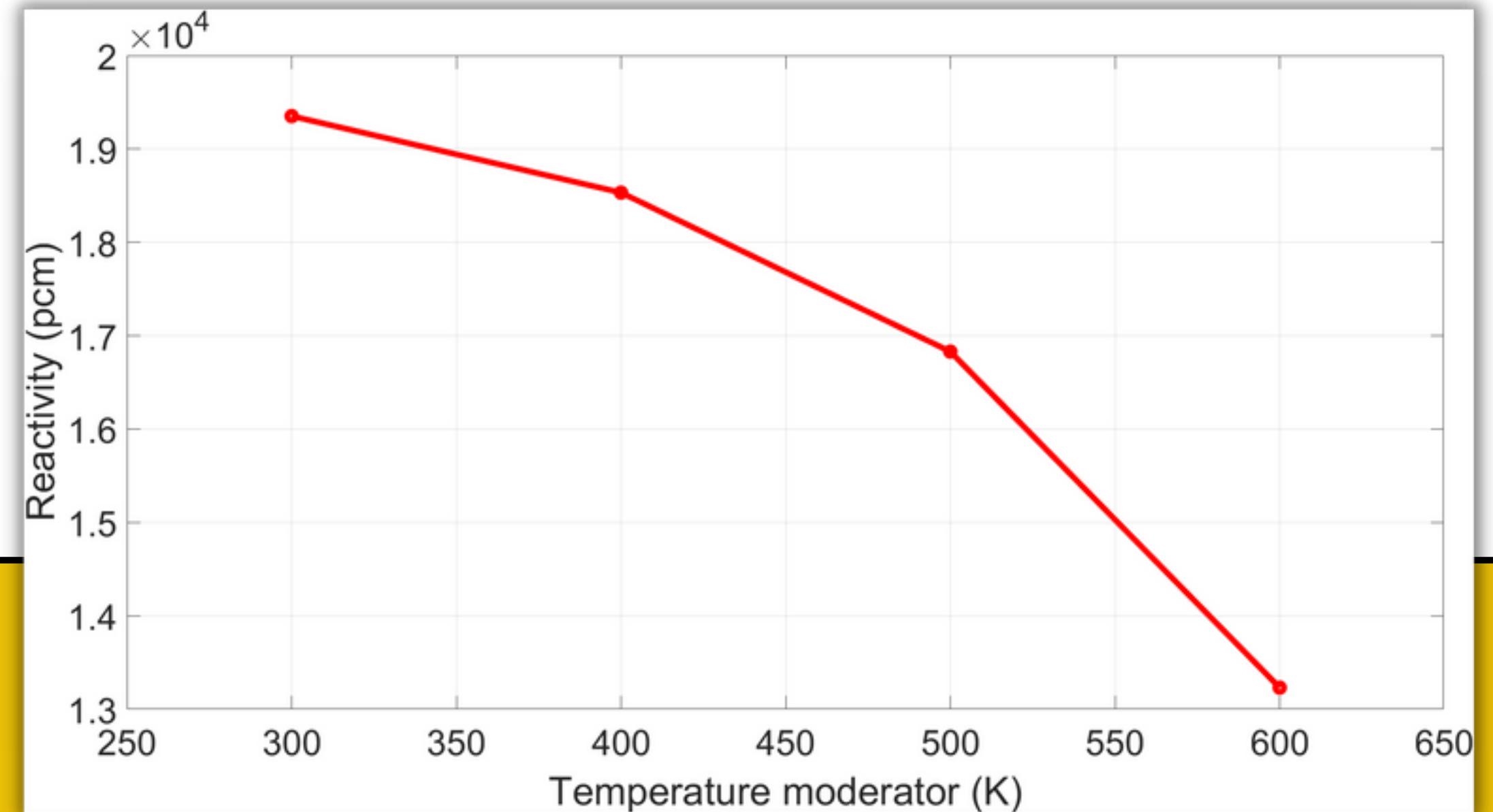
Caratterizzazione del combustibile

Moderator Temperature Coefficient

$$\alpha_M = \frac{\partial \rho}{\partial T_M}$$

$$\alpha_M = -36 \frac{pcm}{K} \div -8 \frac{pcm}{K}$$

- **Riduzione** moderazione
- **Indurimento** spettro dei neutroni termalizzati



Caratterizzazione del combustibile

Power Coefficient



$$\alpha_P = \alpha_F \frac{\partial T_F}{\partial P} + \alpha_M \frac{\partial T_M}{\partial P}$$

Power Level	Fuel Temperature	Moderator Temperature	Moderator Density
540 MW (100%)	950 K	583 K	0.706 g/cm ³
378 MW (70%)	828.9 K	572 K	0.728 g/cm ³
216 MW (40%)	709.8 K	563 K	0.746 g/cm ³
54 MW (10%)	590.7 K	554 K	0.762 g/cm ³

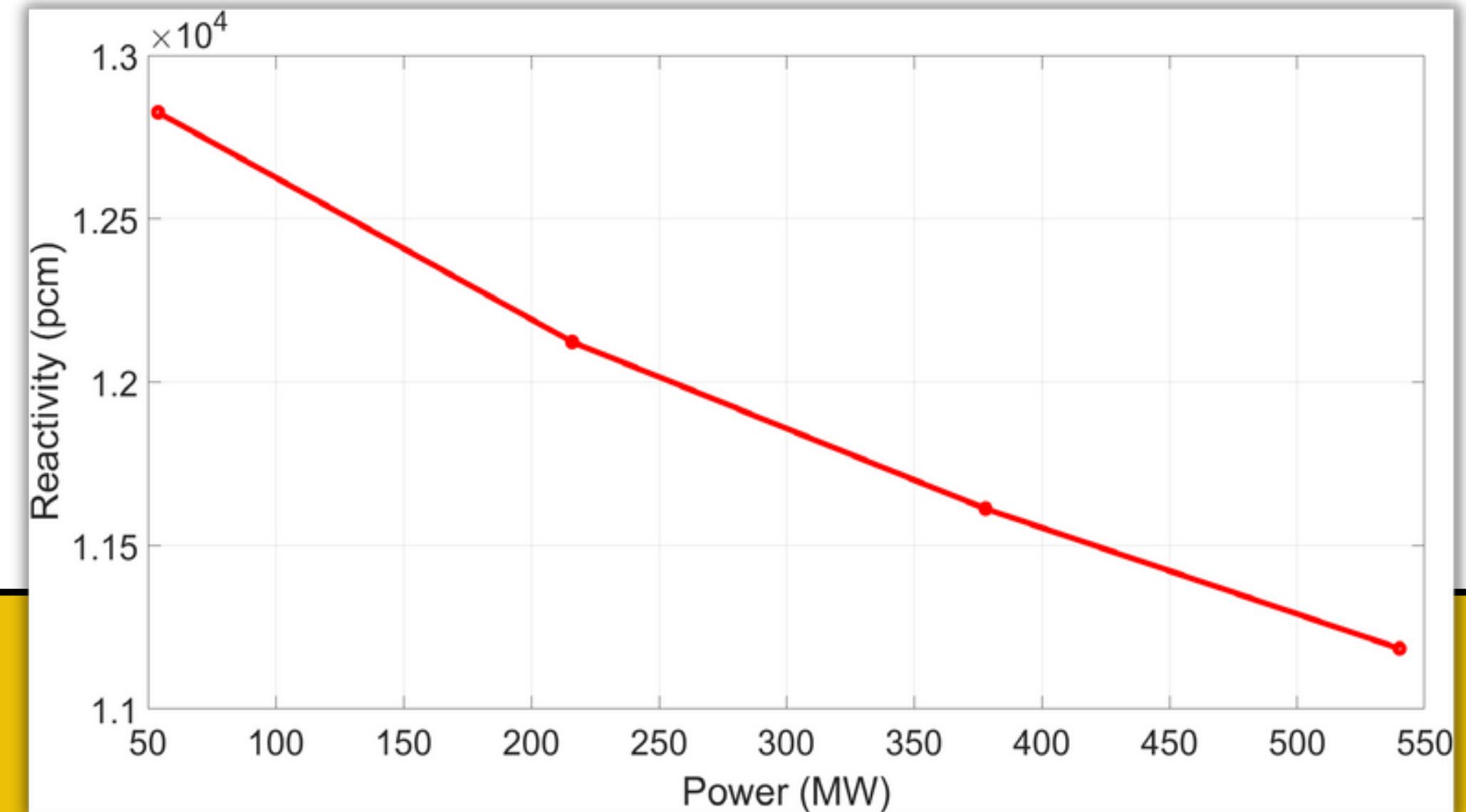
Caratterizzazione del combustibile

Power Coefficient

$$\alpha_P = \frac{\partial \rho}{\partial P}$$

$$\alpha_P = -4.4 \frac{pcm}{MW} \div -2.6 \frac{pcm}{MW}$$

- Aggregato dei due **coefficienti precedenti**
- Utile per l'**operatività del reattore**



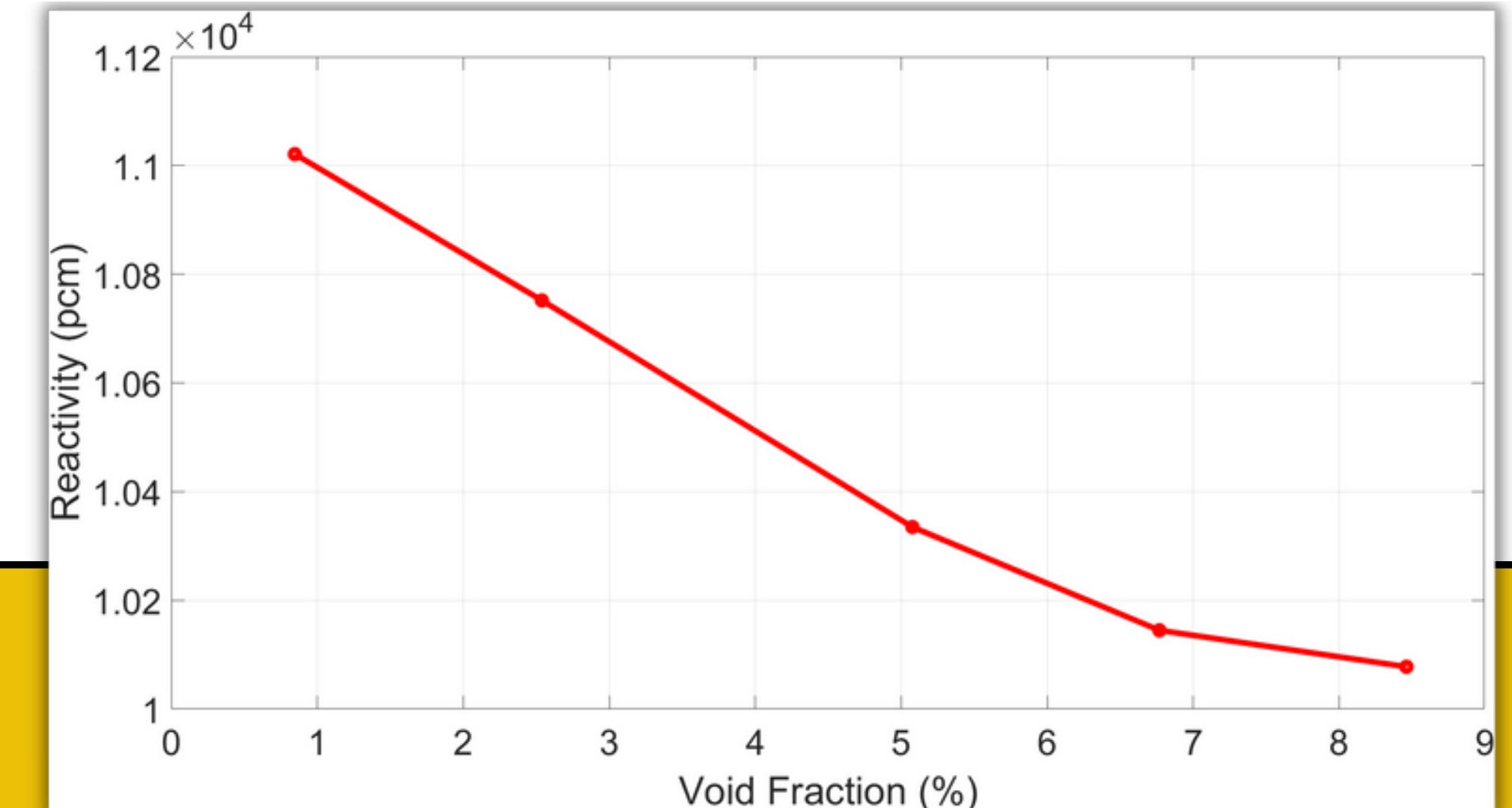
Caratterizzazione del combustibile

Void Coefficient

$$\alpha_V = \frac{\partial \rho}{\partial x}$$

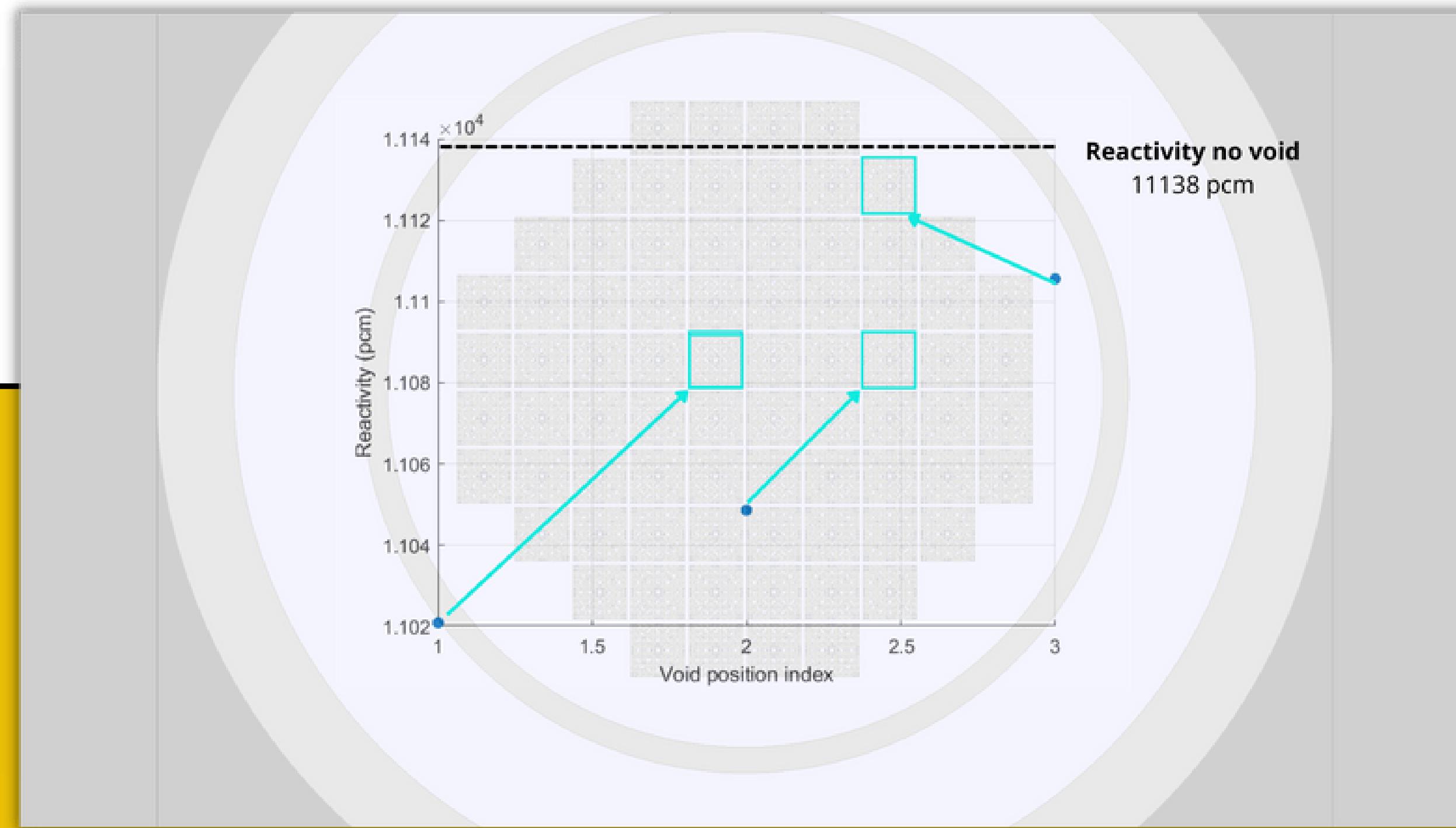
$$\alpha_V = -163 \frac{pcm}{\%void} \div -40 \frac{pcm}{\%void}$$

- Più negativo dell'MTC
- DNB, RIA, LOCA



Caratterizzazione del combustibile

Void Coefficient and position

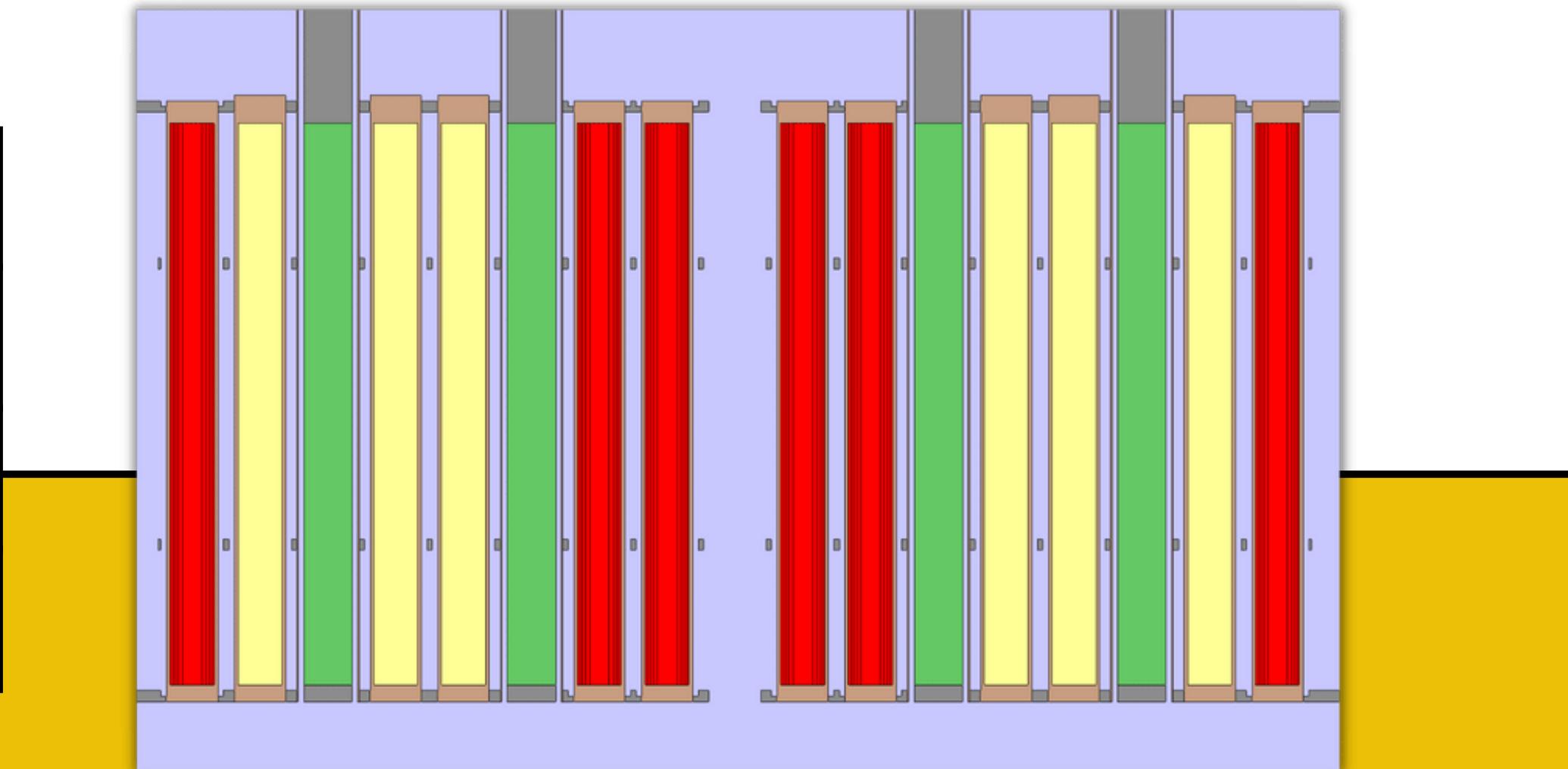


Controllo della reattività

Introduzione all'axial offset

Cold shutdown conditions

Material	Temperature	Pressure
Moderator	93 °C	1 bar
Fuel	97°C	-
Cladding	100 °C	-



$$K_{eff}^{iniziale} = 1.14713 \pm 0.12\%$$

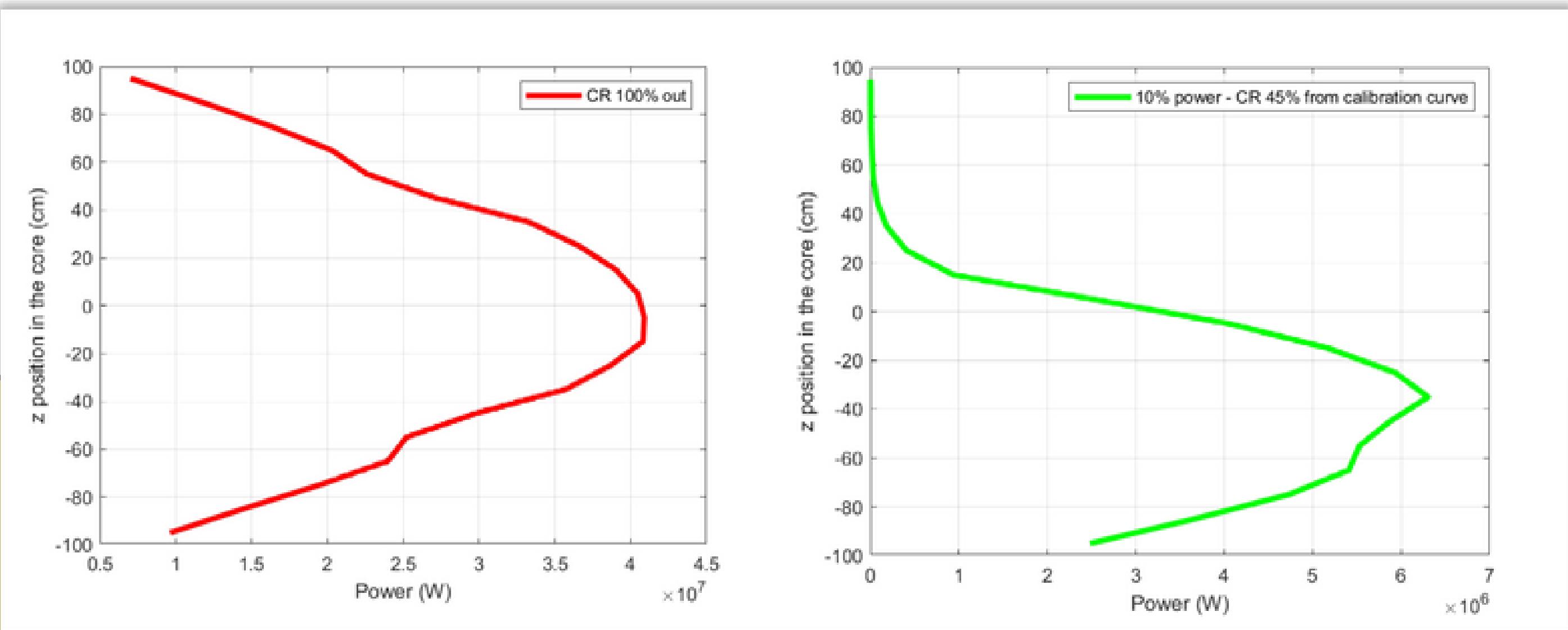
$$K_{eff}^{finale} = 0.77738 \pm 0.12\%$$

Controllo della reattività

Introduzione all'axial offset



POLITECNICO
MILANO 1863



$$AO = \frac{POW_{UP} - POW_{DOWN}}{POW_{UP} + POW_{DOWN}} * 100$$

$$AO = -70.8\%$$

Sviluppi futuri

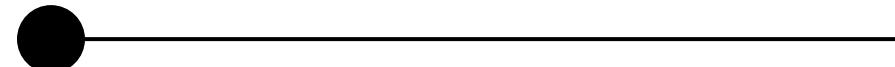
Strategie di refuelling

possibile focus sulle implicazioni in termini di LCOE di diverse strategie di refuelling



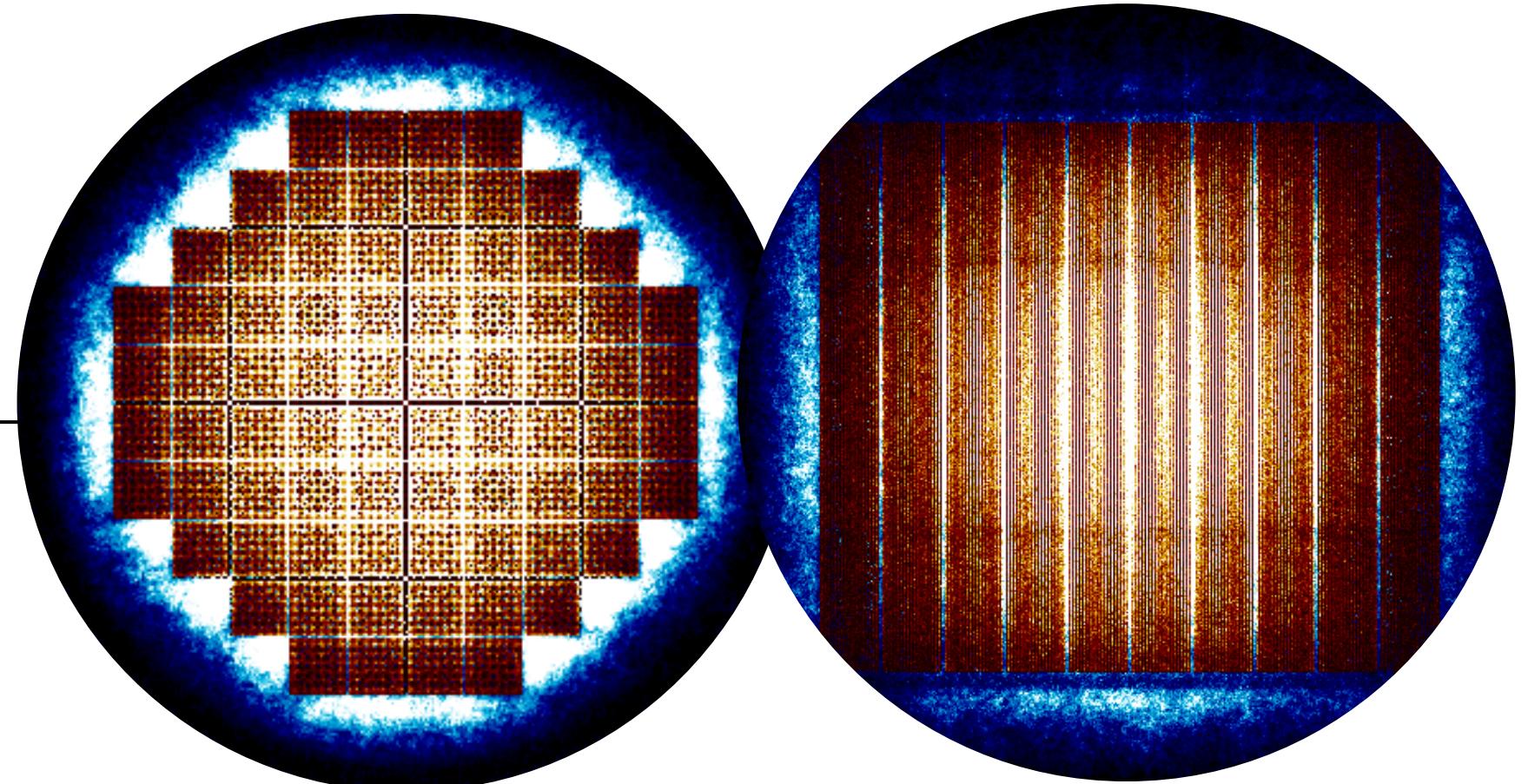
MOX

implementazione di fuel di tipo MOX in NUWARD, implicazioni economiche, geopolitiche e fisiche



Analisi termica del combustibile

accoppiamento del codice SERPENT con un modulo di analisi di performance del fuel, al fine di studiare le evoluzioni del profilo di temperatura del combustibile



Thermal Analysis



Economics



Fuel

References

- [1] H. Kamide, G. Rodriguez, P. Guiberteau, N. Kawasaki, B. Hatala, A. Alemberti, S. Bourg, Y. Huang, F. Serre, M. A. Fuetterer, et al., “**Generation iv international forum-gif, annual report 2020**,” 2021.
- [2] E. Commission, “**Eu taxonomy draft**,” vol. 1, pp. 9–10, 2021.
- [3] E. Hanus, “**Nuward cea presentation**,” 2019.
- [4] IAEA, “**Nuward info sheet**,” ARIS database IAEA, 2019.
- [5] J.-J. Ingremseau and M. Cordiez, “**Flexblue® core design: optimisation of fuel poisoning for a soluble boron free core with full or half core refuelling**,” EPJ Nuclear Sciences & Technologies, pp. 1–13, 2015.
- [6] CEA, “**Direction de l’energie nucleaire | rapport d’activité**,” 2019.
- [7] J. Leppänen et al., “**Development of a new monte carlo reactor physics code**,” 2007.
- [8] J. R. LAMARSH, “**Introduction to nuclear reactor theory**,” pp. 448–450, 1966.
- [9] J. J. Duderstadt and L. J. Hamilton, “**Nuclear reactor analysis**,” p. 563, 1976.

References

- [10] A. Shahmirzaei, G. Ansarifar, and A. Koraniany, “**Assessment of gadolinium concentration effects on the nuscale reactor parameters and optimizing the fuel composition via machine learning method**,” International Journal of Energy Research, vol. 46, no. 7, 2022.
- [11] J. J. Duderstadt and L. J. Hamilton, “**Nuclear reactor analysis**,” p. 559:561, 1976.
- [12] J. J. Duderstadt and L. J. Hamilton, “**Nuclear reactor analysis**,” p. 554:556, 1976.
- [13] Y. Kazansky and Y. Slekenichs, “**Power coefficient of reactivity: definition, interconnection with other coefficients of reactivity, evaluation of results of transients in power nuclear reactors**,” Nuclear Energy and Technology, vol. 4, p. 111, 2018.
- [14] L. Carlson, J. Miller, and Z. Wu, “**Implications of haleu fuel on the design of smrs and micro-reactors**,” Nuclear Engineering and Design, vol. 389, p. 11-16-48, 2022.
- [15] E. G. Niccolo Ludovico Coscia, “**Amelioration des mod’les de cin’etique spatiale pour les rep : application aux ‘etudes des transitoires incidentels et de fonctionnement des coeurs n4 et small modular reactor**,” EDF RD Département SINETICS.

Grazie per l'attenzione.



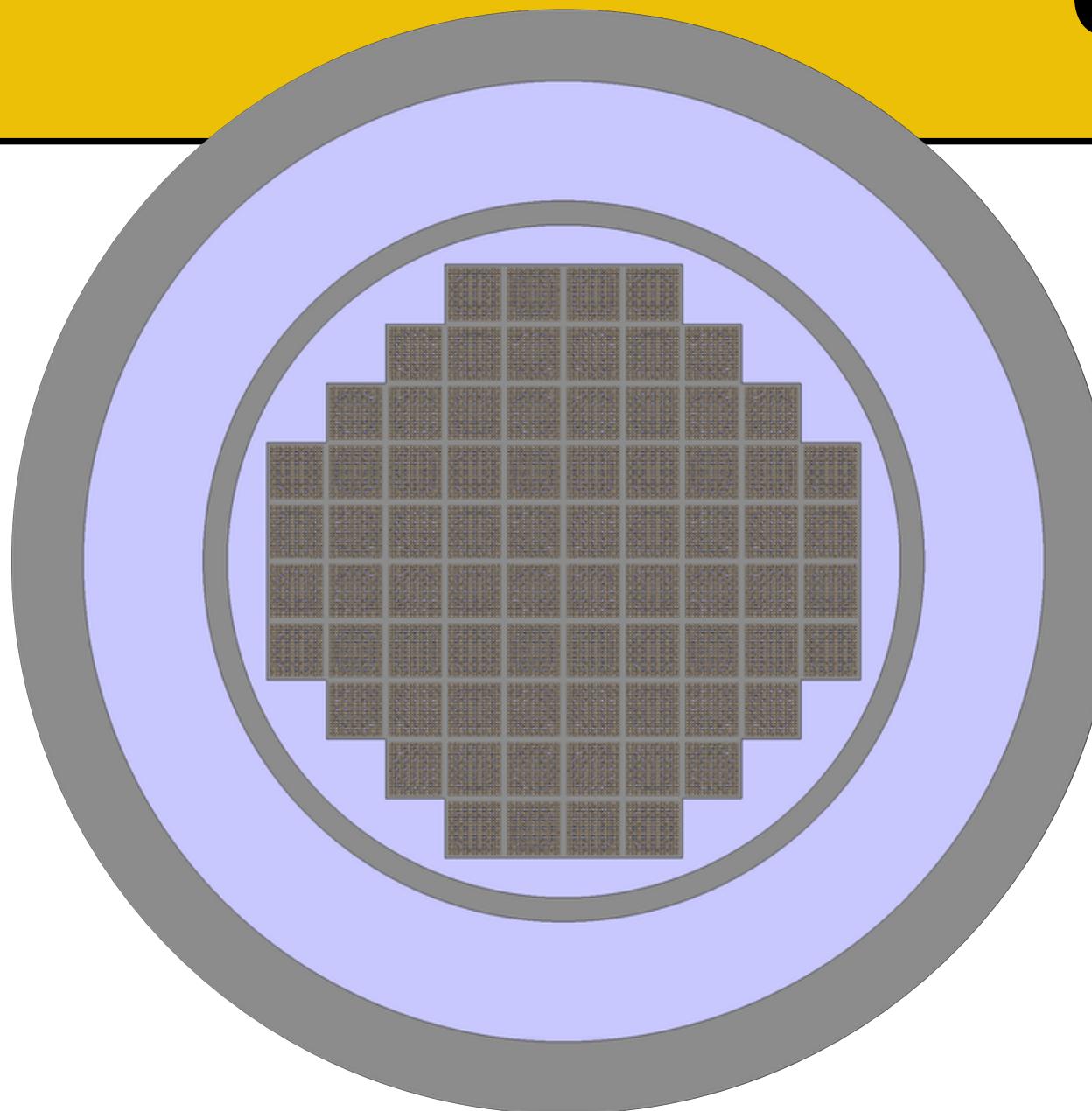
Laboratorio Ingegneria Nucleare
Energy Engineering - Nuclear Track

Reactivity Analysis for NUWARD Small Modular Reactor

Patrik Shytaj
Daniele Timpano
Carola Villa

Aggiunte e chiarimenti

Caratteristiche Principali



Core Height (m)	2,2
Pellet Diameter(cm)	0,784
Gap thickness (cm)	0,00832
Gap radius (cm)	0,40032
Clad thickness (cm)	0,0573
Clad radius (cm)	0,45762
Pin Pitch (cm)	1,26



Boro e reattori pressurizzati ad acqua

Effetti positivi e negativi del boro



Boron dilution una diluizione disomogenea del boro all'interno del moderatore può accompagnarsi a zone in cui l'assenza di boro è causa di spot di potenza incontrollata.

Corrosione del circuito primario l'acido borico è particolarmente pericoloso per il reactor pressure vessel qualora si verifichi un problema ad una delle thermal blankets e si creino problemi di corrosione.

Moderator Temperature Coefficient la presenza di boro aumenta l'MTC dato che riducendo la densità del moderatore si riduce la sezione d'urto macroscopica del boro, quindi viene meno il suo effetto di cattura neutronica e la reattività si riduce di meno rispetto al caso senza boro.

Controllo della reattività in caso di xenon transient Il movimento delle control rods in fase di load following può causare, alla loro estrazione, picchi di potenza nella parte alta del core dovuti alla minor concentrazione di Xenon. Utilizzare boro limita questo problema poiché permette ragionevolmente un ingresso minore delle control rods.

Controllo della reattività

Come abbiamo costruito la calibration curve?

Il **coefficiente di potenza** calcolato in fase di caratterizzazione del combustibile ha la finalità di stabilire che tipo di aumento di reattività si verificherebbe in un transitorio in cui il reattore si assesta da una certa potenza ad un'altra. In questo contesto, il combustibile diventa più freddo e così il moderatore, **la reattività dunque aumenta** e sarà necessario **compensarla** con un opportuno **inserimento di anti-reattività** attraverso le control rods. Se si dispone delle **curve di calibrazione** delle control rods allora è possibile associare ad una **data posizione** delle control rods un **dato inserimento di antireattività**.

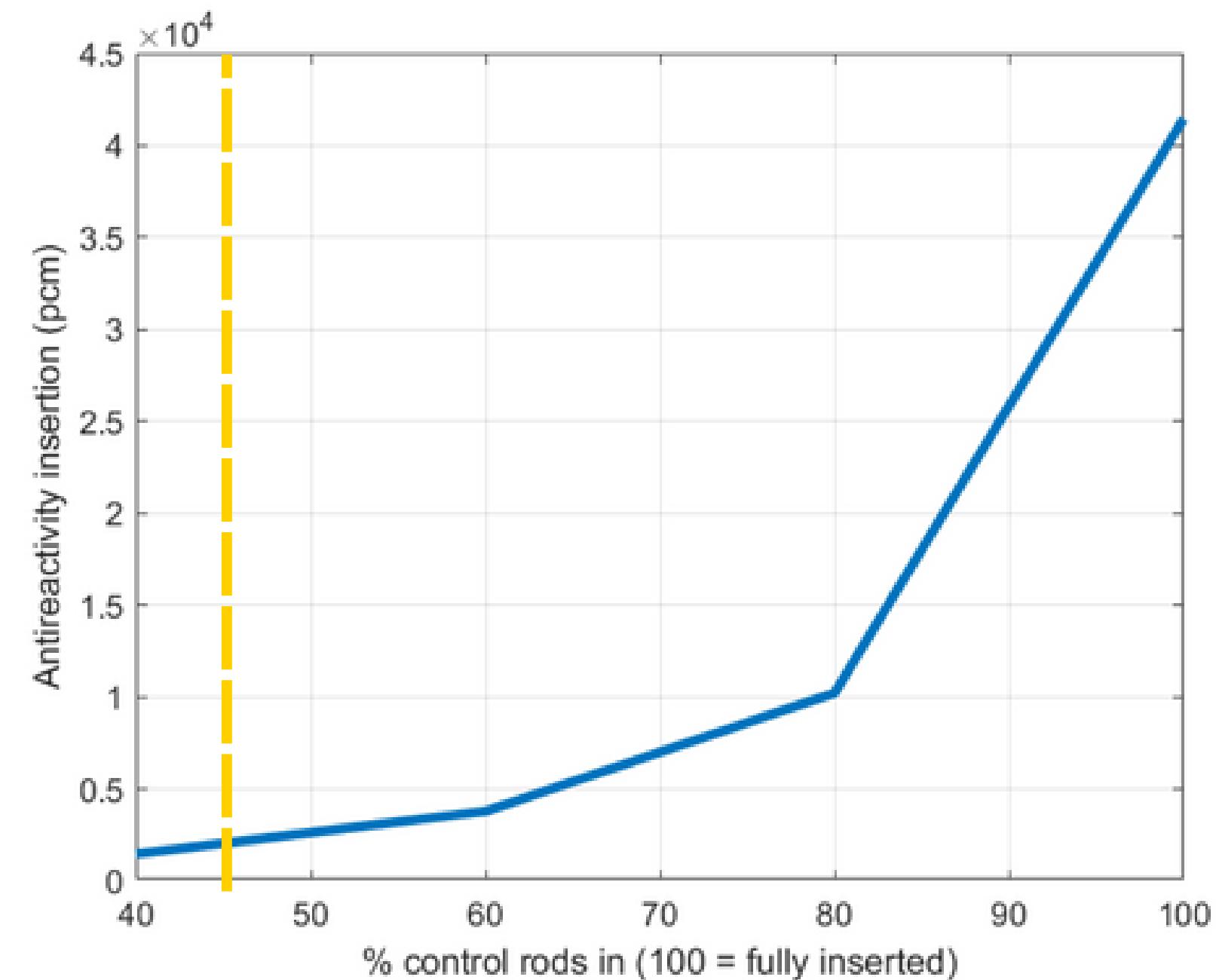
CR position	k eff	reactivity	CR worth	Antireactivity insertion
100% in	0,7773	-28637,217	28637,217	41462,217
80% in	1,026	2610	-2610	10215
60% in	1,099	9042	-9042	3783
40 % in	1,128	11360	-11360	1465
0% in	1,1471	12825	-12825	0

Controllo della reattività

Calibration curve - Risultati

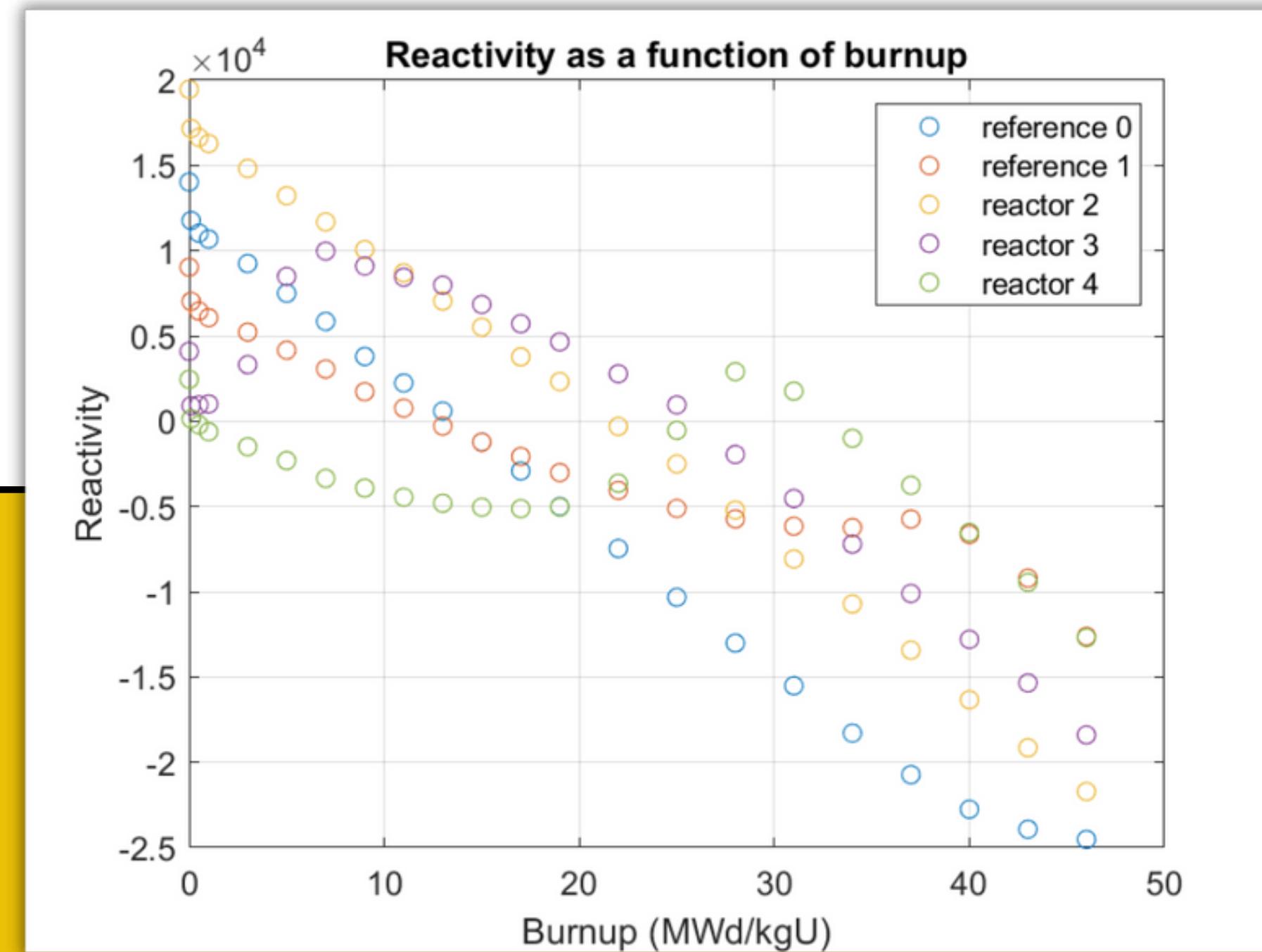
Non potendo noi simulare l'effetto che **dinamicamente** si ottiene per inserimento delle control rods, la costruzione di una **curva reale di calibrazione** sembrava complessa. Tuttavia per poter associare in maniera significativa un dato valore di **axial offset** a una data tipologia di transitorio (ad esempio 100%-10%) si rendeva necessario riuscire ad associare almeno ad una **data posizione delle control rods**, una **certa antireattività**.

Per poterlo fare noi abbiamo "**congelato**" la **potenza del reattore al 10%**, adeguando coerentemente tutti i parametri dei materiali, e abbiamo calcolato **la differenza di reattività tra il caso fully-withdrawn e quello con un dato inserimento**. A questo punto abbiamo associato a un dato transitorio di potenza (studiato tramite alpha power), **una posizione delle control rods coerente**.



HALEU fuel

Perché arricchire? Per poter studiare configurazioni eterogenee.



U-235 5% -wt | Gd 8% -wt

HALEU fuel

Problemi e opportunità



Combustibile HALEU e LCOE

Investire nella strada degli SMR può comportare il rischio di un LCOE più elevato. LCOE potrebbe essere ridotto arricchendo il combustibile superando il limite regolamentato del 5% in peso (w/o) U235. Viene introdotto **il carburante HALEU (5-20 w/o 235U) ad alto dosaggio per aumentare il fattore di capacità** dell'impianto, riducendo così i costi di fornitura del combustibile e riducendo l'LCOE.

Combustibile HALEU, corrosione e crud deposition

Prolungando il ciclo del combustibile di un reattore, il cladding sarà esposto a livelli più elevati di **corrosione e crud deposition.** Per questo motivo, i progetti SMR che utilizzano carburante HALEU devono prestare attenzione alla chimica del circuito primario.

HALEU fuel

Problemi e opportunità



Combustibile HALEU e coefficienti di temperatura

Uno dei pericoli coinvolti nell'aumento dell'arricchimento nel nocciolo di un reattore nucleare commerciale è che **il coefficiente di temperatura** diventa meno negativo. Ciò è dovuto a un **aumento del fission rate**, proporzionale all'arricchimento di ^{235}U , e a una **diminuzione del capture rate**.

Combustibile HALEU e ciclo del combustibile

Le conseguenze di un maggiore arricchimento del combustibile sono molteplici, talune positive, talune negative: **maggior stoccaggio di uranio naturale** per la produzione di un "carico" di fresh fuel, **riduzione dell'approvvigionamento di combustibile** in ragione del refuelling meno frequente, **i rifiuti a bassa intensità (LLW)** sono destinati ad aumentare coerentemente con il maggiore lavoro di separazione necessario alla produzione di combustibile arricchito, **i rifiuti ad alta intensità (HLW)** nella forma di spent fuel sono invece destinati a diminuire in ragione di un ciclo del combustibile più lungo.

Gadolinio e proprietà del combustibile

Fenomeni causati dall'inserimento di gadolinio



Processo di fabbricazione

Aumentando **la densità relativa del gadolinio** aumenti la probabilità che si formino **crepe all'interno del combustibile durante** il processo di fabbricazione a causa di una notevole differenza tra i coefficienti di espansione termica di Gd_2O_3 e UO_2 .

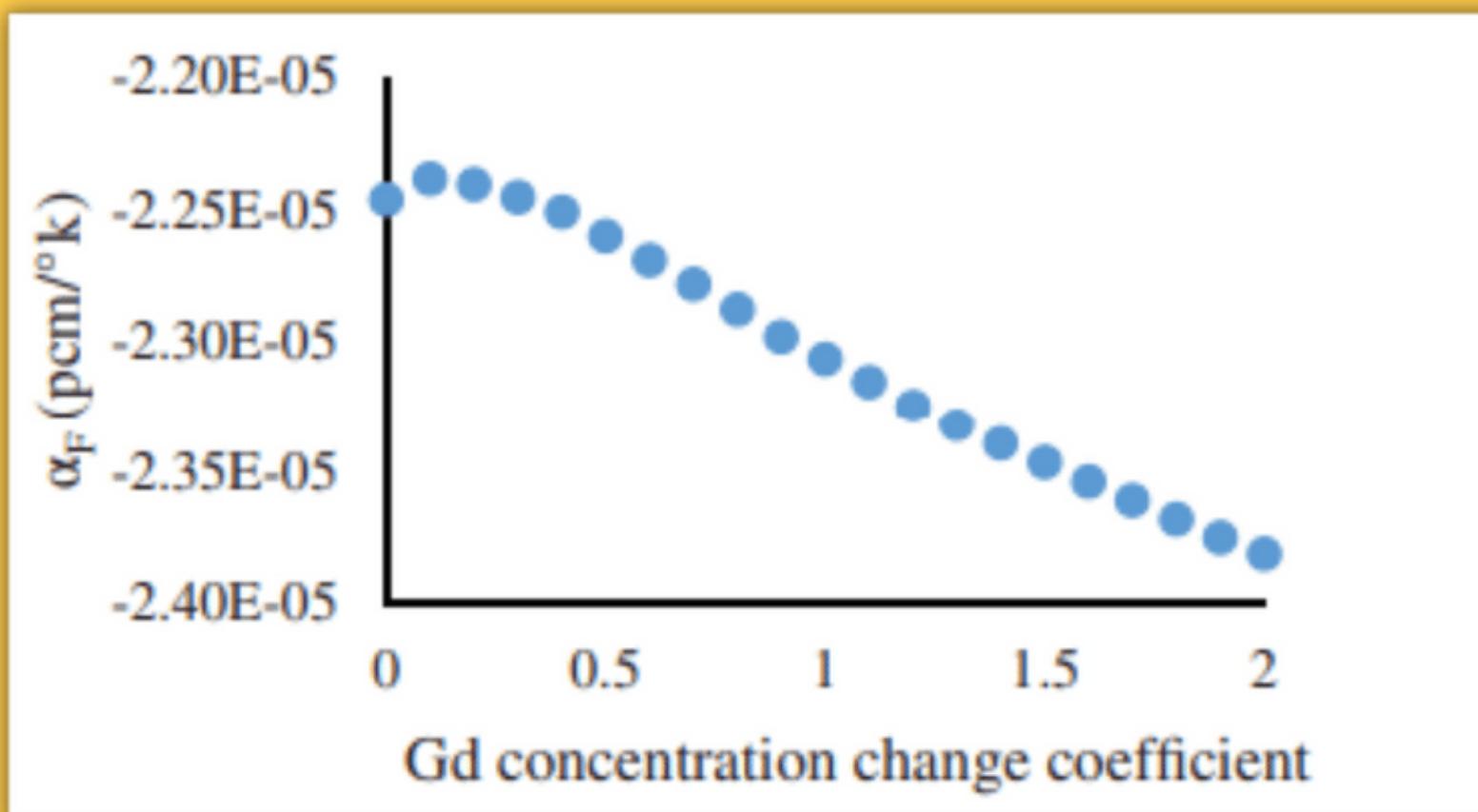
Conduttività termica

Aumentando la concentrazione di Gadolinio **si riduce la conduttività termica del combustibile**, a causa della bassa conduttività termica di questo materiale se comparata con quella dell'ossido di uranio.

Gadolinio e proprietà del combustibile

Fenomeni causati dall'inserimento di gadolinio

Percentuale di gadolinio e fuel temperature coefficient (FTC)



In piccole quantità il Gd, rispetto a un reattore senza Gd, introduce un assorbimento neutronico che fa pesare di meno la cattura dovuta alle risonanze, quindi l'FTC aumenta.

All'aumentare della % di Gd si fanno sentire in modo sempre più rilevante le risonanze del Gd, che aggiungendosi a quelle dell'U238 causano una riduzione dell'FTC.

*Studio variazione FTC al variare della percentuale di Gd su reattore NuScale

Considerazioni economiche

Impatto economico dell'introduzione di gadolinio in HALEU fuel assemblies



Table A9. Single assembly fuel cost comparison of models have 4.00 wt.% n-Gd₂O₃, and 1.45 wt.% e-Gd₂O₃ both in 5 wt.% ²³⁵U (all values are provided in kUSD).

	4.00 wt.% n-Gd ₂ O ₃			1.45 wt.% e-Gd ₂ O ₃		
	Low	Nominal	High	Low	Nominal	High
Cost of uranium	221.12	558.70	1,924.23	221.79	560.40	1,930.07
Cost of conversion	42.60	85.19	124.51	42.73	85.45	124.89
Cost of enrichment	492.46	649.85	781.85	493.96	651.82	784.22
Cost of fabrication	147.90	257.33	370.30	148.71	258.67	371.98
Cost of Gd ₂ O ₃	0.57	0.88	1.14	0.21	0.32	0.42
Cost Of ¹⁵⁷ Gd enrichment	0.00	0.00	0.00	6.00	8.10	11.02
Cost of total fuel for assembly	904.65	1,551.95	3,201.77	913.39	1,564.77	3,222.50
Cost difference				8.74	12.82	20.73

Axial Offset e Nucleate Boiling

Collegamento tra i due fenomeni

Nucleate Boiling

Un aumento locale della temperatura del combustibile, provocato ad esempio da un transitorio di potenza di vario genere, può causare la formazione di **bolle di vapore** sulla superficie di scambio termico tra acqua e combustibile. In queste condizioni, **le bolle di vapore si distaccano** dalla superficie del combustibile e sono trasportate nella corrente di fluido, aumentando inizialmente lo scambio termico. Quest'ultimo, tuttavia, non può essere aumentato all'infinito, e in corrispondenza di quello che si definisce **critical heat flux** le bolle di vapore formano un layer sulla superficie delle fuel rods, **agendo da isolante e deteriorando così il coefficiente di scambio termico**.

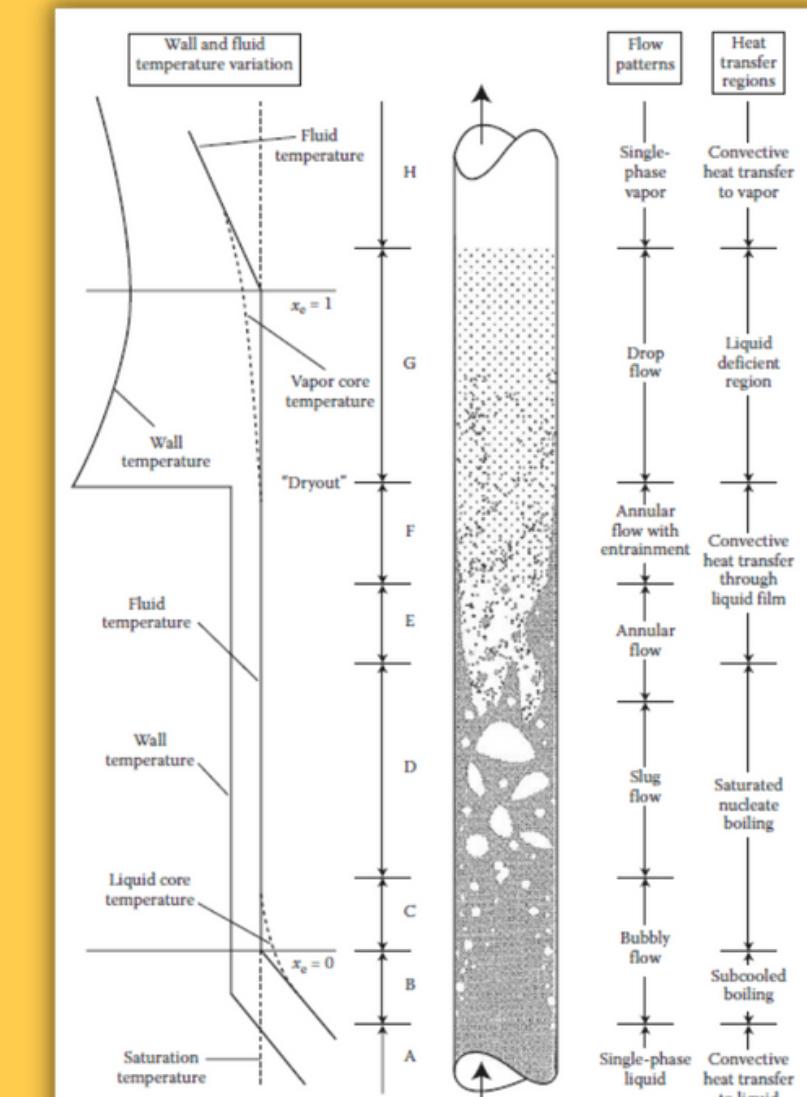
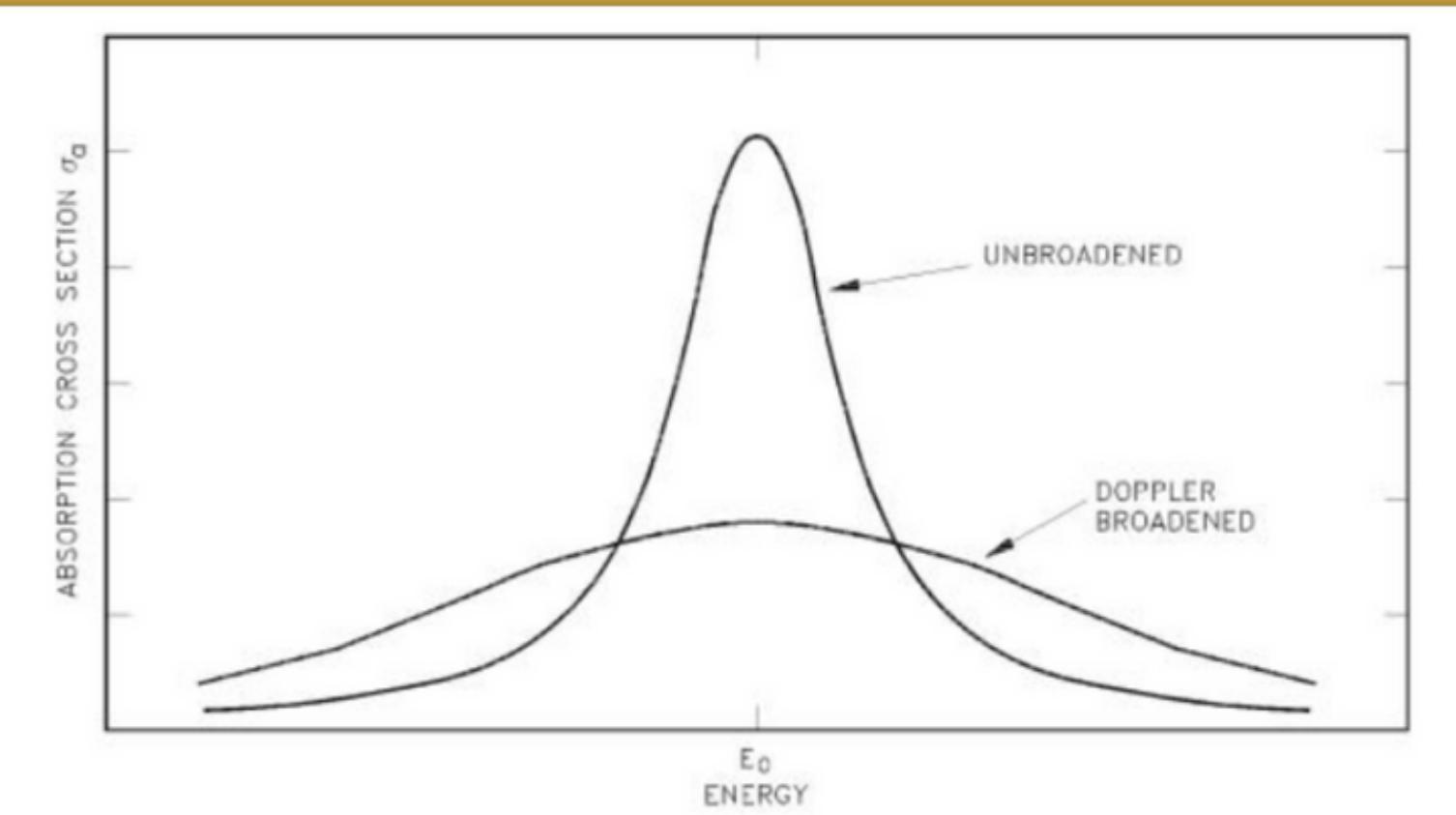


FIGURE 13.1 Regions of heat transfer in convective boiling in a flow channel with uniform wall heat flux. (Adopted from Collier, J. G. and Thome, J. R., *Convective Boiling and Condensation*, 3rd Ed. Oxford University Press, Oxford, UK, 1994.)

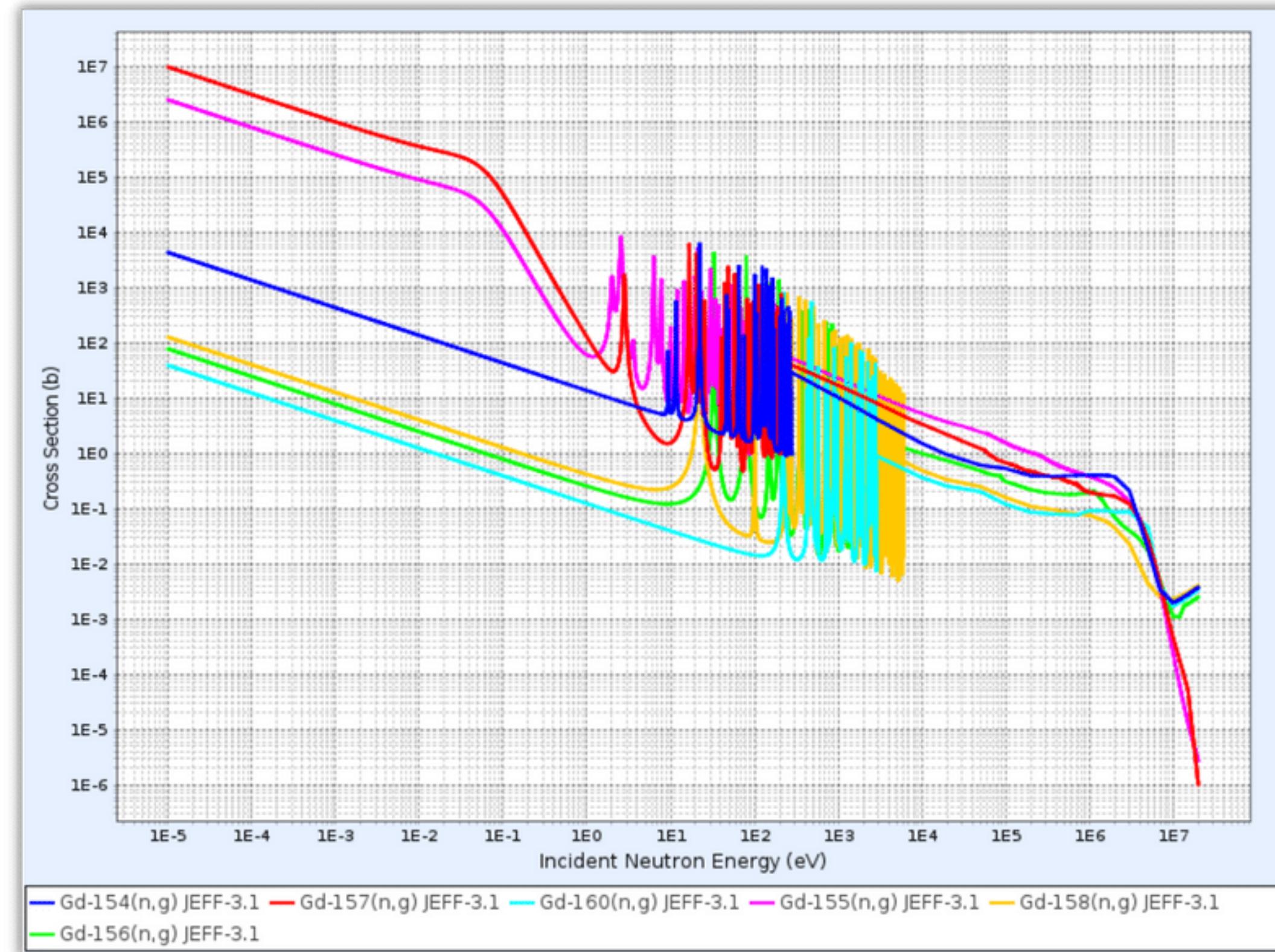
Effetto Doppler

Spiegazione fisica risultati FTC

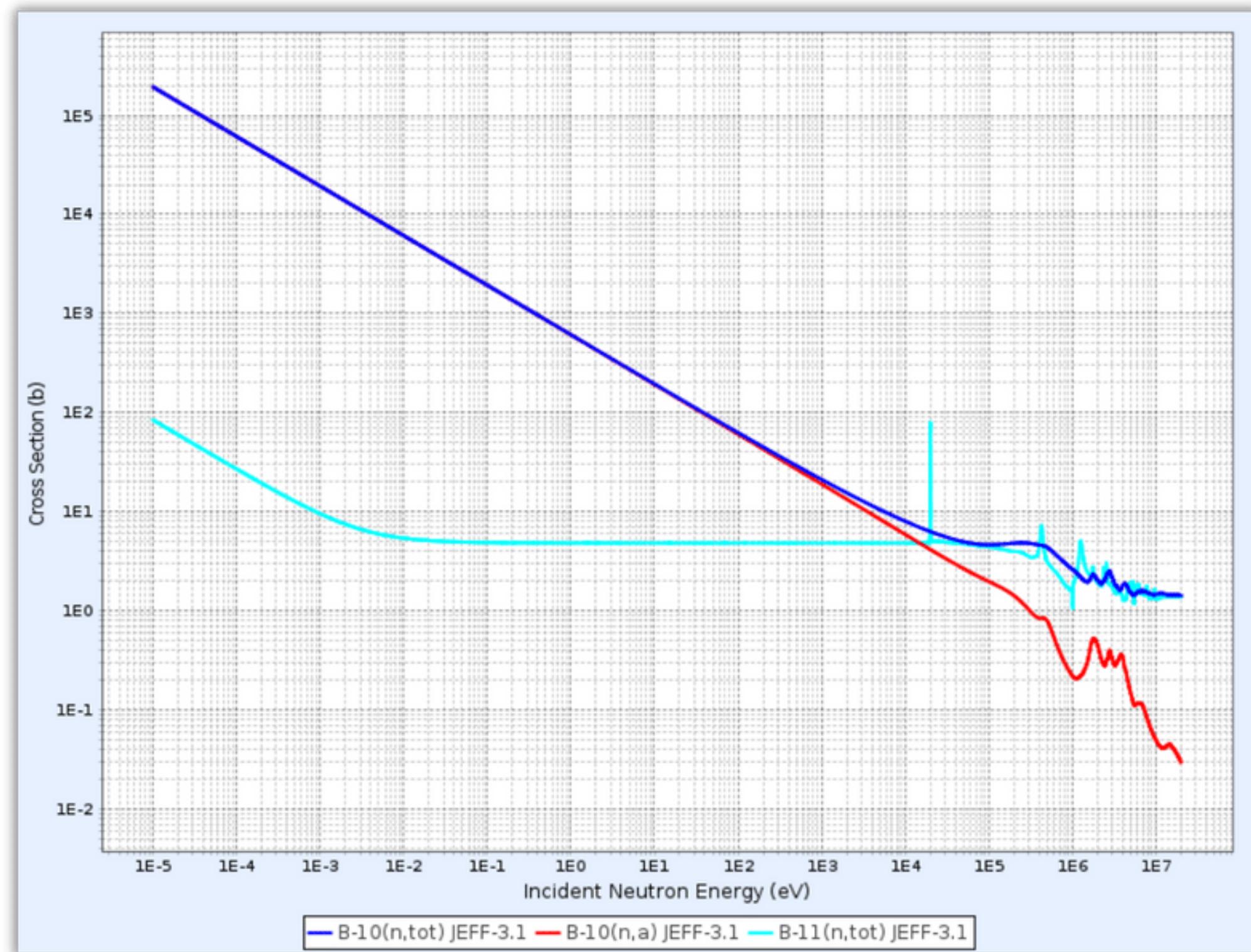


- Causa risposta immediata ad **aumento di temperatura del combustibile**
- Introduce **antireattività**
- Deriva dalla dipendenza delle sezioni d'urto dalla **velocità relativa di nucleo e neutrone incidente**

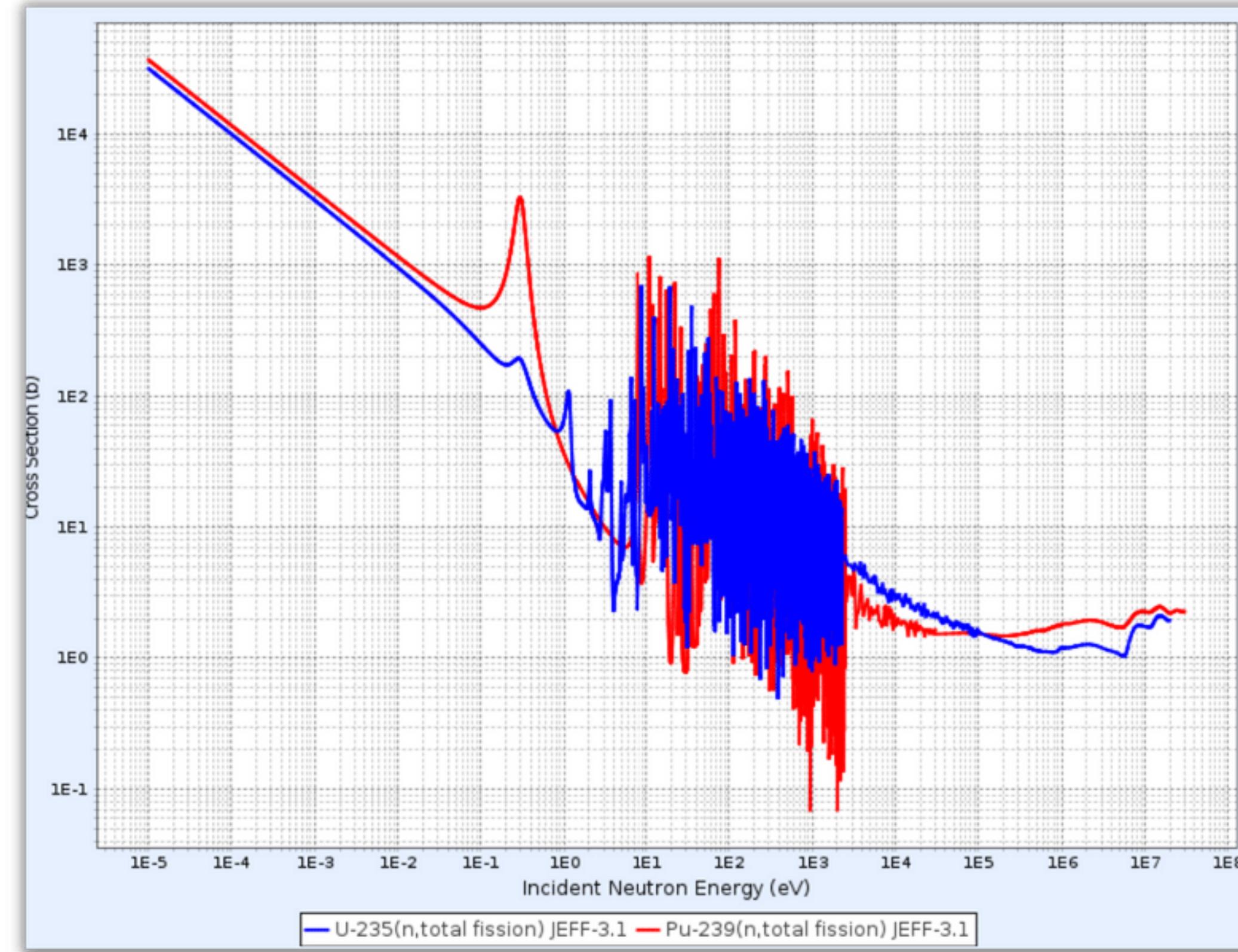
Sezione d'urto del Gadolinio



Sezione d'urto del Boro



Confronto U235-Pu239



Strategie di refuelling



Single batch

Per riuscire a gestire la **reattività iniziale** bisogna aumentare la superficie efficace, quindi il numero di barre di gadolinio. Rimane il problema del **picco di gadolinio** che potrebbe essere gestito aumentando la % di Gd, ma non si può andare oltre il 9% per evitare di degradare le **proprietà del materiale**. L'unica soluzione è adottare una **distribuzione eterogenea** di barre di gadolinio.

Double batch

Il refuelling avviene in corrispondenza del picco del Gd, quindi nel reattore si trovano una metà di combustibile (quello fresco) con **reattività crescente** e l'altra metà con **reattività decrescente**. Il risultato complessivo è una **curva di reattività piatta** che non presenta problematiche, per cui è sufficiente l'utilizzo di una **disposizione omogenea** delle barre con gadolinio

Implicazioni dell'utilizzo di MOX



Indurimento dello spettro neutronico

Un effetto di indurimento dello spettro dei neutroni dovuto all'introduzione di plutonio si nota nella diminuzione del valore massimo di neutroni nella regione termica, nonché in un leggero spostamento verso valori energetici più elevati.

Loading pattern nel caso di utilizzo di combustibile MOX

Indurimento dello spettro neutronico. Indurimento dello spettro neutronico. Indurimento dello spettro neutronico. Indurimento dello spettro neutronico.

Modifiche nei coefficienti del combustibile

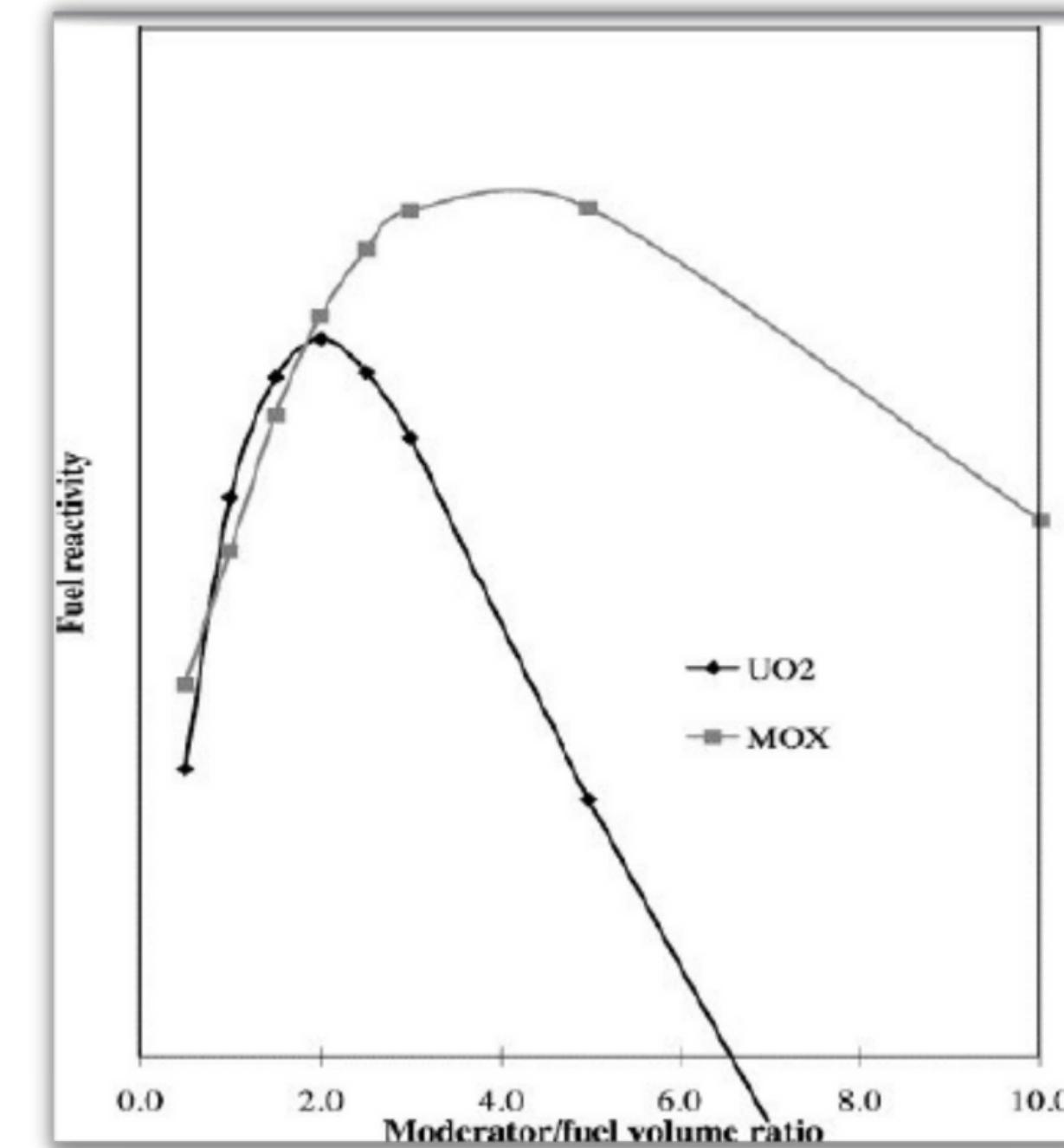
Indurimento dello spettro neutronico. Indurimento dello spettro neutronico. Indurimento dello spettro neutronico. Indurimento dello spettro neutronico.

Implicazioni dell'utilizzo di MOX

Perché indurimento dello spettro?

Indurimento dello spettro neutronico

Un effetto di indurimento dello spettro dei neutroni dovuto all'introduzione di plutonio si nota nella diminuzione del valore massimo di neutroni nella regione termica, nonché in un leggero spostamento verso valori energetici più elevati. Nella curva **reattività e mod-to-fuel ratio** questo si traduce in una curva spostata più verso destra, **per cui serve più moderatore per collocarci nel punto di picco.**



Implicazioni dell'utilizzo di MOX

Perché indurimento dello spettro?

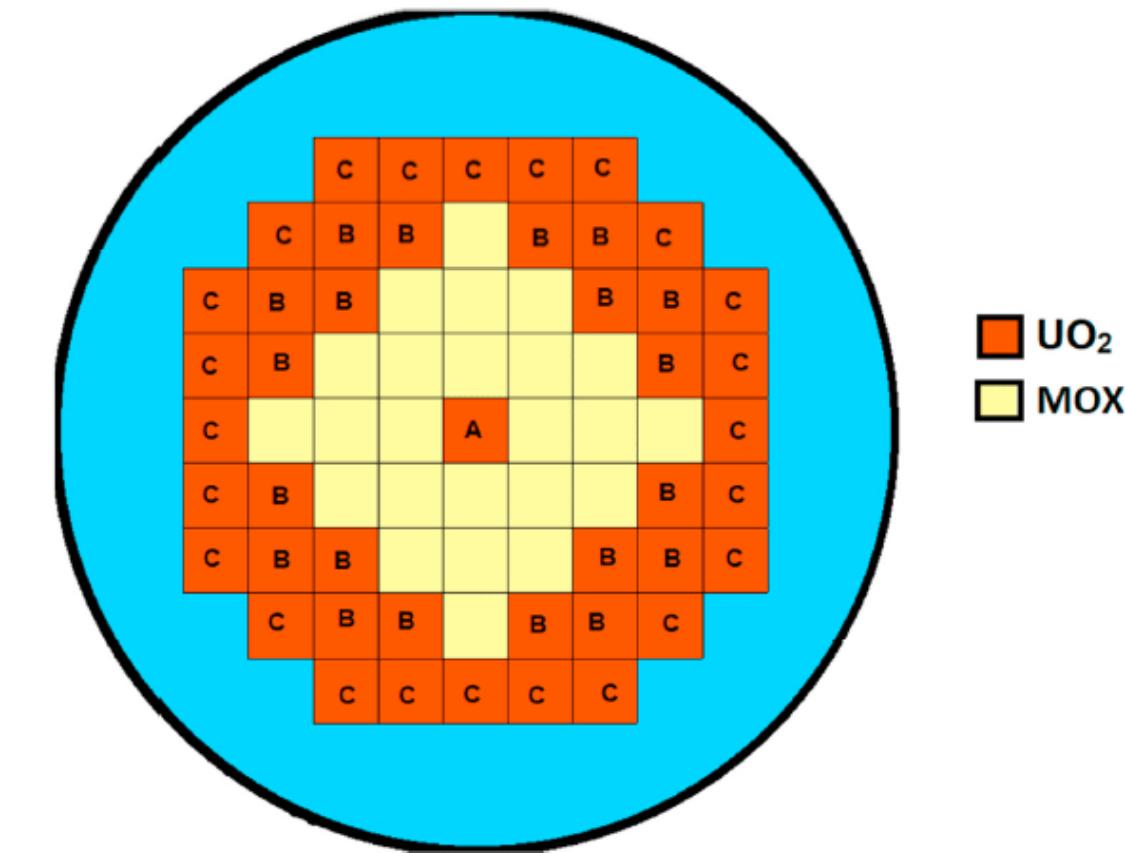
	U ²³⁵	Pu ²³⁹	Pu ²⁴¹	range
<i>Instantaneous Energy</i>				
- Kinetic Energy of fission products	169 (83%)	175	177	very short
- prompt γ -ray energy	8 (4%)	8	8	long
- Kinetic Energy of neutrons	5 (2%)	6	6	medium
	182 (89%)	189	191	
<i>Delayed Energy</i>				
- β from fission products decay	8 (4%)	8	9	short
- γ from fission products decay	7 (3%)	6	7	long
- γ from neutron capture	7 (3%)	10	10	long
	22 (11%)	24	26	
Total	204 (100%)	213	217	
	22 (11%)			long
	182 (89%)			short-medium

Implicazioni dell'utilizzo di MOX

Perché quel loading pattern?

Loading pattern nel caso di MOX

La scelta del posizionamento di **assembly con combustibile MOX** all'interno del reattore richiede di prendere in considerazione diverse possibili soluzioni. Il vincolo che ci permette di scegliere una determinata tipologia di disposizione potrebbe essere, ad esempio, la **non-alterazione del picco radiale di potenza** rispetto al caso base. In letteratura, viene adottato questo vincolo e selezionata questa particolare disposizione. Il nostro obiettivo potrebbe essere di verificare tale risultato.



Implicazioni dell'utilizzo di MOX

Come si modificano i coefficienti del combustibile?

Modifiche dei coefficienti del combustibile

L'inserimento di MOX ha un effetto sui coefficienti caratteristici del combustibile che va accuratamente analizzato. Non si sono trovate in letteratura delle indicazioni univoche in merito, tuttavia è ragionevole pensare che, a pari geometria del reattore, poiché **l'effetto del moderatore è "meno efficace" sui neutroni prodotti dalla fissione del plutonio** anche il coefficiente di temperatura del moderatore (MTC) diventi in modulo più grande. In merito al combustibile si evidenzia più o meno lo stesso andamento, con variazioni in modulo meno pronunciate. Questo tipo di fenomeno andrebbe studiato più approfonditamente attraverso varie simulazioni in vari momenti di vita del reattore.

Table 11
Moderator temperature coefficients and full coolant void coefficients for proposed core compositions.

Cases	MTC (pcm/K)					
	Mono ThPu	Mono UPu	Multi UPu	Multi ThUPu	Multi ThU2	UO ₂
Temperature (K)						
300-400	-6.56	-6.97	-6.72	-6.38	-4.29	-4.93
400-500	-14.72	-14.43	-14.53	-14.33	-9.57	-11.15
500-600	-36.13	-35.84	-34.99	-35.17	-25.54	-28.83
Full coolant void coefficients						
pcm	-62	-52	-37	-57	-37	-80
200	942	778	429	778	200	
\$	-99.0	-84.0	-90.1	-90.1	-90.1	-112.5

Table 12
Fuel temperature coefficients (FTCs) for proposed fuel compositions.

Case	FTC (pcm/K)					
	Mono ThPu	Mono UPu	Multi UPu	Multi ThUPu	Multi ThU2	Full-UO2
Temperature (K)						
300-600	-3.04	-2.75	-2.74	-3.22	-3.21	-2.36
600-500	-2.30	-2.12	-1.98	-2.45	-2.45	-1.79
900-1200	-1.79	-1.65	-1.63	-1.90	-1.92	-1.58
1200-1500	-1.74	-1.56	-1.63	-1.78	-1.76	-1.40
1500-1800	-1.59	-1.53	-1.36	-1.64	-1.57	-1.30