

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria dell'energia

***Relazione per la prova finale
<<Gestione del combustibile nucleare
irraggiato e incidenza su costo
dell'energia>>***

Tutor universitario: Prof. Giuseppe Zollino

Laureando: *Andrea Coccato*

Padova, 21/09/2023

La gestione del combustibile nucleare irraggiato è fondamentale: perché?

- È necessario un cambio di rotta nell'approvvigionamento energetico e, al giorno d'oggi, l'energia nucleare è fondamentale per il mix tecnologico vincente
- Ad oggi, sono in funzione oltre 600 reattori, di cui 200 adibiti alla ricerca e in totale hanno contribuito alla generazione di 107.021 tHM di rifiuti, ma questo numero è destinato ad aumentare
- La gestione ottimale eviterà di danneggiare le generazioni future

Il costo del nucleare: è davvero così caro?

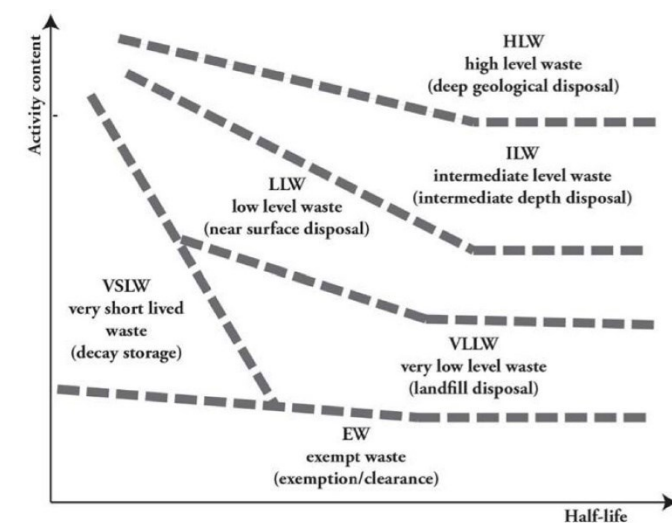
- In condizioni appositamente favorevoli è una delle fonti con il costo di generazione del kWh meno oneroso
- Il *back-end* del combustibile, effettuato anche con depositi geologici permanenti, influisce in maniera quasi trascurabile nel costo di generazione del kWh

Il presente elaborato finale, dopo aver fornito una panoramica sui seguenti temi, quali:

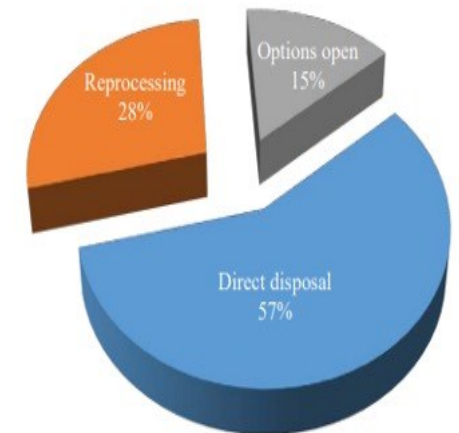
- **I rifiuti radioattivi**
- **Il combustibile nucleare irraggiato**
- **La gestione del combustibile nucleare irraggiato**
- **Il costo dell'energia nucleare**

ha l'obiettivo di valutare se l'energia nucleare sia sostenibile, sia dal punto di vista ambientale che economico, di esplorare una nuova strategia di gestione definitiva del combustibile irraggiato e di valutarne l'impatto nel costo dell'energia.

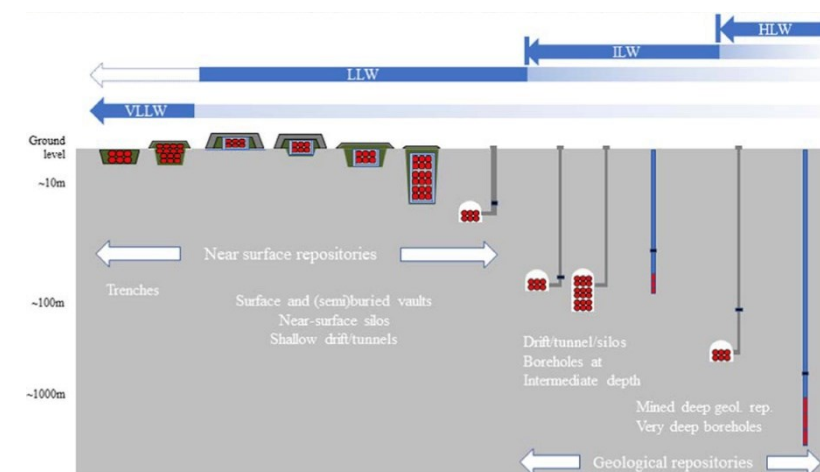
- Origine dei rifiuti radioattivi
 - Naturale → NORM
 - Industrie, tra cui quella
 - Medica → produzione di medicinali e ricerca
 - Energetica → centrali a carbone, centrali nucleari e centrali a gas
 - Centri di ricerca
 - Smantellamento di vecchie centrali → superfici a stretto contatto con materiali radioattivi
 - Apparato militare → produzione di armi
- Classificazione dei rifiuti radioattivi
 - VLLW → non necessitano un alto livello di contenimento
 - LLW → strategie di contenimento affermate
 - ILW → rifiuti in maggiore quantità e modalità di stoccaggio note
 - HLW → emanano radiazioni β e γ , i più pericolosi sono ^{237}Np , ^{245}Am e $^{242-248}\text{Cm}$



- Da dove ha origine
 - Fissione nucleare → reazione di un neutrone lento con un isotopo di ^{235}U o ^{239}Pu , con sezione d'urto maggiore di quella di cattura
- I principali componenti
 - ^{235}U → fissile
 - ^{238}U → fertile
 - ^{239}Pu → fissile, dato dalla reazione di un neutrone lento con ^{238}U dopo il decadimento β dell' ^{239}U
 - Prodotti di fissione → circa il 3% del combustibile esausto, di cui i più pericolosi sono ^{90}Sr e ^{137}Cs
- Opzioni di gestione
 - Ciclo aperto → il combustibile esausto viene direttamente inviato in depositi per lo stoccaggio
 - Ciclo chiuso → il combustibile esausto viene riprocessato e solo i prodotti di scarto stoccati

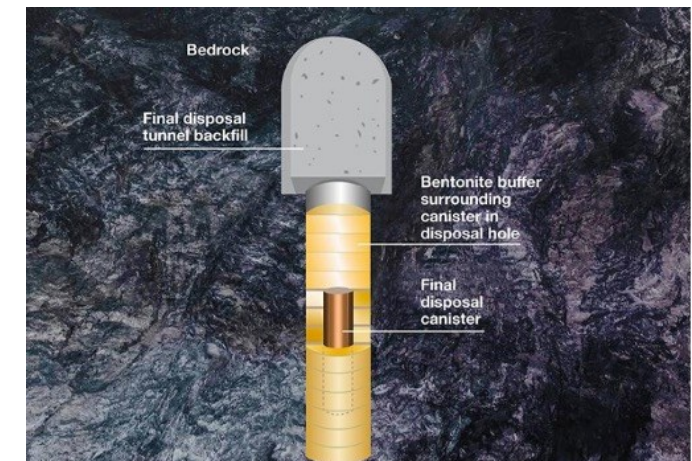
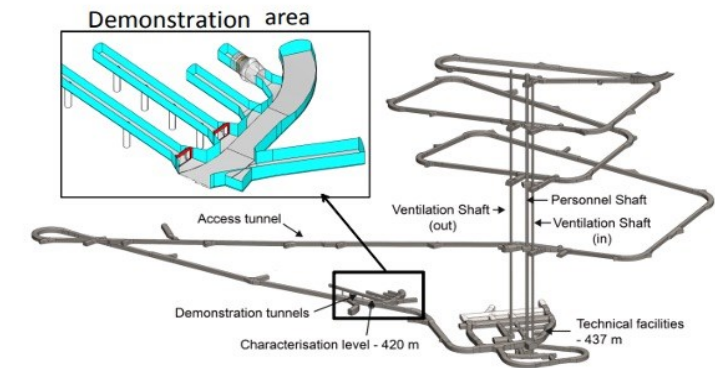


- Gestione del combustibile nucleare irraggiato
- Dal punto di vista politico → supervisione della *Joint Convention* a livello internazionale, ma gestite in maniera diretta o indiretta (RWMO) dal governo
- Dal punto di vista economico → il detentore della licenza ha piena responsabilità economica
- Fondo di smantellamento → si ottiene accantonando $A = F \frac{i}{(1+i)^{n-1}}$ per gli n anni di vita utile della centrale
- Tecnologie utilizzate → *dry* o *wet storage*, vicino alla superficie oppure in profondità a seconda del tipo di attività del materiale



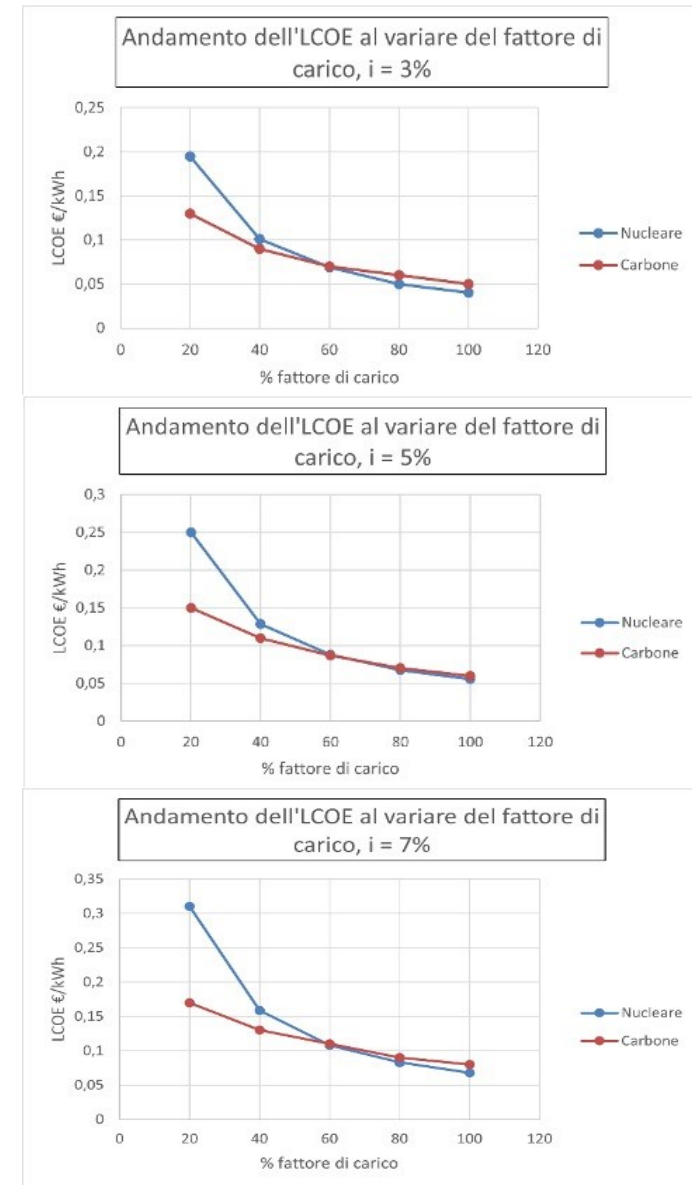
- Storia del nucleare
 - Il primo reattore → fu costruito a Loviisa nel 1971
 - Reattori in funzione → attualmente 5, l'ultimo Olkiluoto 3 (2022), coprono il 30% della domanda
 - Il punto di vista politico → *Nuclear Energy Act*, *Radiation Act* e *Joint Convention* (2001) e l'autorità competente è la STUK
 - Il punto di vista economico → le compagnie devono gestire le spese, in caso di problemi interviene il SNMF gestito dalle autorità competenti

- Il deposito di ONKALO
- La proposta → venne proposto nel 1999 dalla compagnia Posiva, accettata come DiP dal governo nel 2000
- Scopo → contenere i rifiuti radioattivi prodotti da cent'anni di funzionamento per centinaia di migliaia di anni
- Metodologia di stoccaggio → tunnel profondo 430 metri, rifiuti radioattivi posti in *canisters* seguendo il metodo KBS-3V e riposti in appositi tunnel riempiti di bentonite
- Consenso pubblico → negligenza da parte dei cittadini dovuta a una grande fiducia verso l'autorità competente e un decrescente interesse verso tali tematiche



- Il costo del nucleare attualizzato
 - Costi di *overnight* → per i membri OCSE fra i 2.157\$/kWe e i 6.920\$/kWe
 - LCOE → stando ai dati ETRI, tra i 0,05€/kWh e i 0,08 €/kWh a seconda del tasso di attualizzazione, con fattore di carico dell'85%
 - Il costo del *Back-end* → influisce in maniera lieve, 0,1 c€/kWh con le tecnologie ad oggi utilizzate
 - Parametri di rilievo → ore di utilizzo e tasso di attualizzazione
 - Parametri di poco rilievo → durata di vita utile e prezzo del combustibile (con dati ETRI pari a 0,46 c€/kWh)

- Confronto con una centrale a carbone
- Con fattore di carico pari all'85% → centrale a carbone tra 0,06 €/kWh e 0,1 €/kWh, centrale nucleare tra 0,05 €/kWh e 0,08 €/kWh, a seconda del tasso
- Con fattore di carico pari al 22% → centrale a carbone tra 0,12 €/kWh e 0,16 €/kWh, centrale nucleare tra 0,17 €/kWh e 0,27 €/kWh, a seconda del tasso
- Al diminuire del numero di ore di utilizzo e all'aumentare del tasso il nucleare non risulta più conveniente



- Il costo finlandese con il deposito di ONKALO
 - LCOE senza *back-end* → tra 0,02 €/kWh di Loviisa 1 e 2 e 0,05 €/kWh di Olkiluoto 3
 - Caratteristiche del deposito → capienza di circa 6500 tU_{arr}, per un totale di circa 1,2 milioni di €₂₀₂₃/tU_{arr}
 - Costo del deposito → usando $2,5 \times 10^9$ tU_{arr} /kWh nelle centrali, risulta 0,3 c€/kWh

Questo elaborato ha dimostrato che, dati alla mano, l'energia nucleare è sostenibile

- Dal punto di vista ambientale → oltre alle emissioni nulle di CO₂ durante la generazione di energia, la gestione del combustibile irraggiato ha lo scopo di garantire l'integrità di persone ed ambiente e tale obiettivo è raggiungibile con depositi geologici sotterranei, come quello di ONKALO i cui prezzi sono destinati a diminuire
- Dal punto di vista economico → il costo del nucleare non è maggiore di quello di altre tecnologie, come ad esempio del carbone, considerando anche il *back-end* del combustibile, che influisce in maniera lieve sul prezzo di generazione del kWh