

□ Aspetti fisico-matematici del funzionamento dei Reattori di IV generazione a combustione *completa* dell'uranio.

Paolo Allievi

*Seminario Ordine degli Ingegneri della provincia di Roma
Roma 13 febbraio 2025*

- ❑ **Scopo** di tale studio è quello di individuare le caratteristiche (fisiche e geometriche) di un reattore nucleare **veloce al plutonio** che, oltre a generare energia elettrica, permetta di produrre, al minimo, un **kg di plutonio fissile per ogni kg di plutonio bruciato**.
- ❑ Ciò permetterebbe di convertire tutto l'uranio 238, presente in natura, in plutonio fissile avendo così una disponibilità di combustibile nucleare dell'ordine di **100** volte superiore a quella oggi esistente bruciando solo tutto l'uranio 235 (ed il parziale plutonio prodotto).

- ❑ **Si trova** che:
 - ❑ Con **reattori veloci al plutonio** di oggi (fattore di conversione minore di 1), si può proseguire l'esercizio di tutti i reattori termici/veloci per altri **120 anni** dopo di che si esauriscono i fissili (U_{235} e Pu_{239}) del ciclo dell'uranio (qui non si prende in considerazione il ciclo del Torio).
 - ❑ Il fattore di conversione dei reattori al plutonio, oggi **$f_c = 0,67$** con $\sigma_{c,U238} = \mathbf{0,3\ barn}$, può diventare maggiore di **1** se nel mantello i neutroni vengono rallentati fino ad energie di $0,01 \div 0,025\ MeV$ per le quali $\sigma_{c,U238}$ diviene circa **$0,53\ barn$** .
-

- ❑ Con reattori veloci al plutonio di nuova concezione (fattore di conversione maggiore di 1), si può proseguire l'esercizio di tutti i reattori termici/veloci per altre migliaia di anni dopo di che si esauriscono i fissili (U_{235} e Pu_{239}) del ciclo dell'uranio (qui non si prende in considerazione il ciclo del Torio)

❑ 1. Introduzione

- ❑ Fino ad oggi, nell'ambito della produzione di energia elettrica da fonte nucleare, sono stati ampiamente adottati **Reattori termici** con uranio arricchito a circa il **3%**.
- ❑ Tale tecnologia ha preso piede in quanto, tra l'altro, in natura c'è un'ampia disponibilità di uranio naturale (Riserve stimate oltre **10 Mton** (di cui ~50.000 ton U235 utilizzabile)) e con un modesto arricchimento del **3%** (circa **7 kgUnat/kgU3%**) si arriva a potenze sviluppabili notevoli (1 kgU3% equivale in termini energetici a circa **50.000 kg** di combustibile fossile).
- ❑ Tali reattori producono anche, come sottoprodotto, modeste quantità di plutonio (**0.2 kgPu/kgU235**)

- ❑ Ben maggiori quantità di Plutonio vengono generati, come sottoprodotto, nei **Reattori veloci** (cioè senza moderatore di neutroni di fissione) impiegando uranio **U235** arricchito a circa il **20%**.
- ❑ Infatti in questi reattori (nei quali il forte arricchimento dell'Uranio è dovuto dalla necessità di avere un alto flusso neutronico per compensare la ridotta sezione d'urto di fissione) c'è una maggiore cattura di neutroni da parte dell'Uranio **U238** e quindi una maggiore produzione di Plutonio (circa **1kgPu/1kgU235**).
- ❑ Tali reattori hanno avuto diffusione, soprattutto in ex URSS, in quanto il plutonio prodotto veniva, in quota parte, utilizzato nelle testate nucleari.

- ❑ Nei **reattori termici al plutonio** si produce circa **0,14 kg** di plutonio fissile per ogni kg di plutonio bruciato mentre nei **reattori veloci al plutonio** si produce circa **0,7 kg** di plutonio fissile per ogni kg di plutonio bruciato: ciò indica chiaramente che il riutilizzo del plutonio fissile prodotto nei reattori ad U235 è più conveniente nei reattori veloci al plutonio.
 - ❑ Il presente documento ha come obiettivo l'individuazione di quelle caratteristiche (fisiche e geometriche) di un **reattore veloce al plutonio** che permetta di produrre, al minimo, un **kg di plutonio fissile per ogni kg di plutonio bruciato**.
-

- ❑ Ciò permetterebbe di convertire tutto l'uranio **238**, presente in natura, in plutonio fissile avendo così una disponibilità di combustibile nucleare dell'ordine di **100** volte superiore a quella oggi esistente bruciando solo tutto l'uranio 235 (ed il parziale plutonio prodotto) e potendo così proseguire l'esercizio di tutti i reattori termici/veloci per altre migliaia di anni.
 - ❑ Questo costituirebbe un altro filone di reattori (**autofertilizzanti**) di IV generazione che si affiancherebbe a quelli in studio miranti ad avere una maggiore **sicurezza e/o efficienza**.
-

❑ 2. Fattore di conversione k_c di un reattore nucleare

- ❑ Il fattore di conversione si intende il rapporto tra la quantità di plutonio prodotto e la quantità di combustibile fissile bruciato (U235 o Pu239)
- ❑ Per giungere alla determinazione del predetto rapporto valgono le considerazioni riportate qui di seguito.
- ❑ La quantità di **fissile bruciato** è proporzionale alle reazioni di fissione per unità di volume e di tempo R_f :

$$R_f = \Phi \Sigma_f = \Phi N_f \sigma_f \propto E^0 \sigma_f$$

❑ (2.1)

- La quantità di **plutonio prodotto** è proporzionale alle reazioni di cattura dell'U238 per unità di volume e di tempo R_c :

- $$R_c = \Phi \Sigma_c = \Phi N_c \sigma_c \propto (100 - E\%) \sigma_c$$
- (2.2)

- dove Φ è il flusso neutronico, Σ_c la sezione d'urto di cattura macroscopica dell'U238, N_c gli atomi di U238 per unità di volume, σ_c la sezione d'urto di cattura dell'U238 ed $E\%$ l'arricchimento percentuale.

□ Pertanto il fattore di conversione è uguale a:

$$\square f_c = \frac{R_c}{R_f} = \frac{100 - E\%}{E\%} \cdot \frac{\sigma_c}{\sigma_f}$$

□ (2.3)

□ Qui di seguito viene riportata la Tabella 1 nella quale, a fronte del tipo di reattore (termico o veloce) e del fissile bruciato (U235 o Pu239), si determina il valore del fattore di conversione **fc**.

Reattore	fissile	E%	σ_f (barn)	$\sigma_{c,U238}$ (barn)	f_c
termico	U_{235}	3	507	2,7	0,17
	Pu_{239}	3	700	2,7	0,12
veloce	U_{235}	20	1,2	0,3	1,00
	Pu_{239}	20	1,8	0,3	0,67

Tabella 1 – Fattore di conversione f_c 

Dalla Tabella 1 si evince che **un reattore veloce** che utilizza come combustibile di carica U_{235} , produce una quantità di plutonio pari a quella bruciata (**$f_c=1$**). Tuttavia in questo caso si consumerebbe tutto e solo l'uranio 235 che è presente nell'uranio naturale e cioè il 7 per mille, di cui il 2 per mille non utilizzabile in quanto presente nelle code dell'arricchimento ed il restante 5 per mille bruciabile totalmente utilizzando anche il **riprocessamento**.

- ❑ Osservando la Tabella 2, tutto il **plutonio** prodotto e bruciato (**fc = 0,67**) può arrivare al massimo al **15** per mille: il fissile totale consumato (**7** per mille di U235 e **15** per mille di Pu239) risulta quindi pari al **22** per mille di **uranio naturale** .
 - ❑ Ciò evidenzia che rimarrebbe inutilizzato il 978 per mille di **uranio naturale** (U238)
-

Uranio naturale: 1000 atomi						
fc	U235	U238	U235	U238	Pu239	Pu239
			bruciato	rimasto	prodotto (= bruciato-fc)	bruciato
1	7	993	5	988	5	
0,67				984,7	3,4	5,0
0,67				982,4	2,2	3,4
0,67				980,9	1,5	2,2
0,67				979,9	1,0	1,5
0,67				979,2	0,7	1,0
0,67				978,8	0,5	0,7
0,67				978,5	0,3	0,5
0,67				978,3	0,2	0,3
0,67				978,1	0,1	0,2
0,67				978,0	0,1	0,1
totale	7			978		15

Tabella 2 – Percentuale (in per mille) di plutonio prodotto in un reattore veloce

- ❑ Per contro con il **reattore veloce al plutonio** si potrebbe utilizzare tutto l'Uranio naturale, peraltro con fattore di conversione portato dall'attuale **0,67** ad **1** ed oltre, mediante opportune configurazioni impiantistiche e scelte di materiali comportanti, come verrà esplicitato nel paragrafo successivo, il raggiungimento di una sezione d'urto di cattura dell'U238 maggiore di **0,3 barn**.
-

- ❑ **3. Ricerca di un fattore di conversione k_c maggiore od uguale a 1**
- ❑ Dalla formula (2.3) di cui al paragrafo precedente, si può aumentare il fattore di conversione, a parità dei parametri legati al core del reattore ($E\%$, σ_f), aumentando il σ_c dell'U238.
- ❑ Ciò può essere reso possibile mediante un'opportuna configurazione del reattore, consistente nel disporre U238 intorno al core, che permetta un rallentamento dei neutroni fino ad un range di energia 0,01- 0,025 MeV tale da, come riportato in Tabella 3, comportare una σ_c dell'U238 di circa **0,5 barn**

Isotopo	Energia neutroni	sezione d'urto di cattura σ_c	
		neutroni	veloci
	MeV		barn
$_{92}\text{U}^{238}$	valore medio		0,3
	1,4 - ∞		0,05
	0,7 - 1,4		0,1
	0,4 - 0,7		0,144
	0,2 - 0,4		0,18
	0,1 - 0,2		0,237
	0,05 - 0,1		0,3
	0,025 - 0,05		0,42
	0,01 - 0,025		0,53
	0,0 - 0,01		1
	valore medio		0,3

□ Tabella 3 – Sezione d'urto di cattura dell'U238 in funzione dell'energia dei neutroni

- Infatti sostituendo nella (2.3) il nuovo valore di σ_c dell'U238 (circa **0,5 barn**) si ottiene:

□
$$f_c = \frac{R_c}{R_f} = \frac{100 - E\%}{E\%} \cdot \frac{\sigma_c}{\sigma_f} = 1,1$$

□ (3.1)

❑ 4. Fissile utilizzabile nei Reattori nucleari termici/veloci nel mondo.

- ❑ La potenza elettrica nucleare nel mondo assomma, ad oggi (2008), a circa 360.000 MW. Tale valore è quello che si è accumulato in circa **40** anni di esercizio ad un tasso quindi di crescita di circa **2,5%** all'anno.
- ❑ Ipotizzando una vita media d'impianto di circa 40 anni, tale tasso del 2,5% va a coprire il rateo di dismissione dei primi vecchi impianti nucleari mantenendo così costante la potenza elettrica nucleare erogata.
- ❑ Ammettendo un tasso annuo di crescita del PIL di circa il **3%** rimane circa lo **0,5%** di crescita della potenza elettrica nucleare: prudenzialmente, nelle calcolazioni effettuate (Allegato 1), viene scelto un valore di **0,4%**

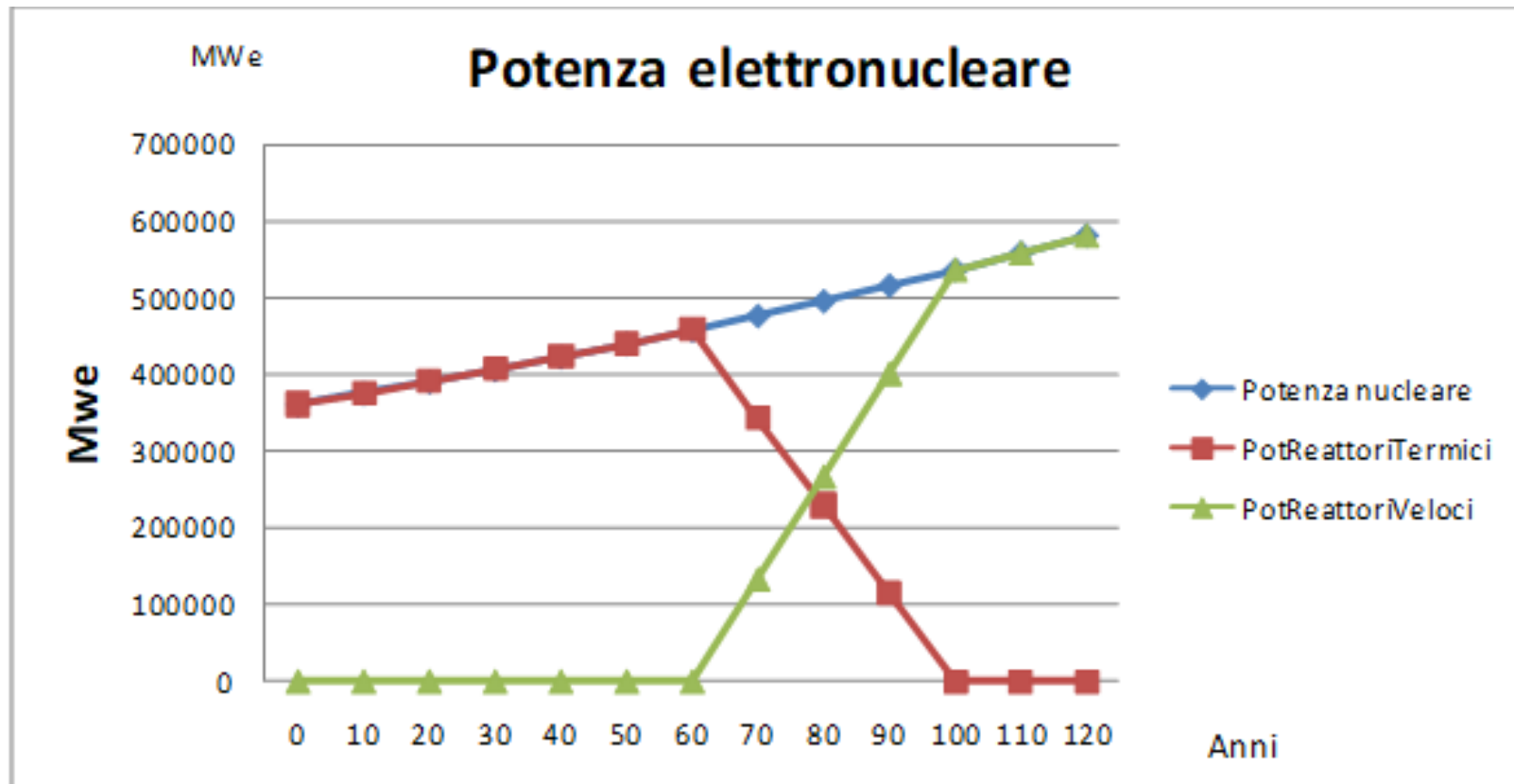


Figura1 – Potenza elettronucleare mondiale erogata e relativa copertura mediante reattori termici e/o veloci.

- ❑ Nella Figura 1 viene riportata (in **blu**) la richiesta di **potenza elettronucleare nel mondo** per il prossimo secolo e la ripartizione di copertura della medesima tra **reattori termici (in rosso)** e **veloci (in verde)**.
- ❑ In tale ripartizione si è ipotizzato che i primi reattori veloci saranno commercializzati non prima dei prossimi **60** anni, dopo aver sviluppato la ricerca, la sperimentazione tramite prototipi e prove dei medesimi.
- ❑ Analizzando la Figura 1 si evince che se la copertura elettronucleare fosse tutta con reattori termici non si avrebbe più **uranio 235** tra circa **80 anni**.
- ❑ Pertanto i nuovi reattori termici ad uranio, costruiti tra i 60 e gli 80 anni, non sarebbero più commercialmente sostenibili poiché **non avrebbero il ritorno completo degli investimenti** in quanto funzionanti per periodi molto inferiori alla loro vita.

- ❑ Con lo scenario di potenza elettronucleare riportato in Figura 1, secondo quanto calcolato in **Allegato1 e 2** per due casi riferiti alla tecnologia di oggi ed a quella di un prossimo futuro, avremmo:
- ❑ **a)** un consumo mondiale di fissile, come riportato in Figura 2 (fattori di conversione, oggi conseguibili, uguali a **1** per l'**U235** ed a **0,67** per il **Pu**), che si esaurisce nei prossimi **120 anni**.
- ❑ **b)** un consumo mondiale di fissile, come riportato in Figura 3 (fattori di conversione, forse conseguibili, dopo intensa ricerca, in un prossimo futuro, uguali a **1** per l'**U235** ed a **1** per il **Pu**), che prosegue per i prossimi **secoli**.

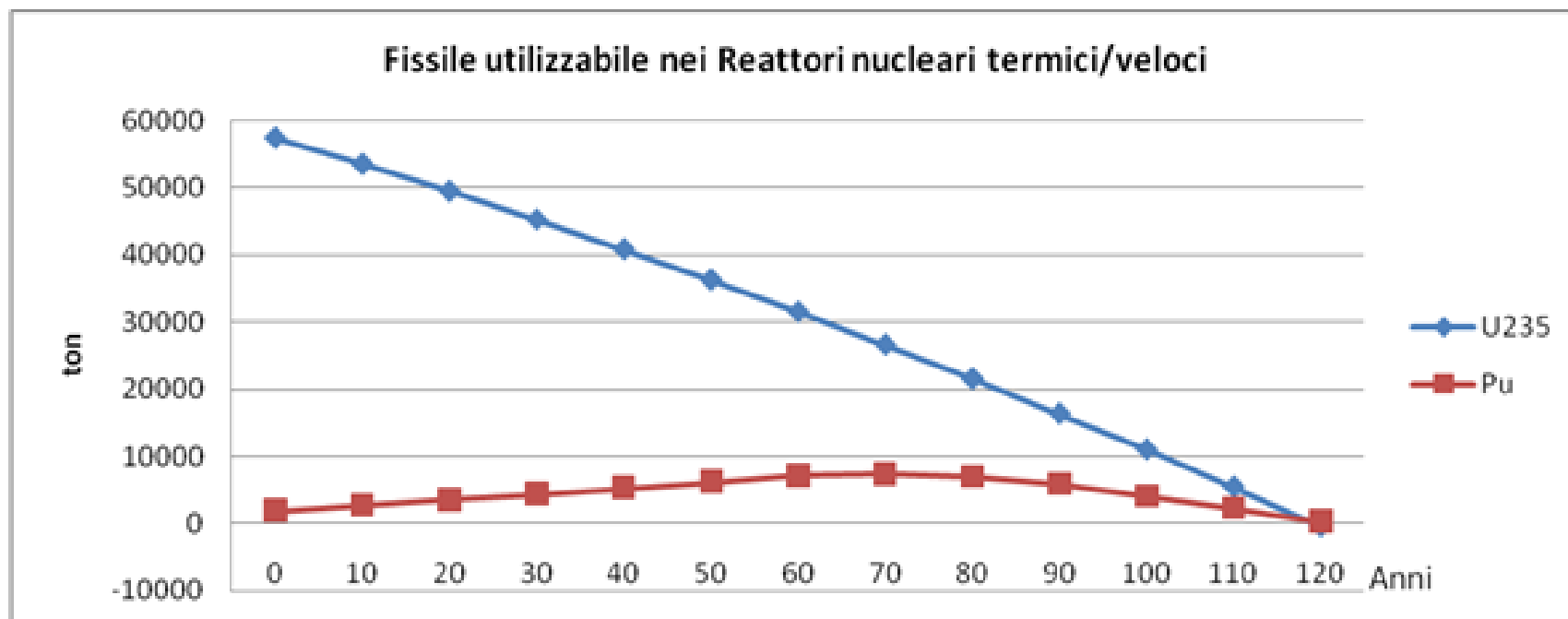
U235: $fc=1$; Pu239: $fc=0,67$ 

Figura 2 – Fissile (**U235** e **Pu**) utilizzabile nei reattori nucleari termici e veloci con fattori di conversione uguali a **1** per l'**U235** ed a **0,67** per il **Pu**.

U235: $fc=1$; Pu239: $fc=1$

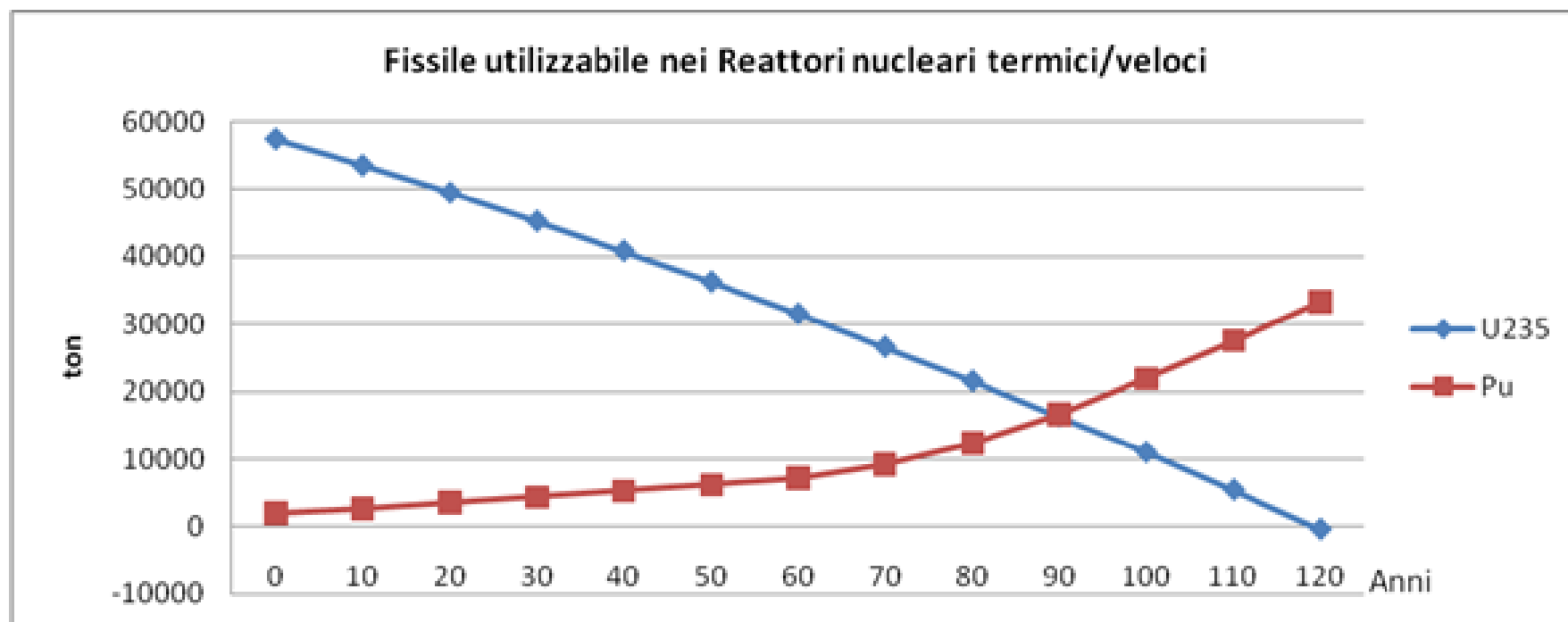


Figura 3 – Fissile (**U235** e **Pu**) utilizzabile nei reattori nucleari termici e veloci con fattori di conversione uguali a **1** per l'**U235** ed a **1** per il **Pu**.

- ❑ A convalida di quanto detto al punto **a)**, avendo presente la Tabella 2 dove a fronte di un consumo di **1 parte** di **U235** (7 per mille) si producono e bruciano circa **2 parti** di **Pu239** (15 per mille), dovremmo avere un esaurimento di fissile entro i prossimi $60 \times (1+2) = \mathbf{180 \text{ anni}}$, in caso di potenza elettronucleare erogata costante ed uguale a 360.000 MW.
- ❑ Poiché invece in 60 anni tale potenza aumenta di circa 1,5 volte allora l'esaurimento di fissile avviene entro i prossimi $180/1,5 = \mathbf{120 \text{ anni}}$

❑ 5. Conclusione

- ❑ 1. Con reattori veloci al plutonio di oggi (fattore di conversione **minore di 1**), si può proseguire l'esercizio di tutti i reattori termici/veloci per altri **120 anni** dopo di che si esauriscono i **fissili** (U235 e Pu239) del ciclo dell'uranio (qui non si prende in considerazione il ciclo del Torio).
 - ❑ 2. Il fattore di conversione dei reattori al plutonio, oggi $fc = 0,67$ con $\sigma_{c,U238} = 0,3$ barn, può diventare **maggiore di 1** se nel mantello i neutroni vengono rallentati fino ad energie di **0,01 ÷ 0,025 MeV** per le quali **$\sigma_{c,U238}$** diviene circa **0,53 barn**.
 - ❑ 3. Con reattori veloci al plutonio di nuova concezione (fattore di conversione **maggiore di 1**), si può proseguire l'esercizio di tutti i reattori termici/veloci per altre **migliaia di anni** dopo di che si esauriscono i **fissili** (U235 e Pu239) del ciclo dell'uranio (qui non si prende in considerazione il ciclo del Torio).
-