



# UNIVERSITÀ DI PISA

## MATERIALI NUCLEARI

---

### LUIGI LAZZERI

Anno accademico	2019/20
CdS	INGEGNERIA NUCLEARE
Codice	418II
CFU	6

Moduli	Settore/i	Tipo	Ore	Docente/i
MATERIALI NUCLEARI	ING-IND/19	LEZIONI	60	LUIGI LAZZERI RENZO VALENTINI

#### Obiettivi di apprendimento

##### *Conoscenze*

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

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

Lo studente sarà valutato sulla sua capacità dimostrata di discutere i contenuti del corso principale utilizzando la terminologia appropriata. Durante l'esame lo studente deve essere in grado di dimostrare la sua conoscenza del materiale del corso ed essere in grado di discutere la questione della lettura con attenzione e con correttezza di espressione.

Sarà valutata la capacità dello studente di spiegare correttamente gli argomenti principali presentati durante il corso alla lavagna.

##### *Capacità*

Le seguenti abilità principali sono fornite dal corso:

- capacità di identificare diversi tipi di strutture metalliche;
- capacità di individuare quantitativamente alcuni fenomeni di base, come proprietà meccaniche elementari;
- comprensione dei principali meccanismi di danno da irradiazione in acciaio e lega Zr;
- capacità di progettare i giusti materiali metallici per il reattore nucleare e per il rivestimento del combustibile.

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

Esame scritto, con assegnazione di problemi tipici (2 ore) e successiva sessione orale.

##### *Comportamenti*

Il corso è decisamente del tipo "changing mind". Dal materiale presentato si prevede che gli studenti acquisiscano quegli atteggiamenti tipici della "cultura nucleare", cioè responsabilità, atteggiamento aperto e comunicativo, trasparenza, atteggiamenti interrogativi.

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

Conoscenza di base degli impianti nucleari, scienza dei materiali, proprietà meccaniche.

##### **Prerequisiti (conoscenze iniziali)**

Chimica di base  
Fisica del reattore nucleare  
Impianti nucleari

##### **Indicazioni metodologiche**

Erogazione: frontale  
Frequenza: consigliata  
Attività didattiche:  
frequenza delle lezioni  
partecipazione a seminari  
preparazione di rapporti orali/scritti  
Metodi di insegnamento:



## UNIVERSITÀ DI PISA

lezioni  
seminari  
lavoro su progetti

### Programma (contenuti dell'insegnamento)

Prima parte: ciclo del combustibile e criteri di selezione dei materiali

Fondamenti di sistemi nucleari. Tipi di reattori: classificazione in termini di energia di neutroni, scopo del reattore, tipo di refrigerante.

Un semplice design del reattore. Principali caratteristiche dei reattori dei reattori Gen I, Gen II, Gen III e Gen IV.

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

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

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

Concetti di base relativi ad un generico processo di arricchimento isotopico: abbondanza isotopica relativa, fattore di separazione, guadagno di separazione, fattore di arricchimento. Arricchimento dell'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 della diffusione ideale con assenza di code; calcolo del numero minimo di fasi di separazione in una cascata di diffusione ideale.

Principi di base della separazione in un campo di forza. 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 ideale di separazione per centrifugazione senza code; calcolo del numero minimo di fasi di separazione in una cascata ideale di centrifugazione.

Tecniche di separazione isotopica con laser. Separazione isotopica basata sulla struttura iperfina. Separazione atomica: la tecnica AVLSI.

Separazione molecolare: la tecnica MLIS. La separazione aerodinamica: la tecnica "nozzle jet". Confronto tra le diverse tecniche di separazione.

Fabbricazione degli elementi di combustibile: produzione di UO<sub>2</sub> per via umida o secca.

L'operazione di back-end nel ciclo del combustibile: riprocessamento e riciclo. Il processo PUREX: decadimento del combustibile, dissoluzione, estrazione di U e Pu dal combustibile esausto, separazione di Pu da U, conversione del prodotto finale.

Criteri generali per la selezione dei materiali. Requisiti e materiali per il rivestimento del combustibile, moderatore e riflettori, refrigeranti, materiali di controllo, materiali di schermatura. Esempio: materiali di rivestimento del combustibile per LWR; proprietà di Be, Mg, Al, Zr; Leghe a base di zirconio - 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 Miller e Bravais.

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

Il ruolo delle imperfezioni, stato di stress, temperatura e velocità di deformazione nelle proprietà meccaniche.

Interazione dei neutroni con la materia: cattura e diffusione. Sezioni d'urto, flusso di neutroni e percorso libero medio. Danno da radiazioni: danno di contatto, trasmutazione, formazione di bolle, rigonfiamento.

Teoria della collisione: soglia di spostamento, soglia di energia. Geometria del danno: picco di spostamento, picco termico.

Effetti delle radiazioni sulle proprietà fisiche e meccaniche. Diffusione incrementata, creep, stabilità di fase, indurimento da radiazioni, infragilimento e corrosione.

Crescita da radiazioni in uranio e grafite, cricche termiche dei complessi di combustibile del reattore. Processi di ricottura. Rilascio di energia di Wigner in grafite.

Acciai da costruzione resistenti alle radiazioni. Panoramica dei problemi di integrità strutturale. Meccanica della frattura e test non distruttivi. Stress-corrosion cracking.

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

"Pressure vessels" e rivestimenti di acciaio inossidabile per applicazioni nucleari.

Esempio di danno da radiazioni nella centrale nucleare. "Stress corrosion cracking" 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 anno per anno dall'insegnante, è disponibile sia su supporto usb che sul sito web della scuola.

L'insegnante è disponibile con continuità per ricevere gli studenti e risolvere i loro problemi di apprendimento delle materie trattate.

### Modalità d'esame

L'esame è composto da una prova scritta e una prova orale.

La prova scritta consiste in due domande, una per ogni sezione del corso, della durata di due ore. La prova scritta sarà superata se il punteggio per ogni domanda è almeno 18/30.

La prova orale consiste in un colloquio tra il candidato e i docenti. Durante il test verrà valutata anche la capacità del candidato di esprimersi in modo chiaro utilizzando la terminologia corretta. La prova orale verrà superata se il punteggio è almeno 18/30.

Il punteggio finale sarà la media dei punteggi dello scritto e dell'orale.



*Ultimo aggiornamento 03/09/2019 13:12*