



Elaborato finale  
Laurea in Ingegneria Energetica

## STUDIO DEI REATTORI NUCLEARI DI IV GENERAZIONE E PROGETTO MYRRHA

*Davide Ramelli*  
1755009

*Relatore: Prof. Luisa Ferroni*  
*Correlatore: Ing. Angelo Antonio Papa*

**Sommario.** In questo elaborato viene condotto uno studio riguardante gli impianti nucleari di IV generazione. Le principali metodologie utilizzate sono quelle di una analisi chimico-fisica di ogni componente dell'impianto MYRRHA sito in Belgio. I componenti analizzati sono: l'acceleratore di particelle lineare "Linac", il reattore "MYRRHA REACTOR" e il fluido refrigerante "LBE". Nella parte conclusiva viene esposta l'attuale situazione sociopolitica della tecnologia nucleare di IV generazione e gli obiettivi futuri da raggiungere.



## **1. Cosa sono i reattori di IV generazione e quando saranno disponibili**

Per reattori nucleari di IV generazione si intende un gruppo di nuove tipologie di reattori nucleari a fissione. Vengono studiati da decenni ma al momento ancora non si sono concretizzati sul mercato poiché è necessario condurre ulteriori studi per la loro completa comprensione e applicazione. Un'altra motivazione per la quale ancora non si dispone di reattori nucleari di IV generazione è che trattandosi di una nuova tecnologia, i costi per la realizzazione di nuovi impianti sono elevati. Analizzando però la storia dell'evoluzione della tecnologia dei reattori nucleari, alcuni esperti affermano che la tecnologia di IV generazione si affermerà dal 2030 in poi. Nello specifico caso di questo elaborato, dopo una panoramica generale su quello che è in grado di offrirci la tecnologia di IV generazione, verrà analizzato un reattore nucleare ad amplificazione di energia chiamato MYRRHA il cui termine per la fine dei lavori e la messa in esercizio è programmato per l'anno 2036.

## **2. Quali sono le innovazioni che i reattori di IV generazione propongono, sia a livello di economia neutronica sia a livello di costi**

Si possono individuare 6 tipologie di reattore di IV generazione a loro volta divise in 2 gruppi. Nel primo gruppo si individuano i reattori termici come i VHTR (Very High Temperature Reactor), reattori in grado di fornire calore ad elevata temperatura. Tale calore viene ottenuto grazie ad un moderatore neutronico in grafite, generalmente prismatico a blocchi esagonali o in configurazione "pebble-bed" ossia composto di ciottoli in grafite. Il calore così generato può arrivare alla temperatura di 1000 °C ed essere impiegato nel processo di "cracking" degli idrocarburi o per la produzione di idrogeno che verrà poi utilizzato nelle celle a combustibile. Del secondo gruppo fanno parte i reattori a neutroni "veloci" che portano il vantaggio di poter utilizzare una vasta gamma di combustibili. Di questo gruppo fanno parte i reattori FBR (Fast Breeder Reactor) composti da un nocciolo di materiale fissile contenuto in un mantello di materiale fertile che verrà fertilizzato dai neutroni veloci prodotti dalla fissione. In questo tipo di tecnologia, fino a che il numero degli atomi fertilizzati supera quello degli atomi fissionati, si avrà una costante produzione di materiale fissile, permettendo così di ricaricare solo il materiale fertile all'interno del nocciolo. Uno dei grandi svantaggi dei reattori veloci è il loro ampio tempo di raddoppio, ossia il tempo con cui il reattore produce il doppio del materiale fissile che aveva nella sua carica iniziale, che in questo caso si aggira intorno ai 15-20 anni. Sfortunatamente questa tipologia di reattori, seppur molto promettente, ha dato scarsi risultati a livello di sicurezza a causa della produzione di  $^{240}\text{Pu}$ , isotopo altamente instabile che tende a fissionare spontaneamente. Da considerare però il lato positivo della produzione di  $^{240}\text{Pu}$  ossia quello della non proliferazione di armi nucleari poiché grazie alla sua instabilità renderebbe inutilizzabili queste ultime.

In ambito economico i reattori di IV generazione offrono un grande vantaggio, quello di riuscire ad estrarre potenza dal 70% del combustibile impiegato grazie alle loro nuove tecnologie e all'utilizzo di moderatori in grafite, a differenza dei precedenti reattori in grado di estrarre una quota nettamente inferiore di potenza. Lo svantaggio è che trattandosi di nuove tecnologie risulta molto difficile stimare i costi di impianto e di produzione.



### **3. Tecnologie candidate allo sviluppo di filiera di IV generazione**

In questo paragrafo si andranno a studiare le varie tecnologie candidate allo sviluppo, analizzando i loro vantaggi, i loro svantaggi e il loro livello di sicurezza.

#### **3.1 Filiere termiche**

##### **3.1.1 Reattori VHTR (Very High Temperature Reactor)**

Come già accennato in precedenza si tratta di una tipologia di reattori termici. I reattori VHTR sono moderati a grafite e raffreddati ad elio (He). Il combustibile è disperso in microparticelle incapsulate in vari gusci sferici concentrici costituiti da strati di carbone pirolitico, grafite e carburo di silicio. Il nocciolo è costituito da un insieme di sfere di combustibile raffreddate dal gas che circola negli interstizi. Grazie all'elevata temperatura in uscita del refrigerante, i sistemi VHTR sono ideali per la produzione di energia elettrica con altissimi rendimenti ma anche per processi chimici di produzione di idrogeno. La disposizione a sfere del combustibile garantisce un alto livello di sicurezza intrinseca, contenendo efficacemente i prodotti della fissione. L'ottima economia neutronica consente una grande flessibilità nella scelta del ciclo di combustibile potendo adottare vari cicli come:  $^{235}\text{U}/^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}/^{239}\text{Pu}$ . I vantaggi che questo sistema propone sono consistenti tanto da candidare i reattori VHTR come miglior scelta per la IV generazione. Naturalmente questi reattori presentano alcuni svantaggi. Primo tra tutti è la tenuta del circuito del refrigerante che come detto è l'Elio (He) che, in quanto gassoso, presenta lo svantaggio di non effettuare l'operazione di "scrubbing" in caso di malfunzionamento. Lo "scrubbing" è un processo che avviene negli impianti raffreddati ad acqua grazie al quale si ha un'ottima ritenuta dei prodotti di fissione che vengono trattenuti dall'acqua stessa. Inoltre, le alte temperature a cui lavora il gas refrigerante rendono necessario l'impiego di particolari leghe metalliche altamente resistenti al calore e dunque costose. Altro problema di questa filiera è insito nell'utilizzo della grafite come moderatore poiché a fine attività, sarà necessario smaltire un grande quantitativo di grafite radioattiva. Ad oggi la tecnologia per tale smaltimento risulta ancora non consolidata.

##### **3.1.2 Reattori SCWR (Super Critical Water Reactor)**

Si tratta di reattori termici che impiegano acqua in condizioni supercritiche come fluido di lavoro. I reattori SCWR sono sostanzialmente dei reattori ad acqua leggera LWR che operano a temperature e pressioni oltre i dati critici (374 °C; 22.1 MPa). L'acqua, trovandosi in condizioni supercritiche si presenta in un'unica fase proprio come nei reattori PWR. Pertanto, i reattori SCWR sono in grado di operare a temperature e pressioni maggiori rispetto agli attuali PWR, genericamente degli LWR, e proprio per questo vengono caratterizzati da un'alta efficienza termica, circa il 45% contro l'attuale 33% dei reattori LWR. Il principale compito di questa tipologia di reattori sarà la produzione di elettricità. I SCWR sono inoltre molto promettenti sul mercato in quanto derivano dall'unione di due tecnologie ben collaudate nel tempo: i reattori LWR che sono i più impiegati al mondo e le caldaie a temperature e pressione supercritica a combustibili fossili.

##### **3.1.3. Reattori MSR (Molten Salt Reactor)**



Si tratta di una tipologia di reattori termici molto simili ai VHTR ma con alcune peculiarità. La prima innovazione consiste nel refrigerante che appunto è costituito da sale fuso e non più da elio. Il combustibile è liquido e contenuto anch'esso nel sale refrigerante in molteplici impianti di questa categoria. Come combustibile, si possono utilizzare sali fusi di Uranio come il tetrafluoruro di uranio  $UF_4$  o il tetrafluoruro di Torio  $ThF_4$ . Analogamente al VHTR, il reattore MSR ha capacità di lavorare ad altissime temperature in quanto la temperatura di fusione dei sali si aggira sui  $1400\text{ }^\circ\text{C}$  e di operare il raffreddamento a bassa pressione aumentando così il livello di sicurezza. Il problema principale di questa tipologia di reattori è il trattamento delle scorie prodotte. Esse sono ricche di Uranio e Plutonio, che andranno separati dal resto delle scorie, rischiando così di favorire la proliferazione nucleare.

### **3.2 Filiere veloci**

Nel caso dei reattori di IV generazione di filiera invece si sfruttano "neutroni veloci". Per il raffreddamento vengono utilizzati metalli allo stato liquido come il sodio, anche per ridurre al minimo l'effetto moderante del liquido. Tuttavia, il sodio presenta alcuni inconvenienti in ambito di sicurezza ed in ambito economico. Basti pensare che a contatto con l'acqua il sodio si incendia e provoca esplosioni. Inoltre, il sodio necessita di uno scambiatore di calore intermedio che pesa sui costi di realizzazione dell'impianto. Noti questi inconvenienti si sta esaminando, come alternativa, una miscela eutettica Piombo-Bismuto (LBE) che presenta numerosi vantaggi. Analogamente al sodio, l'elevato punto di ebollizione della miscela eutettica consente di operare a pressione atmosferica evitando di pressurizzare il contenitore del reattore, scongiurando tutti gli incidenti classici dei reattori PWR e dunque aumentando notevolmente la sicurezza. Altro punto di vantaggio della miscela è la presenza del piombo all'interno della miscela poiché esso è in grado di fornire un'ottima schermatura alle radiazioni gamma permettendo di evitare pesanti e costosi schermi. Altra possibilità che offre l'eutettico Piombo-Bismuto è quella di poter circolare in modo naturale in base alle variazioni di densità legate a quelle di temperatura evitando di usufruire di una refrigerazione mediante componenti attivi. Infine, la miscela LBE ha un'ottima capacità di trasferire il calore, permettendo di essere impiegata per noccioli più compatti e quindi più economici.

#### **3.2.1. Reattori SFR (Sodium-cooled Fast Reactor)**

Sono reattori a neutroni veloci refrigerati con Sodio (Na). Il loro principale punto di forza è la gestione dell'Uranio e dei suoi prodotti. Infatti, questo tipo di reattore grazie alla tecnologia di autofertilizzazione dell'Uranio concede la possibilità di non dover svuotare il reattore dai prodotti transuranici una volta esaurito il combustibile poiché essi vengono bruciati dal reattore stesso. Tutto ciò è possibile grazie al particolare "Core" del reattore SFR, esso risulta non moderato e dunque in grado di smaltire i prodotti transuranici per fissione veloce con estrema facilità. La sicurezza del reattore SFR si basa sul combustibile, infatti esso potrebbe espandersi radialmente quando il reattore si surriscalda, rallentando così la reazione di fissione e rendendolo sfruttabile per un aumento del livello di sicurezza. Ad esempio si potrebbe usufruire di un sistema di ritenzione strutturale che obblighi il core ad espandersi solo radialmente, evitando la pericolosa espansione a clessidra e dunque la supercriticità al centro.

#### **3.2.2 Reattori LFR (Lead-Cooled Fast Reactor)**



Questa è una tipologia di reattori a neutroni veloci che come refrigerante usa il Piombo (Pb) fuso. La scelta di utilizzare il Piombo come refrigerante comporta notevoli vantaggi, infatti si avrà un ottimo schermo per le radiazioni gamma a causa dell'alto numero di massa, elevate temperature operative grazie all'alto punto di ebollizione del piombo (1737 °C), assenza di reattività chimica così da evitare fenomeni esplosivi e la possibilità circolazione naturale consentita dall'alta espansione termica e dalla bassa viscosità del piombo, garantendo anche il raffreddamento di emergenza. Il combustibile utilizzato è una miscela di Uranio e Plutonio chiamata MOX (Mixed Oxide Fuel) comunemente indicato con la formula:  $U_{1-y}Pu_yO_2$ . Questa tipologia di reattori consente la chiusura del ciclo di combustibile che, grazie al riciclo delle scorie con seguente riprocessamento, rende possibile la produzione di combustibile con sole aggiunte di Uranio naturale rendendo l'impianto LFR uno dei più ecosostenibili.

### 3.2.3 Reattori GFR (Gas-cooled Fast Reactor)

Sono reattori a neutroni veloci refrigerati a gas, generalmente viene impiegato l'Elio (He) come fluido refrigerante. Essendo dei reattori autofertilizzanti come gli FBR, sfruttano un ciclo chiuso ad Uranio avvantaggiando la conversione dell'Uranio fertile. Come già detto il fluido refrigerante impiegato è l'Elio (He) che arriva ad una temperatura di uscita di circa 850 °C permettendo l'utilizzo del ciclo Bryton nella turbina a gas nella sezione BOP, innalzando notevolmente il rendimento termico. Il combustibile è impiegato in varie conformazioni al fine di operare a temperature alte garantendo comunque un'ottima ritenzione dei prodotti della fissione, dunque si avranno combustibili in ceramiche composite contenenti anche attinidi

## 4. Il reattore MYRRHA

In questo capitolo verrà affrontata l'analisi di un particolare tipo di reattore di IV generazione, il cui prototipo è in via di realizzazione in Belgio. In seguito, verranno elencate le varie fasi per la realizzazione del progetto e le componenti che andranno a formare il reattore. Il reattore MYRRHA risulta essere una delle prime proposte di reattore nucleare ad amplificazione di energia. Questa tipologia di reattori consiste in reattori nucleari subcritici ossia reattori incapaci di sostenere autonomamente una reazione di fissione a catena e dunque impossibilitati nel far avvenire reazioni incontrollate. Proprio per questo un reattore ad amplificazione di energia necessita di essere affiancato da un acceleratore di particelle che, irraggiando il nucleo del reattore, darà luogo alla reazione di fissione a catena fornendogli il necessario flusso di neutroni veloci dall'esterno. Una volta innescato il processo il nucleo produrrà sufficiente energia termica per alimentare l'acceleratore di particelle e fornirà una ulteriore quota di energia che, una volta gestita dalle sottostazioni di trasformazione, potrà essere immessa in rete.

Sicuramente il vantaggio principale di questa tecnologia è l'elevatissimo livello di sicurezza. Infatti, per fermare la reazione di fissione occorre spegnere l'acceleratore di particelle e ottenere così un successivo raffreddamento del nucleo. Un altro punto di vantaggio di questa tecnologia è la ridotta produzione di scorie ricche di Plutonio così da impedire la proliferazione nucleare. Il reattore nucleare ad amplificazione di energia è in grado di utilizzare vari tipi di combustibile partendo dal Torio, molto più abbondante dell'Uranio, per finire con lo sfruttamento del Plutonio stoccato, altrimenti utilizzabile per la proliferazione nucleare. Infine, va notato che al momento si dispone di tutta la tecnologia necessaria per la realizzazione di questa tipologia di impianto, così da non avere limiti nella sua costruzione. I limiti



attuali per la proliferazione di questa tecnologia sono sostanzialmente di natura economica, in quanto un acceleratore di particelle ha un costo molto elevato.

Il progetto MYRRHA è unico nel suo genere. Il reattore previsto nel progetto MYRRHA consiste in un reattore veloce di IV generazione raffreddato a Piombo-Bismuto e dunque funzionante a regime critico, con la possibilità di funzionare in regime subcritico grazie all'aggiunta dell'acceleratore di particelle, rendendolo idoneo ad ogni situazione e ad ogni esigenza.

La realizzazione di questo progetto precede tre fasi principali:

Fase 1: realizzare l'acceleratore lineare di particelle che produrrà un fascio neutronico da 100 MeV, parte fondamentale per il funzionamento del reattore e per l'avvenimento della reazione di fissione a catena. Durante questa fase il reattore sarà in grado di produrre energia e radioisotopi per fini medici. Questa fase sarà completata entro il 2026.

Fase 2: ampliamento dell'acceleratore lineare di particelle, arrivando alla generazione di un fascio neutronico da 600 MeV per aumentare la potenza del reattore. Questa fase sarà completata entro il 2030.

Fase 3: Realizzazione del reattore, che prevede di ospitare il vessel, che ospiterà tutti i componenti principali dell'isola nucleare, schermandolo in un contenitore in calcestruzzo armato precompresso. La fase 3 sarà ultimata nel 2036.

#### **4.1. Funzionamento di base del reattore MYRRHA**

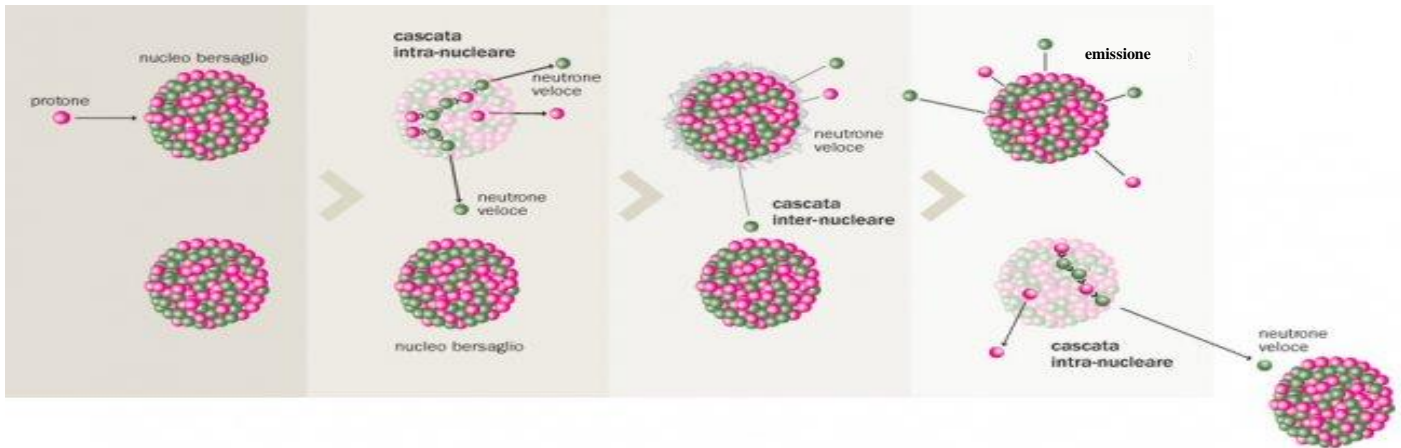
Come già detto il reattore MYRRHA risulta essere una tecnologia ibrida tra un reattore di IV generazione LFR e un reattore ad amplificazione di energia. Per quanto riguarda il funzionamento in condizione critiche, esso opererà come un reattore LFR raffreddato con eutettico di Piombo-Bismuto, il cui funzionamento verrà analizzato successivamente. Per quanto riguarda il funzionamento in condizioni sub-critiche occorre analizzare il meccanismo dell'acceleratore lineare di particelle e il fascio neutronico prodotto. In condizioni subcritiche il nucleo del reattore verrà colpito da un fascio di protoni a, per spallazione sul piombo refrigerante stesso, produrrà il flusso neutronico necessario generare a sostenere la reazione di fissione.

#### **4.2. MYRRHA ADS, Accelerator-Driven System**

Il progetto MYRRHA prevede l'utilizzo di un acceleratore lineare di particelle che andrà a costituire il "motore" del futuro impianto poiché ad esso è affidato il compito della produzione del flusso neutronico grazie al quale la reazione di fissione potrà innescarsi. Il funzionamento di tale reattore si basa sul principio della spallazione nucleare. Nel reattore subcritico i neutroni vengono generati bombardando con un fascio di protoni di alta energia, provenienti dall'acceleratore, un metallo a elevato numero atomico. Quando uno dei protoni incidenti riesce a penetrare nel nucleo, da luogo una serie di collisioni tra i neutroni e i protoni che lo costituiscono, generando così una cascata intra-nucleare. Alcuni di questi neutroni e protoni con energie sufficientemente alte possono uscire dal nucleo ed eventualmente colpire altri nuclei generando una cascata inter-nucleare. Può succedere che il nucleo originale rimanga in uno stato eccitato, emettendo altri neutroni o protoni per portarsi a uno stato stabile. Questo processo è detto di spallazione. Nel caso in cui i protoni posseggano un'energia di circa 1 GeV la spallazione è estremamente efficiente poiché genera 20-30 neutroni per ogni protone incidente. Malgrado la spallazione sia un modo di produrre neutroni sicuramente più costoso rispetto a una reazione a catena di fissione in un reattore nucleare, si ha il vantaggio che il fascio protonico arriva al bersaglio in brevissimi intervalli temporali, permettendo una accurata misura dell'energia del singolo protone proiettile. I neutroni così prodotti hanno energie fino a centinaia di MeV [9].



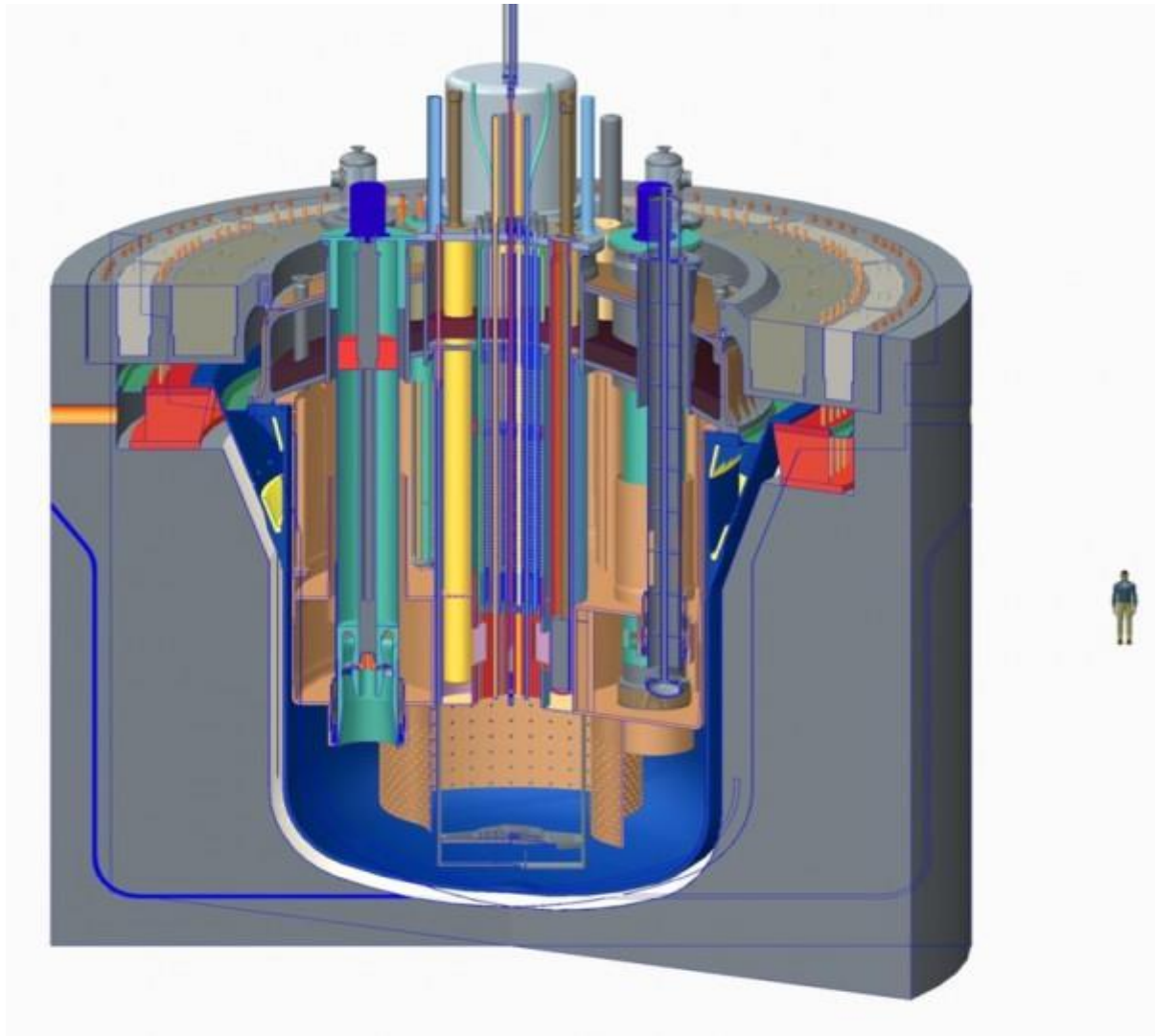
Di seguito si riporta uno schema che spiega i vari passaggi per la produzione del fascio neutronico.



Bisogna inoltre precisare che, come già citato, l'acceleratore lineare di particelle utilizza come nucleo bersaglio dei metalli pesanti, perciò, si prevede l'utilizzo di materiali come l'Uranio e il Plutonio favorendo lo smaltimento delle scorie già esistenti e impedendo la proliferazione nucleare. Nello specifico caso del progetto MYRRHA, si utilizzerà un acceleratore di particelle lineare (Linac) lungo 400 metri in grado di fornire un fascio di protoni da 600 MeV. Al momento è in fase di sperimentazione l'iniettore di protoni che provoca la reazione di spallazione e, per via indiretta, la fissione nel reattore.

#### 4.3. MYRRHA REACTOR

Il reattore che andrà a costituire il cuore del progetto è, per dimensioni, unico nel suo genere. Il reattore come già accennato sarà raffreddato da 7800 tonnellate di eutettico Piombo-Bismuto. Tutti i sistemi primari saranno confinati da una parete a doppio strato dall'altezza di 16 metri. Per quanto riguarda il livello di sicurezza del reattore è facile affermare che esso sia estremamente alto. Infatti, il reattore è progettato per funzionare in condizioni sub-critiche, non contiene dunque sufficiente materiale fissile per dare luogo alla reazione di fissione a catena, scongiurando così ogni possibile incidente con gravi emissioni di prodotti radioattivi. Si può considerare dunque lo standard di sicurezza pienamente superato in quanto il futuro reattore MYRRHA è dotato anche di raffreddamento passivo ossia, in un ipotetico guasto elettrico o quando l'acceleratore di particelle viene spento improvvisamente, il sistema di raffreddamento garantisce la circolazione naturale del fluido refrigerante che in questo caso è l'eutettico Piombo-Bismuto. Di seguito viene riportata un'immagine che rappresenta il vessel del futuro reattore MYRRHA.



È doveroso precisare che il vessel del reattore che verrà realizzato sarà alto complessivamente 10 metri e nell'immagine ci viene proposto il confronto con l'altezza media umana.

#### 4.4. MYRRHA LBE (Lead-Bismuth Eutectic)

Il fluido refrigerante del futuro reattore MYRRHA, che come descritto in precedenza sarà un impianto con tecnologia LFR, è l'eutettico di Piombo-Bismuto. Per comprendere al meglio la scelta di questo refrigerante, bisogna prima comprendere il significato e la funzione all'interno dell'impianto della miscela eutettica. Con eutettico si definisce un miscuglio di due o più sostanze il cui punto di fusione risulta essere più basso di quello delle singole componenti. In





questo caso si analizzerà l'eutettico binario Piombo-Bismuto. Uno dei numerosi vantaggi del fluido refrigerante LBE riguarda il suo punto di fusione, che risulta essere di 125 °C, molto più basso dei suoi componenti singoli (il Piombo fonde a 327 °C e il Bismuto a 271 °C), il che consente un grande risparmio energetico in quanto si dovrà fornire meno energia termica al fluido per mantenerlo allo stato liquido. Nella miscela eutettica di fluido LBE, la temperatura per il raggiungimento del punto di ebollizione è di 1670 °C, temperatura difficilmente raggiungibile nel reattore, scongiurando così possibili guasti dovuti all'ebollizione del refrigerante, e aumentando il livello di sicurezza dell'impianto. Altro vantaggio di cui si dispone utilizzando il fluido LBE è la sua alta conduttività termica e la sua capacità di schermare i raggi gamma. Visti i numerosi vantaggi del fluido LBE esso verrà impiegato come refrigerante all'interno del reattore MYRRHA e contribuirà ad aumentarne il rendimento energetico e il livello di sicurezza.

## 5. Conclusioni

La situazione sociopolitica di accettazione popolare rispetto ai reattori nucleari di IV generazione risulta essere assai complessa, soprattutto in paesi come l'Italia in cui la produzione di energia da fonte nucleare è stata abolita già dal 1987, successivamente al referendum abrogativo intervenuto dopo l'incidente nucleare di Chernobyl.

Per questo, la comunità scientifica propone, al fine di ottenere una maggiore consapevolezza sulla sicurezza della tecnologia nucleare di IV generazione da parte della popolazione, il raggiungimento di alcuni obiettivi riguardanti l'affidabilità, il costo, la resistenza alla proliferazione, la sostenibilità e lo smaltimento delle scorie da parte dei nuovi impianti.

Per tutto ciò che riguarda la sicurezza, ogni tipologia di impianto di IV generazione propone un elevatissimo standard di sicurezza intrinseca, ovvero tutti i nuovi dispositivi di sicurezza saranno attivati tramite forze naturali come la gravità o la circolazione naturale causata dalla variazione di densità. La funzione della regolazione di potenza rimane, invece, affidata alle barre di controllo utilizzate negli impianti già esistenti, la cui attuazione prevede l'utilizzo di sistemi motori.

In ambito di resistenza alla proliferazione, ogni impianto è in grado di utilizzare una vasta selezione di combustibili producendo un numero limitato di scorie difficilmente impiegabili per scopi bellici.

Producendo un numero limitato di rifiuti nucleari rispetto alle precedenti generazioni, anche gli standard di sostenibilità vengono rispettati ed inoltre, nel caso del reattore MYRRHA, così come di tutti i reattori di filiera veloce, si prevede un utilizzo attivo delle scorie a più alta pericolosità, gli attinidi minori, che -in tali reattori- possono essere riutilizzati come combustibile.

Uno degli obiettivi più difficili da raggiungere è quello della competitività economica del costo del kWh poiché, dovendo impiegare materiali innovativi per rendere il processo di fissione più sicuro e sostenibile, i costi di costruzione, manutenzione ed esercizio degli impianti risultano, ad oggi, piuttosto elevati.

La comunità scientifica, al momento, è comunque fiduciosa di poter raggiungere tutti gli obiettivi previsti, alcuni dei quali già ottenuti nei reattori prototipali attualmente esistenti, collocando l'ingresso nel campo della produzione di energia elettrica da parte dei reattori di IV generazione tra il 2030 e il 2040. Successivamente come avviene sempre nel mercato moderno, i costi di realizzazione tenderanno ad abbassarsi e la tecnologia nucleare di IV generazione godrà di una completa affermazione nel campo della produzione di energia elettrica da fonte nucleare.



## 6. Bibliografia

- [1]<http://archivio.torinoscienza.it/>
- [2]<https://www.enea.it/it/seguidi/news/nuovi-materiali-per-nuovi-reattori-di-iv-generazione-il-progetto-matteru>
- [3]<https://myrrha.be/>
- [4]<https://science.sckcen.be/en/Facilities/MYRRHA>
- [5]<http://www.matterfp7.it/Layout/matter/index.asp?page=/upload/moduli/home/public/home.asp&target=&tit=Home>
- [6][https://www.enea.it/it/Ricerca\\_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/nucleare-fissione/reattori-innovativi/rse90.pdf](https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/nucleare-fissione/reattori-innovativi/rse90.pdf)
- [7][https://www.enea.it/it/Ricerca\\_sviluppo/energia/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/nucleare-iv-gen/2012/rds-2013-036.pdf](https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/energia/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/nucleare-iv-gen/2012/rds-2013-036.pdf)
- [8]  
[https://www.enea.it/it/Ricerca\\_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/nucleare-iv-gen/2014/rds-par2014-220.pdf](https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema-elettrico/nucleare-iv-gen/2014/rds-par2014-220.pdf)
- [9]<https://www.asimmetrie.it/neutroni-sonde-e-alchimia>
- [10] Di Palma, L. Tecnologia dei materiali e chimica applicata