



# UNIVERSITÀ DI PISA

## NUCLEAR MATERIALS

---

### LUIGI LAZZERI

|                 |                     |
|-----------------|---------------------|
| Anno accademico | 2023/24             |
| CdS             | INGEGNERIA NUCLEARE |
| Codice          | 1086I               |
| CFU             | 6                   |

|                   |            |         |     |                                     |
|-------------------|------------|---------|-----|-------------------------------------|
| Moduli            | Settore/i  | Tipo    | Ore | Docente/i                           |
| NUCLEAR MATERIALS | ING-IND/19 | LEZIONI | 60  | FRANCESCO D'ERRICO<br>LUIGI LAZZERI |

#### Obiettivi di apprendimento

##### *Conoscenze*

Lo studente che completerà con successo il corso avrà la capacità di identificare e selezionare i materiali da utilizzare per applicazioni nei reattori nucleari, valutandone le proprietà dal punto di vista meccanico, chimico e nucleare.

##### *Modalità di verifica delle conoscenze*

Lo studente sarà valutato in base alla capacità dimostrata di discutere i principali contenuti del corso utilizzando la terminologia appropriata. Durante l'esame lo studente deve essere in grado di dimostrare la propria conoscenza del materiale del corso ed essere in grado di discutere l'argomento in modo ponderato e con proprietà di espressione.

Verrà valutata la capacità dello studente di esporre correttamente alla lavagna i principali argomenti presentati durante il corso.

##### *Capacità*

Il corso fornisce le seguenti competenze principali:

- capacità di identificare diverse tipologie di strutture metalliche;
- capacità di prevedere quantitativamente alcuni fenomeni fondamentali, come le proprietà meccaniche elementari;
- comprensione dei principali meccanismi di danno da irraggiamento negli acciai e nelle leghe Zr;
- capacità di progettare i materiali metallici adeguati per i reattori nucleari e per il contenimento del combustibile;

##### *Modalità di verifica delle capacità*

Esame orale, con assegnazione di problemi tipici.

##### *Comportamenti*

Il corso è essenzialmente un corso per "cambiare idea". Dal materiale presentato si suppone che gli studenti acquisiscano quegli atteggiamenti tipici della "cultura nucleare", cioè responsabilità, atteggiamento aperto e comunicativo, trasparenza, atteggiamento interrogativo.

##### *Modalità di verifica dei comportamenti*

Conoscenze di base sugli impianti nucleari, scienza dei materiali, prove meccaniche.

##### Prerequisiti (conoscenze iniziali)

Chimica di base  
Fisica dei reattori nucleari  
Impianti nucleari

##### Indicazioni metodologiche

Svolgimento: in presenza  
Frequenza: consigliata  
Attività didattiche:  
frequenza delle lezioni  
partecipazione a seminari



## UNIVERSITÀ DI PISA

Metodi di insegnamento:

Lezioni  
Seminari

### Programma (contenuti dell'insegnamento)

Prima sezione: Ciclo del combustibile e criteri di scelta dei materiali

Fondamenti dei sistemi di reattori nucleari. Tipi di reattori: classificazione in termini di energia neutronica, scopo del reattore, tipo di refrigerante. Un semplice design del reattore. Principali caratteristiche dei reattori di Gen I, Gen II, Gen III e Gen IV.

Il ciclo del combustibile nucleare. Ricerca ed estrazione dell'uranio: miniere di uranio e minerali di uranio (specie ridotte e specie ossidate).

Concetti di base della chimica sullo stato di ossidazione degli elementi nei composti.

Lisciviazione acida e lisciviazione basica. Lisciviazione in situ. Trattamento di soluzioni di uranio; la "yellow cake". Raffinazione dell'uranio; estrazione liquido-liquido mediante TBP.

Concetti di base relativi ad un generale processo di arricchimento isotopico: abbondanza isotopica relativa, fattore di separazione, guadagno di separazione, fattore di arricchimento. Arricchimento di UF<sub>6</sub> per diffusione. Schema tipico del diffusore. Caratteristiche della membrana di diffusione. Pro e contro di un impianto di diffusione. Esempio numerico per una cascata di separazione per diffusione ideale senza code; calcolo del numero minimo di stadi di separazione in una cascata di diffusione ideale.

Principi base della separazione in un campo di forze. Separazione in un campo gravitazionale. Arricchimento di UF<sub>6</sub> mediante centrifugazione.

La centrifuga Zippe. Pro e contro di un impianto di centrifugazione. Esempio numerico per una cascata di separazione centrifugazione ideale senza code; calcolo del numero minimo di stadi di separazione in una cascata di centrifugazione ideale.

Tecniche di separazione isotopica laser. Separazione isotopica basata sulla struttura iperfine. Separazione atomica: la tecnica AVLIS.

Separazione molecolare: la tecnica MLIS. La separazione aerodinamica: la tecnica degli ugelli a getto. Confronto tra diverse tecniche di separazione.

Fabbricazione di elementi combustibili: produzione di UO<sub>2</sub> mediante percorso umido o secco.

Le operazioni di back-end nel ciclo del combustibile: ritrattamento e riciclaggio. Il processo PUREX: decladding del combustibile, taglio, dissoluzione, separazione di U e Pu, separazione di Pu da U, conversione del prodotto finale.

Criteri generali per la scelta dei materiali. Requisiti e materiali per rivestimento del combustibile, moderatore e riflettori, refrigeranti, materiali di controllo, materiali di schermatura. Esempio: materiali di rivestimento del combustibile per reattori leggeri; proprietà di Be, Mg, Al, Zr; Leghe a base Zr – Zircaloy-2 e Zircaloy-4.

Estrazione di Zr dal minerale; il processo Kroll modificato. Processi di separazione Zr-Hf: principi e caratteristiche dei processi MIBK e TBP.

Seconda sezione: danni da radiazioni dei materiali

Struttura e proprietà dei materiali metallici. Celle elementari, notazione di Miller e Bravais.

Difetti puntuali. Difetti lineari. Dislocazioni. Classificazione dei cristalli e dipendenza tra proprietà meccaniche e struttura cristallina dei materiali.

Il ruolo delle imperfezioni, dello stato di sforzo, della temperatura e della velocità di deformazione nelle proprietà meccaniche.

Interazione dei neutroni con la materia: cattura e diffusione. Sezioni d'urto, flusso di neutroni e cammino libero medio. Danni da radiazioni: danni diretti, trasmutazione, formazione di bolle, rigonfiamento.

Teoria delle collisioni: soglia di spostamento, energia di cut-off. Geometria del danno: picco di spostamento, picco termico.

Effetti della radiazione sulle proprietà fisiche e meccaniche. Accentuazione della diffusività, del creep, della stabilità di fase, dell'indurimento da radiazione, dell'infragilimento e della corrosione.

"Radiation growth" nell'uranio e nella grafite, "thermal ratcheting" del combustibile del reattore. Processi di ricottura. Rilascio di energia di Wigner nella grafite.

Acciai da costruzione resistenti alle radiazioni Panoramica dei problemi di integrità strutturale. Meccanica della frattura e prove non distruttive.

Cracking da tensocorrosione

Metallurgia nucleare Strutture e proprietà dei materiali con particolare rilevanza per la produzione di energia nucleare: zirconio e leghe ZR

"Pressure vessel" e rivestimento. Acciaio inossidabile per applicazioni nucleari.

Esempio di danno da radiazioni in una centrale nucleare. Cracking da corrosion stress e infragilimento da idrogeno.

### Bibliografia e materiale didattico

Benjamin M. Ma - Nuclear Reactor Materials and Applications

Gary S. Was - Fundamentals of Radiation Materials Science

W. Hoffelner - Materials for Nuclear Plants

Materiale fornito dal docente.

### Indicazioni per non frequentanti

Il materiale didattico, aggiornato di anno in anno dal docente, è disponibile su supporto usb.

Il docente è disponibile con continuità a ricevere gli studenti per la soluzione dei loro problemi di apprendimento.

### Modalità d'esame

L'esame è una prova orale e consiste in un colloquio tra il candidato ed i docenti. Durante la prova verrà valutata anche la capacità del candidato di esprimersi in modo chiaro utilizzando la terminologia corretta.

### Note

Per gli esami contattare luigi.lazzeri1@unipi.it oppure salvatore.cancemi@phd.unipi.it per fissare appuntamento.



*Ultimo aggiornamento 07/11/2023 11:06*