

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

***Relazione per la prova finale
«Propulsione Nucleare Termica per
Veicoli Aerospaziali»***

Tutor universitario: Prof. Bertani

Laureando: *Alberto Vedova*

Padova, 22/03/2024

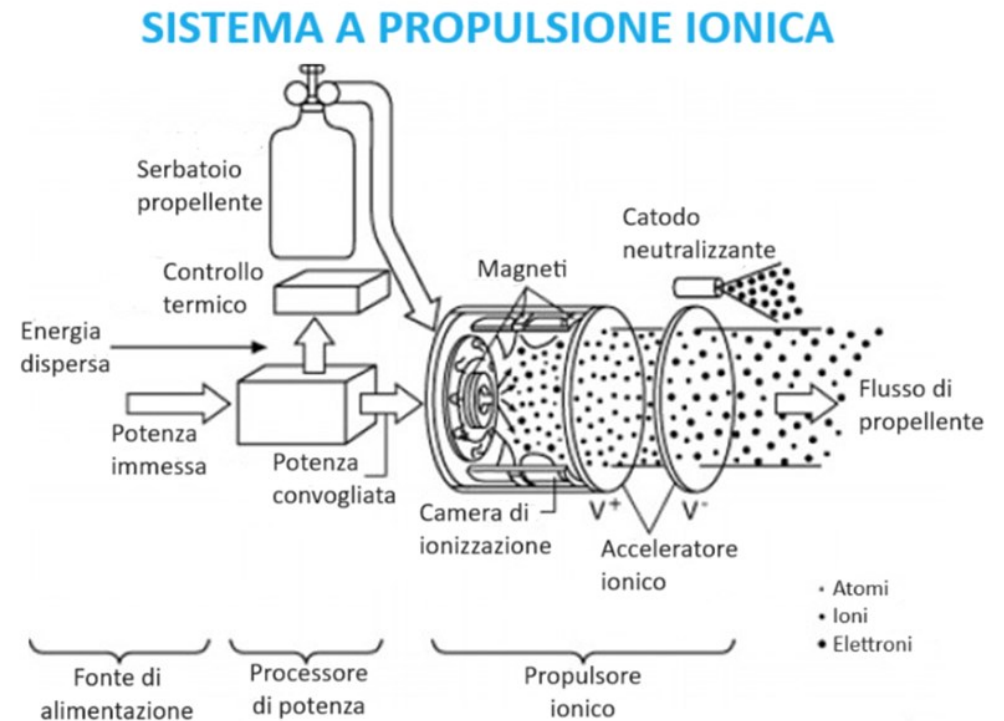
L'utilizzo di energia nucleare come mezzo di propulsione per veicoli spaziali è stato studiato fin dagli anni '50, e ha avuto grande sviluppo specialmente tra gli anni '60 e '70 grazie ai progetti Orione e Dedalo, accantonati poi per accordi internazionali in tema di nucleare e per mancanza di tecnologie avanzate

Negli ultimi anni però la necessità di trovare sistemi di propulsione alternativi a quelli tradizionali che permettano di realizzare viaggi interplanetari senza dover sacrificare enormi spazi allo stoccaggio di combustibile, ha riportato l'attenzione delle agenzie spaziali su sistemi nucleari che sfruttino l'energia nucleare prodotta tramite fissione, e visti i progressi che la ricerca ha raggiunto nel frattempo, si è iniziata a valutare anche la fusione nucleare, con la speranza di poterla sviluppare maggiormente parallelamente al progresso che raggiungerà il suo studio negli impianti terrestri

Per poter muovere satelliti, sonde, navicelle o stazioni spaziali attualmente esistono tre differenti tipologie di propulsori

- I propulsori a gas freddi o inerti sono costituiti da serbatoi contenenti gas compressi, i quali, senza preriscaldarsi, si espandono attraverso gli ugelli e generano la spinta.
- I propulsori chimici sono costituiti da serbatoi contenenti il combustibile e il comburente, sostanze che bruciano nella camera di combustione, e raggiunte le temperature previste il propellente è espulso attraverso gli ugelli per generare la spinta voluta.
- I propulsori elettrici sono per lo più costituiti da serbatoi contenenti un gas, il quale viene ionizzato e successivamente accelerato per generare la spinta voluta. A causa della bassa spinta garantita questi propulsori non possono essere usati in fase di decollo, ma solo per eseguire manovre in orbita

I sistemi a propulsione nucleare elettrica (NEP) sono quelli maggiormente studiati al momento. In questi sistemi, il calore generato dalla fissione viene portato da un liquido refrigerante in un circuito chiuso fino ad un sistema di conversione di potenza, dove viene utilizzato per generare elettricità. L'elettricità, quindi, alimenta uno dei sistemi di propulsione elettrica che accelerano gli ioni e li espellono dai propulsori ad alta velocità. Dal momento però che solo una piccola parte dell'energia prodotta è tradotta in spinta è quindi necessaria la presenza di enormi radiatori per dissipare il calore superfluo nello spazio. Inoltre, il sistema deve essere continuamente tenuto a massimo regime per fornire l'energia necessaria, rendendo così più probabile il suo danneggiamento.



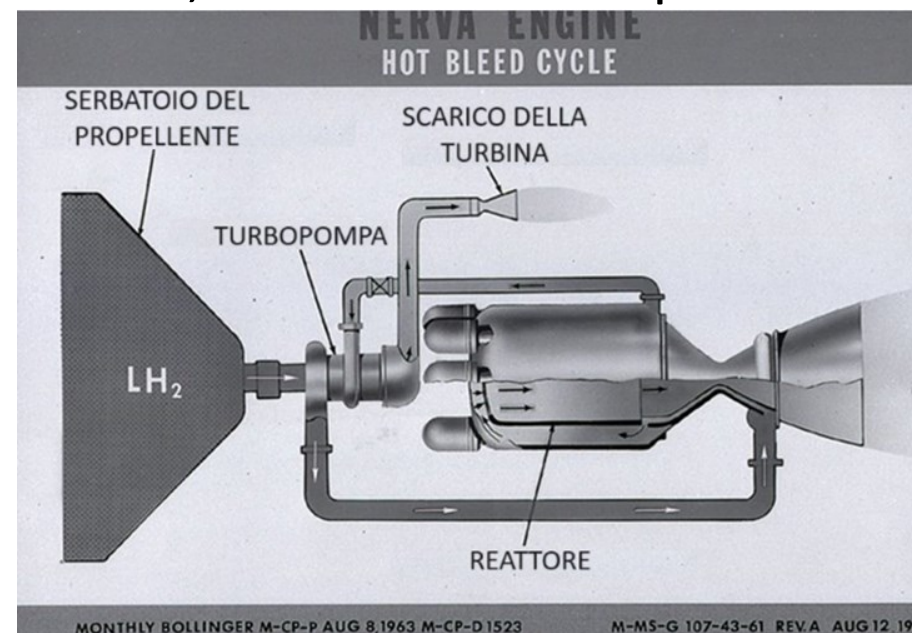
I sistemi con propulsione nucleare termica generano la spinta emettendo il liquido refrigerante (riscaldato dal processo di fissione) fatto scorrere nel reattore direttamente dall'ugello. Questi sistemi devono essere quindi progettati per funzionare alla temperatura dei gas di scarico, ovvero >2.200 K. Tuttavia, i sistemi NTP hanno tipicamente tempi di funzionamento molto più brevi dei reattori nucleari elettrici. Inoltre i sistemi NTP hanno requisiti di temperatura più elevati per propellente e materiali strutturali rispetto ai sistemi NEP, ma hanno il potenziale per fornire una spinta sufficientemente elevata da permettere di effettuare le missioni con tempistiche ridotte. A differenza dei sistemi NEP, nei sistemi NTP il 95% del calore generato viene dissipato nello spazio, evitando la necessità di utilizzare grandi radiatori.

Si dividono in quattro categorie:

- Reattori a nucleo solido
- Reattori a propellente liquido
- Reattori a nucleo di gas a ciclo chiuso
- Reattori a nucleo di gas a ciclo aperto

Il modello a nucleo solido è il più semplice tra i reattori nucleari, in quanto richiede meno operazioni per essere messo in funzione. In questi razzi, un reattore nucleare che utilizza combustibile solido viene utilizzato per riscaldare un gas propellente, generalmente idrogeno. Poiché il gas raffredda il reattore ed è propellente, il flusso di carburante viene solitamente avviato prima dell'avvio del reattore stesso e continua per un po' dopo lo spegnimento del reattore. Questo comporta una particolare attenzione da parte dei piloti nelle operazioni che richiedono l'utilizzo dei motori, a differenza di quanto avviene coi reattori chimici.

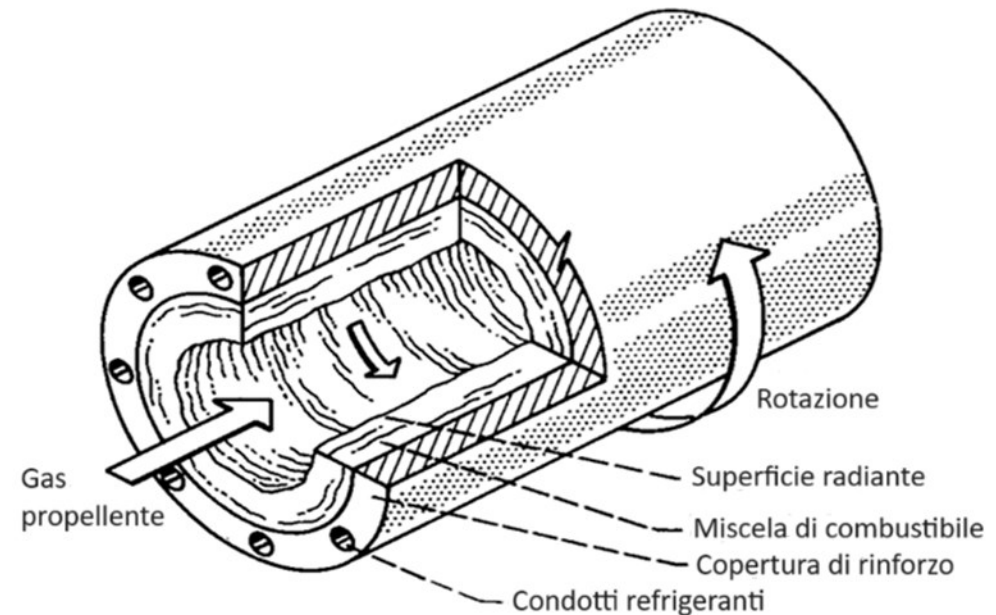
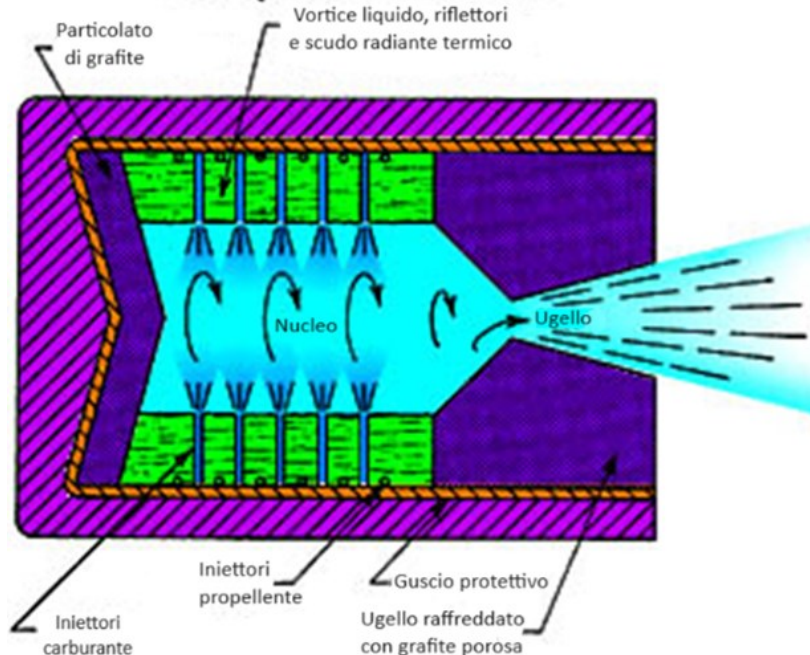
I tipi di combustibile utilizzato possono variare in un'ampia scala di grandezze e forme, con l'obiettivo di massimizzare la superficie di contatto tra combustibile nucleare e propellente.



- Una variante si ha con un sistema indiretto che impiega uno scambiatore di calore per trasferire l'energia termica dal refrigerante all'idrogeno propellente. Un potenziale vantaggio di un tale sistema è che è meno probabile che il pennacchio di scarico venga contaminato da prodotti di fissione, che è un problema con un sistema diretto.
- I sistemi NEP si basano su questo modello di reattore, con la differenza che il gas o liquido refrigerante, anziché funzionare come propellente, viene utilizzato per alimentare un trasformatore di potenza, il quale garantisce l'energia elettrica necessaria per ionizzare il gas propellente.
- Inizialmente il combustibile era una struttura composta di grafite, con frammenti di uranio sospesi nella grafite, mentre attualmente gli studi si concentrano sul CERMET, che unisce i vantaggi del combustibile fissile ceramico con la conduttanza termica e la tenacità del metallo, e i carburi, in varie forme, perché hanno tolleranze al calore incredibilmente elevate.

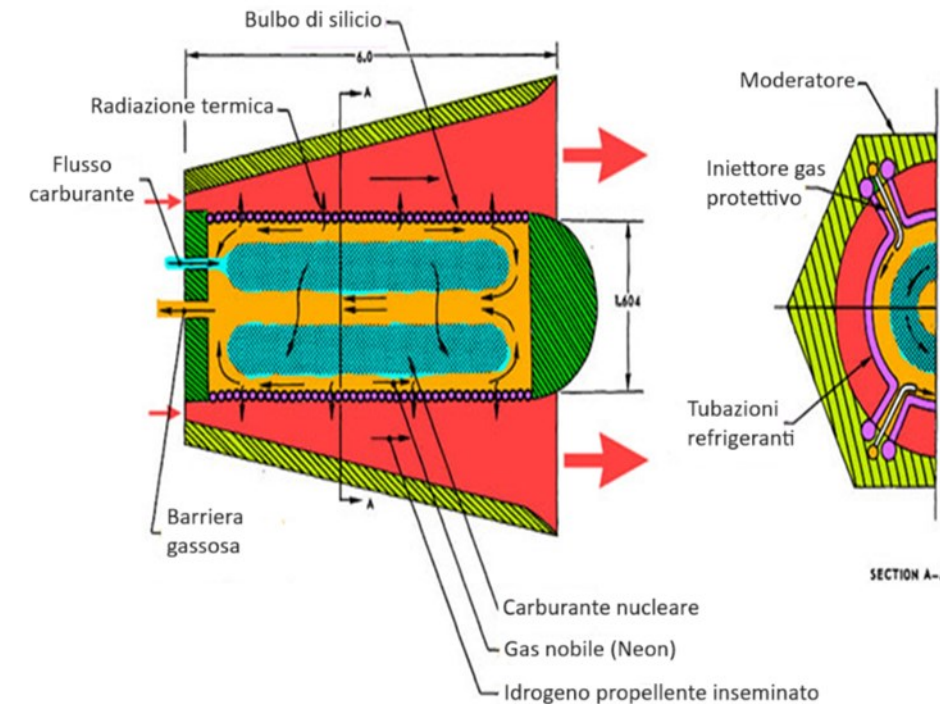
Prevede l'aumento della temperatura del propellente consentendo al combustibile di sciogliersi, ottenendo così temperature più elevate.

I reattori di questo tipo sfruttano la forza centrifuga per mantenere il carburante fuso all'interno di un tubo, con un canale centrale che funge da punto di uscita del propellente. Si possono riscontrare poi due tipologie di modelli: in una, detta «a gorgogliatore» il propellente viene fatto scorrere sia dall'esterno, sia nel canale centrale; quello «a radiatore» fa passare il propellente solo attraverso il canale centrale.



- Il modello «a gorgogliatore» ha il vantaggio di poter utilizzare un'incredibile quantità di superficie per il trasferimento di calore dal combustibile al propellente, e permette di venire raffreddato come conseguenza naturale del modo in cui il propellente viene immesso nel combustibile. Ma va affrontato il problema che allo spegnimento del reattore il carburante si solidifica, rischiando di ostruire il meccanismo, e la rottura delle bolle di combustibile in superficie può scagliare carburante fuso nel flusso di propellente in rapido movimento, causando la perdita di carburante
- I reattori «a radiatore» evitano molti problemi di quelli «a gorgogliatore», trattando il combustibile quasi come una massa solida quando è sottoposta a forza centrifuga: il propellente entra dall'estremità della nave e quindi fuoriesce dall'estremità poppiera per entrare nell'ugello. Parte del carburante viene persa per evaporazione e le emissioni termiche non andranno solo nel propellente, ma anche nella bombola del carburante e nel reattore stesso, richiedendo una configurazione idraulica più complessa all'interno del corpo del reattore.

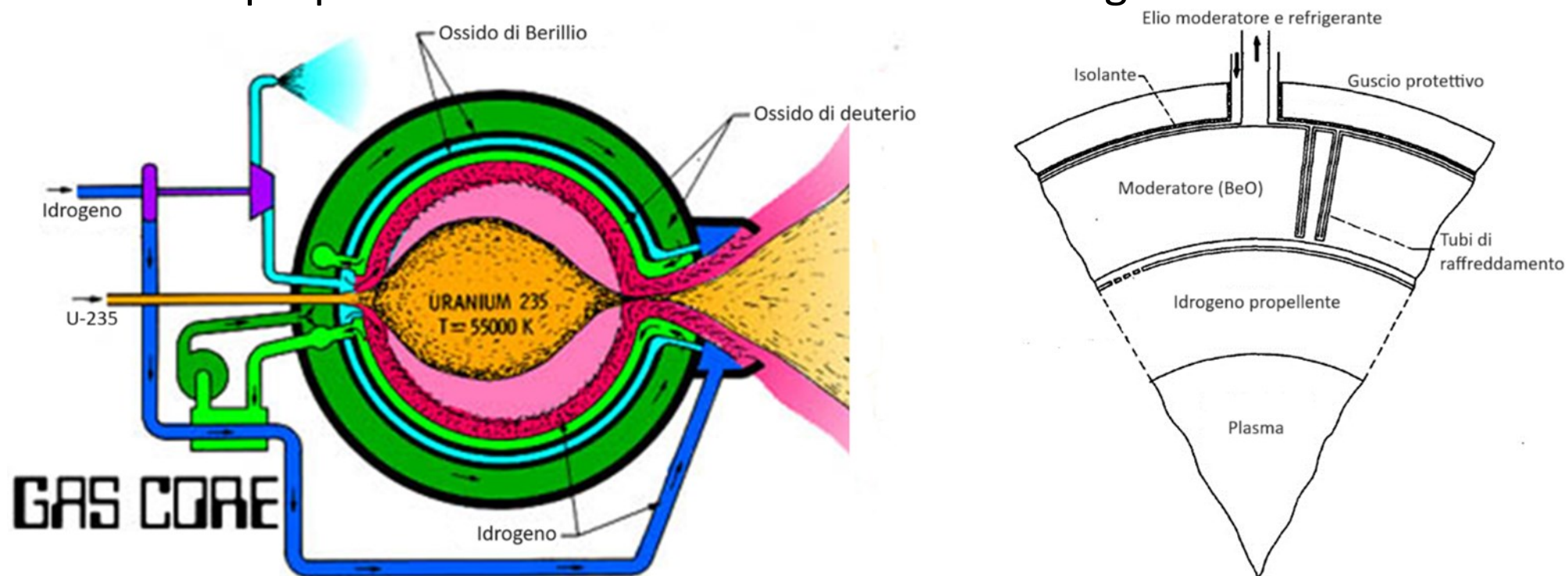
Se si riuscisse a evitare il rilascio di prodotti di fissione nell'ambiente, si potrebbe consentire l'utilizzo di un NTR nei lanci di superficie. Si è quindi studiato un nuovo metodo di propulsione, detto a nucleo di gas a ciclo chiuso. Il nucleo del gas a ciclo chiuso utilizza l'esafluoruro di uranio (UF_6) come combustibile, il quale è contenuto all'interno di un "bulbo" di silicio fuso formato da dozzine di tubi molto sottili che contengono il combustibile fissile e impediscono la fuoriuscita dei prodotti di fissione. Il combustibile si trasforma da gas a plasma e forma un vortice al centro dell'elemento combustibile. L'idrogeno liquido che agisce come propellente viene fatto scorrere attorno al bulbo di silicio e una volta passato allo stato gassoso viene espulso dall'ugello del reattore.



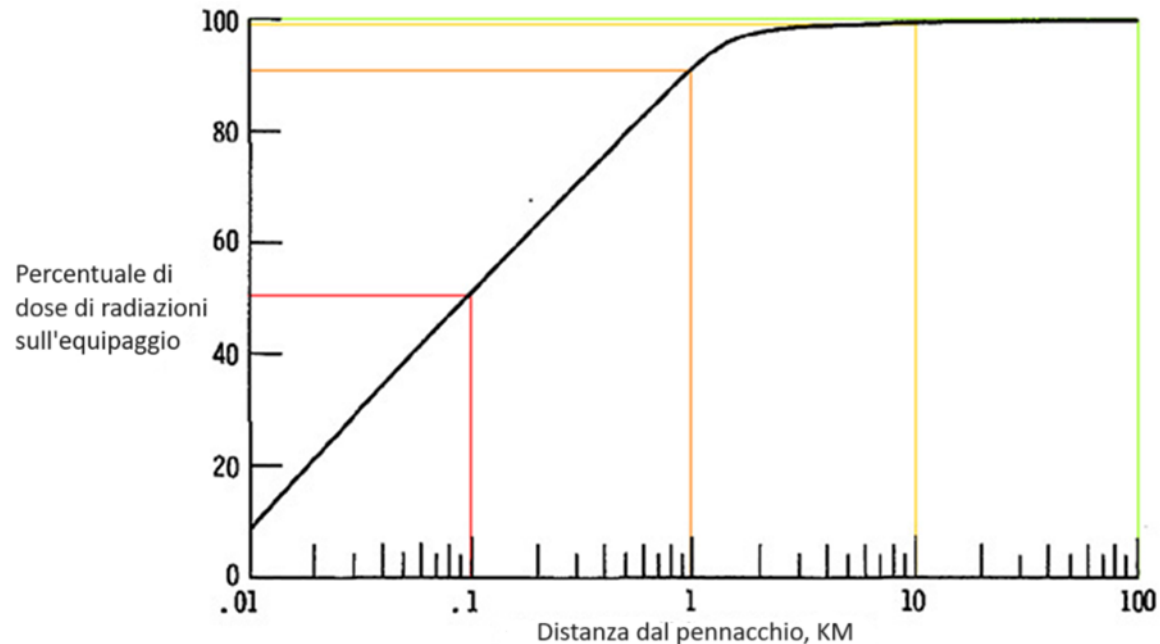
Per proteggere il bulbo dal contatto diretto con l'uranio, tra il combustibile e la parete del bulbo stesso viene iniettata una barriera gassosa di gas nobile. A causa delle temperature estreme, gran parte della radiazione elettromagnetica che esce dal combustibile è ultravioletta, a cui la silice non è trasparente. Al flusso di gas nobili vengono aggiunte microparticelle della stessa silice per assorbire parte della radiazione prima che colpisca il bulbo. Questo gas passa attorno alle pareti della camera ed esce da una delle estremità. Passa quindi attraverso un processo di purificazione e raffreddamento utilizzando uno scambiatore di calore a idrogeno e una centrifuga a gas, per poi essere riutilizzato.

C'è però ancora un'intensa quantità di energia generata nel carburante; quindi, il bulbo deve essere raffreddato in modo rigenerativo per mezzo dell'idrogeno liquido. L'idrogeno gassoso proveniente dai processi di raffreddamento del gas e del bulbo viene miscelato con microparticelle di tungsteno per aumentare la quantità di radiazione UV assorbita dal carburante. Questo passa quindi intorno ai bulbi nel reattore, riscaldandosi alla loro temperatura finale, prima di uscire dall'ugello dell'NTR.

È il modello più complesso, meno studiato ma allo stesso tempo più promettente. Questo motore utilizza nuovamente un gas o plasma di materiale fissile, ma non utilizza una solida struttura di contenimento tra sé stesso e il propellente. Sfrutta però due modalità di contenimento differenti: utilizzando la pressione gasdinamica, sfruttando il flusso del propellente nonché l'inerzia del carburante stesso, per contenere il carburante; in alternativa è stato proposto anche il contenimento elettromagnetico.



- L'idrogeno propellente viene fatto scorrere attorno al combustibile riscaldandosi e venendo espulso dall'ugello generando la spinta. Anche i prodotti di fissione vengono espulsi all'esterno del razzo, motivo per cui durante la generazione del pennacchio va garantita la protezione dell'equipaggio da eventuali raggi gamma provenienti da esso.
- Questi possono essere generati quando si ha una quantità microscopica di materiale espulso con energia cinetica sufficiente per rifluire verso il veicolo, oppure dal decadimento ritardato dei frammenti di fissione che passano attraverso l'ugello.



- Purtroppo, a causa delle sfide estreme legate al contenimento del combustibile fissile e dei prodotti di fissione senza una barriera solida, i tassi di perdita di combustibile fissile sono troppo elevati per i sistemi gasdinamici. I sistemi confinati elettromagneticamente invece richiedono intensità di campo al di là di ciò che è pratico per un veicolo spaziale.
- Dal momento che l'idrogeno è trasparente alla radiazione termica, serve contenere il riscaldamento delle pareti del reattore. Si aggiunge quindi della polvere di tungsteno al propellente per ovviare a questa problematica.
- Per aumentare l'impulso specifico generabile si può utilizzare un radiatore di calore per raffreddare le pareti e la camera di reazione così da poter raggiungere temperature maggiori, andando però ad aggiungere molta massa al motore. Sarebbe possibile raggiungere impulsi ancora maggiori se si riuscisse a trovare un materiale con assorbimento migliore della radiazione termica. I radiatori inoltre sono necessari a dissipare il calore generato dai raggi gamma, che non possono essere assorbiti dal propellente.

Il propellente più comunemente utilizzato è l'idrogeno, che garantisce i valori di impulso specifico più elevati grazie alla sua massa atomica ridotta, ma va incontro a una serie di complicazioni dovute alla sua reattività, trasparenza alle radiazioni, ingombro e volatilità. Sono stati quindi studiati altri tre gas alternativi:

- Anidride carbonica, utile per le missioni marziane per la sua reperibilità, ma con complicazioni dovute alla dissociazione del carbonio ad alte temperature
- Metano, con stessi vantaggi e problematiche della CO₂, ma per missioni su Titano e fasce di asteroidi
- Ammoniaca, non presenta il problema della dissociazione essendo composta da due gas, ma presenta una reperibilità decisamente inferiore.

Inoltre per migliorare le prestazioni dell'idrogeno si può utilizzare:

- Ossigeno liquido, iniettato nell'idrogeno all'uscita dal reattore per poi essere innescato, garantisce una spinta aggiuntiva a discapito dell'impulso specifico
- Inseminazione, realizzata con particolato di tungsteno, necessaria nei reattori a nucleo di gas a ciclo aperto per ovviare alla trasparenza alle radiazioni dell'idrogeno

Per la realizzazione di missioni interplanetarie di distanza sempre maggiore sarà necessario trovare soluzioni alternative ai sistemi di propulsione attualmente utilizzati, perché richiederebbero ingombri di combustibile e propellente troppo elevati, e la durata dei viaggi risulterebbe troppo elevata.

La propulsione nucleare termica rappresenta una soluzione praticabile nel prossimo futuro ed è stata ampiamente studiata e testata nelle sue varie possibilità, ma restano ancora diversi punti critici da risolvere:

- Utilizzo di materiali in grado di sopportare la temperatura di fusione
- Schermatura dalle radiazioni sia per l'equipaggio che per le componenti elettroniche
- Resistenza alle vibrazioni e forze attrattive sia in fase di lancio che fase di atterraggio, che possono causare danni strutturali o destabilizzare il flusso di propellente
- Sviluppo di sistemi di alimentazione a radioisotopi che riescano a sfruttare la disponibilità di plutonio nei reattori
- Ogni missione ha poi delle problematiche dovute alle singole condizioni che si andranno a incontrare

- Space Nuclear Propulsion for Human Mars Exploration -*The national academies press*
- Guidance, Navigation, and Control Considerations for Nuclear Thermal Propulsion
-*Nasa Technical Report Server*
- The Liquid Annular Reactor System (LARS) propulsion -*Nasa Technical Report Server*
- Conceptual design study of a liquid-core nuclear rocket technical report no. 665
-*Nasa Technical Report Server*
- Investigation of gaseous nuclear rocket technology Summary technical report
-*Nasa Technical Report Server*
- Nuclear light bulb -*Nasa Technical Report Server*
- Crew radiation dose from the plume of a high impulse gas-core nuclear rocket during a Mars mission -*Nasa Technical Report Server*
- Nuclear propulsion: A vital technology for the exploration of Mars and the planets beyond -*Nasa Technical Report Server*
- “Bimodal” Nuclear Thermal rocket (bntr) propulsion for future human Mars exploration missions -*Nasa Technical Report Server*