

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** ($^{232}Th \rightarrow ^{233}U$), 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}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}U e ^{232}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_∞):** 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, Σ_f e Σ_a sono le sezioni d'urto macroscopiche di fissione e assorbimento, e ϕ è il flusso neutronico.

- **Parametro η :** Per un singolo nuclide fissile, η è il numero di neutroni prodotti per *neutron 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 η , k_∞ 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, perché stiamo già considerando l'interità dello spettro neutronico mediante lintegrale. 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 ϕ^\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:

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

3. Il guadagno energetico G è:

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

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).

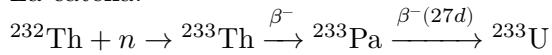
Risultato chiave: La stabilità di questo bilancio dipende dallo spettro. Un **sistema veloce (ciclo Th-U)** può raggiungere una stabilità eccellente (un k quasi piatto per 5 anni). Un **sistema termico** è intrinsecamente instabile (forte variazione di k in meno di 1 anno).

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:



– **Problema:** ^{233}Pa è un veleno neutronico (abbassa k durante l’operazione). ^{233}U è fissile (aumenta k).

– **Feedback:** Dopo uno spegnimento (shutdown), il ^{233}Pa accumulato (che non viene più distrutto dalla cattura neutronica) decade in ^{233}U , causando un **inserimento positivo di reattività**.

– L’ampiezza di questo Δk (Eq. 42) è proporzionale alla densità di fissione v_c (e quindi al flusso ϕ).

– **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 $k + \Delta k_{\text{Pa}} < 1$.

- **3.4.2 Effetto Xeno:**

– Avvelenamento da ^{135}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 α_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 τ_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 Δk (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}Pu e ^{241}Pu sono combustibili ($D < 0$). Gli Attinidi Minori (Np, Am) sono **forti veleni** ($D > 0$).
- **Spettro Veloce (ADSR):** Tutti gli attinidi (incluso ^{237}Np e ^{241}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 feedback), 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}Pu), i reattori termici (con σ_f altissima) potrebbero raggiungere flussi ϕ 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 m³**.
- **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 $k_1 \approx 0.95$.

- 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:
 - Energy Amplifier (Rubbia):** Combustibile solido, refrigerato a **piombo**, spettro veloce, ciclo Th-U .
 - Bowman/Furukawa:** Combustibile liquido a **sali fusi**, spettro termico, ciclo Th-U. Il vantaggio è la rimozione online dei veleni (FP) e del ^{233}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, $>100mA$) vs. Ciclotroni (compatti, max 5-10mA).