

# Basic\_of\_ADSR

November 18, 2025

## 0.0.1 Capitolo 1: Introduction

Questo capitolo introduce il concetto di **Accelerator Driven Subcritical Reactors (ADSR)**, noti anche come sistemi ibridi. Lo scopo principale è duplice: 1. **Produzione di Energia:** Sfruttare la fissione in un sistema intrinsecamente sicuro. 2. **Trasmutazione delle Scorie:** Incenerire attinidi (Pu, MA) e prodotti di fissione (LLFP).

Viene sottolineato che l'interesse per questi sistemi è guidato dalla ricerca di una produzione di energia nucleare più pulita e sicura. Si evidenzia che la **migliore economia neutronica** dei sistemi sottocritici facilita l'implementazione di cicli di combustibile alternativi, come il ciclo del **Torio-Uranio** ( $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{U}$ ), che produce intrinsecamente meno scorie transuraniche a lunga vita.

---

## 0.0.2 Capitolo 2: Energy and waste production...

Questo capitolo analizza lo stato dell'arte e i problemi che gli ADSR mirano a risolvere.

- **2.1 Standard Reactors (PWR):** Analizza l'inventario delle scorie prodotte dai reattori standard (PWR). Il problema principale è la **radiotossicità a lungo termine** (fino a 25.000 anni per il  $^{239}\text{Pu}$ ) di Plutonio e Attinidi Minori (Np, Am, Cm) . Si discute l'inadeguatezza dello stoccaggio geologico profondo (es. Yucca Mountain) se la produzione di energia nucleare dovesse aumentare significativamente .
- **2.2 Breeding Reactors:** I reattori autofertilizzanti (Breeder) risolvono il problema delle *risorse* (utilizzando  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ ) e riducono la radiotossicità a lungo termine, poiché il Pu è un combustibile e non una scoria. Tuttavia, il capitolo evidenzia i fallimenti tecnici, economici e di sicurezza dei reattori veloci al Sodio (LMFBR) come Super Phenix .
- **Conclusione:** Gli ADSR sono presentati come un'alternativa credibile ai LMFBR per implementare il *breeding* (specialmente col Torio) in modo sicuro .

---

## 0.1 Capitolo 3 (Principles of reactor operation)

Questo capitolo è il nucleo teorico del paper. Costruisce il modello neutronico partendo dai principi primi della reazione a catena fino alle implicazioni di sicurezza.

### 0.1.1 3.1 Reazione a Catena

Questa sezione definisce i parametri fondamentali della moltiplicazione.

- **Moltiplicazione Infinita ( $k_\infty$ ):** È il rapporto tra i neutroni prodotti in una generazione e quelli assorbiti nella generazione precedente, in un mezzo *infinito* e omogeneo. È una proprietà intrinseca del materiale.

La formula generale (Eq. 2) è:

$$k_\infty = \langle v \rangle \frac{\iint \Sigma_f(E, \mathbf{r}) \phi(E, \mathbf{r}) dE d^3r}{\iint \Sigma_a(E, \mathbf{r}) \phi(E, \mathbf{r}) dE d^3r}$$

Dove  $v$  è il numero medio di neutroni per fissione,  $\Sigma_f$  e  $\Sigma_a$  sono le sezioni d'urto macroscopiche di fissione e assorbimento, e  $\phi$  è il flusso neutronico.

- **Parametro  $\eta$ :** Per un singolo nuclide fissile,  $\eta$  è il numero di neutroni prodotti per *neutrone assorbito* (non solo per fissione). È un parametro cruciale per il bilancio neutronico.

$$\eta = v \frac{\sigma_f}{\sigma_a} = v \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_c}$$

Usando  $\eta$ ,  $k_\infty$  per un sistema semplice (fissile, fertile, assorbitore) diventa (Eq. 4):

$$k_\infty = \eta \frac{\Sigma_a^{(fis)}}{\Sigma_a^{(fis)} + \Sigma_a^{(fert)} + \Sigma_a^{(abs)}}$$

### 0.1.2 3.1.2 Importanza Neutronica

Questa sezione è fondamentale per capire i sistemi guidati da sorgente ed è cruciale per il tuo lavoro su “k”. Introduce la differenza tra autovalore ( $k_{eff}$ ) e moltiplicazione della sorgente ( $k_s$ ).

- **$k_{eff}$  (Fattore di Moltiplicazione Effettivo):** È l'autovalore fondamentale del sistema. In un sistema finito,  $k_{eff} < k_\infty$  a causa delle fughe (leakage).

N.B. : non ha senso definire la formula a 4 o 6 fattori qui, perchè stiamo già considerando l'interità dello spettro neutronico mediante l'integrale. al massimo ha senso considerare i fattori di fuga fast e slow e l'assorbimento dei materiali interposti

$$k_{eff} = \eta \frac{\Sigma_a^{(fis)}}{\Sigma_a^{(fis)} + \Sigma_a^{(fert)} + \Sigma_a^{(abs)}} \cdot p \cdot (1 - l_F) \cdot (1 - l_S)$$

con “p” probabilità di cattura nei moderatori o materiali interposti,  $l_F$  e  $l_S$  leak of fast and slow neutron

- **$k_s$  (Source Multiplication Factor):** È un fattore di moltiplicazione che dipende dalla **posizione e dall'energia** del neutrone della sorgente iniziale.
- **Importanza (Flusso Aggiunto  $\phi^\dagger$ ):** L'importanza di un neutrone è la sua capacità di contribuire alla popolazione neutronica totale (la “progenie”). Il paper la definisce (Eq. 6) come:

$$\phi^\dagger(r, E) = \frac{k_s(r, E)}{1 - k_s(r, E)}$$

- **Distinzione Chiave:** In un sistema sottocritico,  $k_s$  (la moltiplicazione della prima generazione) può essere molto diversa da  $k_{eff}$  (il valore asintotico). La Figura 1 lo dimostra:  $k_s$  (il  $K_i$  iniziale) è molto alto ( $K_1 \approx 2.1$ ) perché i neutroni della sorgente sono in una regione ad alta importanza, ma  $K_i$  converge rapidamente al  $k_{eff}$  del sistema (0.95) dopo poche generazioni, quando il flusso si è distribuito nel modo fondamentale.

### 0.1.3 3.2 Sistemi Sottocritici

Questa sezione applica i concetti di  $k$  a un sistema guidato da acceleratore.

- **3.2.1 La Sorgente:** La sorgente (es. spallazione) produce  $N_0$  neutroni primari. Il sistema li moltiplica. Il numero *totale* di neutroni (primari + secondari) è:

$$N_{tot} = \frac{N_0}{1 - k}$$

Il numero di neutroni *secondari* (generati da fissione) è:

$$N_{sec} = N_{tot} - N_0 = \frac{kN_0}{1 - k}$$

- **3.2.2 Guadagno Energetico (G):**

1. Il numero di fissioni secondarie è:

$$N_F = \frac{kN_0}{v(1 - k)}$$

2. L'energia termica prodotta è:

$$E_{th} = N_F \cdot E_{\text{fission}}, \quad E_{\text{fission}} \approx 200 \text{ MeV}$$

3. Il guadagno energetico  $G$  è:

$$G = \frac{E_{th}}{E_p} = \frac{(E_{\text{fission}}/v) \cdot kN_0/(1 - k)}{E_p} = \left( \frac{E_{\text{fission}} \cdot N_0}{v \cdot E_p} \right) \frac{k}{1 - k}$$

4. Questo viene semplificato (Eq. 12) in:

$$G = \frac{G_0 k}{1 - k}$$

dove  $G_0$  è il “guadagno della sorgente” (costante per un dato target/energia).

### 0.1.4 3.3 Evoluzione del Combustibile (Feedback a Lungo Termine)

Questa sezione analizza come  $k$  cambia nel tempo a causa del “burnup”.

- **3.3.1 Equazioni di Evoluzione:** La dinamica del sistema è governata dalle **equazioni di Bateman** (Eq. 22):

$$\frac{dn_i(t)}{dt} = \sum_{j \neq i} (\sigma_{j \rightarrow i} \phi + \lambda_{j \rightarrow i}) n_j - (\sigma_{i, tot} \phi + \lambda_{i, tot}) n_i$$

- **3.3.2 Combustibili Liquidi:** In un sistema ideale a combustibile liquido (es. sali fusi), i prodotti di fissione (veleni) vengono estratti. Il sistema raggiunge un equilibrio stabile (Eq. 32) dove la produzione di fissile bilancia il consumo:

$$\frac{n_{fis}^{(equ)}}{n_{cap}} = \frac{\sigma_{cap}^{(a)}}{\sigma_{fis}^{(a)}}$$

- **3.3.3 Combustibili Solidi:** Questa è la sfida principale per un  $k$  stabile. Il valore di  $k(t)$  (Eq. 30) evolve in base a un bilancio complesso:
  1. **Aumento di  $k$ :** Breeding di nuovo combustibile (es.  $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{U}$ ).
  2. **Diminuzione di  $k$ :** Consumo del combustibile fissile e accumulo di prodotti di fissione (veleni).

**Risultato chiave:** La stabilità di questo bilancio dipende dallo spettro. Un **sistema veloce (ciclo Th-U)** può raggiungere una stabilità eccellente (un  $k$  quasi piatto per 5 anni). Un **sistema termico** è intrinsecamente instabile (forte variazione di  $k$  in meno di 1 anno).

### 0.1.5 3.4 Escursioni di Reattività (Feedback a Breve Termine)

Questa è la sezione più critica per il tuo studio sui feedback e sulla determinazione del “miglior K” operativo.

- **3.4.1 Effetto Protattinio (Ciclo Th-U):**
  - La catena:
 
$$^{232}\text{Th} + n \rightarrow ^{233}\text{Th} \xrightarrow{\beta^-} ^{233}\text{Pa} \xrightarrow{\beta^- (27d)} ^{233}\text{U}$$
  - **Problema:**  $^{233}\text{Pa}$  è un veleno neutronico (abbassa  $k$  durante l’operazione).  $^{233}\text{U}$  è fissile (aumenta  $k$ ).
  - **Feedback:** Dopo uno spegnimento (shutdown), il  $^{233}\text{Pa}$  accumulato (che non viene più distrutto dalla cattura neutronica) decade in  $^{233}\text{U}$ , causando un **inserimento positivo di reattività**.
  - L’ampiezza di questo  $\Delta k$  (Eq. 42) è proporzionale alla densità di fissione  $v_c$  (e quindi al flusso  $\phi$ ).
  - **Implicazione:** Questo effetto è **10 volte più severo nei reattori termici** rispetto ai veloci. Limita il flusso operativo massimo e il  $k$  nominale per garantire che  $k + \Delta k_{\text{Pa}}$  rimanga  $< 1$ .
- **3.4.2 Effetto Xenon:**
  - Avvelenamento da  $^{135}\text{Xe}$  (picco dopo lo spegnimento).
  - È un problema enorme per i reattori termici (vedi Fig. 8).
  - È trascurabile nei reattori veloci.
- **3.4.3 Effetto Temperatura:** Il coefficiente di reattività di temperatura ( $\alpha_T = \Delta k / \Delta T$ ) è il meccanismo di feedback più critico per la sicurezza passiva di un reattore. Descrive come la reattività ( $k$ ) del nocciolo cambia istantaneamente quando la sua temperatura ( $T$ ) varia. Per garantire la stabilità intrinseca (cioè per evitare un incidente come quello di Chernobyl) Questo coefficiente deve essere negativo. Se  $\Delta T > 0$  (il reattore si surriscalda), deve seguire che  $\Delta k < 0$  (la reazione a catena si “spegne” da sola). Il paper specifica che i reattori critici, per ragioni di sicurezza, sono progettati per avere un  $\alpha_T$  negativo.

### 0.1.6 3.5 Sicurezza

Questa sezione riassume il vantaggio fondamentale della subcriticalità.

- **Reattore Critico:** Un’inserzione di reattività  $\rho > \beta$  (frazione di neutroni ritardati) causa una **divergenza esponenziale** della potenza (incidente di criticità).

La potenza cresce come (Eq. 44):

$$W(t) \propto \exp\left(\frac{\rho_{\text{prompt}}}{\tau_n} t\right)$$

Dove  $\tau_n$  (vita media neutronica) è brevissimo ( $\approx 3 \times 10^{-8}$ s in un reattore veloce a piombo), portando a un'esplosione di potenza.

- **Reattore Sottocritico:** Un'inserzione di reattività  $\Delta k$  (anche se rapida) non può causare divergenza.
    - Esempio: Sistema a  $k = 0.98$ . Inserzione di  $\Delta k = +0.004$ .
    - Il guadagno energetico  $G \propto 1/(1 - k)$ .
    - Guadagno iniziale:  $G_i \propto 1/(1 - 0.98) = 50$ .
    - Guadagno finale:  $G_f \propto 1/(1 - (0.98 + 0.004)) = 1/(1 - 0.984) \approx 62.5$ .
    - Il risultato è un **aumento finito (25%)** della potenza, non un'escursione esponenziale. La Figura 9 illustra graficamente questa stabilità intrinseca.
- 

#### 0.1.7 Capitolo 4: Incenerimento delle Scorie Nucleari

Questo capitolo analizza l'applicazione principale degli ADSR: la gestione delle scorie ad alta attività. Il problema delle scorie (Cap. 2) è la radiotossicità a lungo termine degli **Attinidi Transuranici (TRU)**.

**4.1 Considerazioni Generali** Vengono definiti due processi fondamentali per la riduzione delle scorie: 1. **Trasmutazione:** Un nucleo radioattivo (come un Prodotto di Fissione a Lunga Vita, LLFP) cattura un neutrone e si trasforma in un isotopo stabile o a vita breve. 2. **Incenerimento:** Un attinide (come Pu, Np, Am) cattura un neutrone e subisce la **fissione**, distruggendo il nucleo e rilasciando energia.

Il Plutonio è un caso ibrido: è una scoria nei reattori PWR, ma un combustibile nei reattori veloci (breeder).

#### 4.2 Incenerimento con Reattori Sottocritici 4.2.1 Il Ciclo Torio-Uranio

L'eccellente economia neutronica degli ADSR (dovuta ai neutroni di spallazione) rende praticabile l'uso del ciclo **Torio-Uranio** ( $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{U}$ ).

- **Vantaggio:** Questo ciclo produce intrinsecamente molti meno Attinidi Minori (Np, Am, Cm) rispetto al ciclo U-Pu.
- **Risultato (Figura 10):** L'implementazione del ciclo Th-U in un ADSR riduce la radiotossicità totale delle scorie di **due ordini di grandezza** rispetto al ciclo U-Pu standard, specialmente nel periodo critico tra 100 e 100.000 anni.

#### 4.2.2 Bilancio Neutronico

Per “bruciare” le scorie, il bilancio neutronico deve essere favorevole. Si definisce un “costo neutronico”  $D$  per ogni nucleo da incenerire.

- $D > 0$ : Il nucleo è un “veleno” (consuma più neutroni di quanti ne produca).
- $D < 0$ : Il nucleo è un “combustibile” (produce un surplus netto di neutroni).

La **Tabella 7** del paper riassume la fisica fondamentale dell'incenerimento:

- **Spettro Termico (PWR):** Solo  $^{239}\text{Pu}$  e  $^{241}\text{Pu}$  sono combustibili ( $D < 0$ ). Gli Attinidi Minori (Np, Am) sono **forti veleni** ( $D > 0$ ).
- **Spettro Veloce (ADSR):** *Tutti* gli attinidi (incluso  $^{237}\text{Np}$  e  $^{241}\text{Am}$ ) si comportano come **combustibili** ( $D < 0$ ). Fissionano efficientemente, diventando produttori netti di neutroni.

**Conclusione:** Un reattore termico non può incenerire gli Attinidi Minori; li accumula come veleni. Solo un **reattore a spettro veloce** (come un ADSR) può incenerire l'intero inventario di scorie transuraniche (Pu + MA), risolvendo il problema della radiotossicità a lungo termine.

---

### 0.1.8 Capitolo 5: Dimensionamento dei Reattori Sottocritici

Questo capitolo collega la fisica neutronica (Cap. 3-4) ai vincoli ingegneristici (termoidraulica, geometria) per definire la dimensione di un ADSR.

**5.1 Flusso Massimo** A differenza di un reattore critico (limitato dalla sicurezza e dai feed-back), la potenza di un ADSR è limitata principalmente dalla **densità di potenza estraibile** (in  $W/cm^3$ ), un limite termoidraulico del refrigerante (es. Piombo).

- La densità di potenza fissa la densità di fissione richiesta:  $W_{max} \propto \Sigma_f \cdot \phi$ .
- Il paper nota che, in linea di puramente teorica e solo per combustibili *fissili* (come il  $^{239}\text{Pu}$ ), i reattori termici (con  $\sigma_f$  altissima) potrebbero raggiungere flussi  $\phi$  più elevati e inventari di combustibile più piccoli.
- Tuttavia, come visto nel Cap. 4, questo vantaggio è irrilevante perché i reattori termici **non possono** bruciare gli Attinidi Minori, che è lo scopo principale.

**5.2 e 5.3 Sistemi Sferici e Realistici** Il capitolo modella la dimensione del nocciolo necessaria per raggiungere un  $k_s$  operativo (es. 0.98), data la densità di potenza massima.

- Si confronta un modello analitico semplice (sferico, 5.2) con una simulazione MCNP realistica (cilindrica, 5.3).
- **Risultato (Figura 13):** Un calcolo MCNP realistico per un sistema U-Pu con  $k_s = 0.98$  richiede un volume del nocciolo di circa **1.5 m<sup>3</sup>**.
- **Conclusione:** I calcoli realistici (che tengono conto della geometria del fascio e delle fughe neutroniche) richiedono volumi di combustibile circa doppi rispetto ai modelli analitici idealizzati.

**5.4 Moltiplicatori a Due Stadi (Booster)** Questa è una sezione chiave che propone un design avanzato per ottimizzare simultaneamente guadagno e sicurezza.

- **Problema:** Si desidera un guadagno energetico alto (che richiede  $k_s \rightarrow 1$ ) e una sicurezza intrinseca (che richiede un  $k_{eff}$  basso, es. 0.95).
- **Soluzione:** Disaccoppiare  $k_s$  (moltiplicazione della sorgente) da  $k_{eff}$  (autovalore del sistema) usando la geometria.
- **Design:**
  1. Un "Booster" centrale: una piccola sfera ( $R_1$ ) di materiale molto fissile (es. Pu puro) con  $k_1 \approx 0.95$ .

2. Una “Shell” esterna: un guscio ( $R_2$ ) molto più grande di materiale fertile (es. Th) con  $k_2 \approx 0.95$ .
- **Fisica (Moltiplicazione a Cascata):**
    - La sorgente colpisce il Booster. I neutroni vengono moltiplicati con un guadagno  $M_1 \approx \frac{1}{1-k_1} \approx 20$ .
    - Questi neutroni fuggono verso la Shell ( $\omega_{12} \approx 1$ ) dove vengono ulteriormente moltiplicati con un guadagno  $M_2 \approx \frac{1}{1-k_2} \approx 20$ .
    - Il Guadagno Totale è il prodotto dei due:  $M_{tot} \approx M_1 \cdot M_2 \approx 400$ .
  - **Risultato:**
    - **Guadagno della sorgente ( $k_s$ ):** Altissimo, dato da  $k_s \approx 1 - (1-k_1)(1-k_2) \approx 0.9975$ .
    - **Sicurezza ( $k_{eff}$ ):** Determinata dal singolo stadio più critico (la Shell), quindi rimane basso e sicuro ( $k_{eff} \approx 0.95$ ).

La **Figura 1** (introdotta nel Cap. 3) è la prova di questo concetto: mostra un  $K_i$  (guadagno iniziale) altissimo che converge a un  $K_{eff}$  (autovalore) molto più basso e sicuro.

---

### 0.1.9 Capitolo 6: Practical proposals and projects

Questo capitolo analizza i componenti e le scelte progettuali, che determinano i feedback.

- **6.1-6.2 Proposte:** Vengono descritti i progetti principali:
  1. **Energy Amplifier (Rubbia):** Combustibile solido, refrigerato a **piombo**, spettro veloce, ciclo Th-U .
  2. **Bowman/Furukawa:** Combustibile liquido a **sali fusi**, spettro termico, ciclo Th-U. Il vantaggio è la rimozione online dei veleni (FP) e del  $^{233}\text{Pa}$ , ottimizzando la neutronica e i feedback .
- **6.3 Discussione dei Componenti (Cruciale per i Feedback):**
  - **6.3.1 Spettro Neutronico:** La scelta fondamentale. Il **veloce** è superiore per: incenerimento MA (Cap. 4), stabilità di  $k$  (Cap. 3), e mitigazione dell’effetto Protattinio (Cap. 3) .
  - **6.3.2 Combustibile:** Solido (tecnologia nota) vs. Liquido (neutronica ottimale ma sfide tecnologiche come la corrosione) .
  - **6.3.4 Refrigerante:** Le scelte (Gas, Piombo, Sali Fusi) determinano la densità di potenza e, soprattutto, i **feedback termici** del reattore.
  - **6.3.5 Acceleratore:** LINAC (alta corrente,  $>100\text{mA}$ ) vs. Ciclotroni (compatti, max 5-10mA).