

LA CORSA ALLA FUSIONE NUCLEARE

Gianni Comini

CISM - Dipartimento di Energia e Ambiente

Piazza Garibaldi 18 - 33100 Udine

gianni.comini@cism.it

12 gennaio 2023

1 La ricerca dell'energia pulita

Dagli anni '60 del secolo scorso, la fusione nucleare ha rappresentato la promessa mai mantenuta di un'energia pulita in grado di soddisfare tutte le esigenze energetiche dell'umanità per un tempo indefinito. Di conseguenza molti, tra i quali il sottoscritto, sono stati piacevolmente sorpresi dagli avvenimenti degli ultimi mesi e, in particolare, dall'annuncio ufficiale di martedì 13 dicembre 2022 con cui Jennifer Granholm, Ministro per l'Energia degli Stati Uniti, ha comunicato che il 5 dicembre 2022 i ricercatori della NIF (National Ignition Facility ovvero Gruppo Nazionale Ignizione) del Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) in California avevano realizzato una reazione di fusione nucleare dalla quale si era ottenuta più energia di quella utilizzata per "innescarla". Ciò significava che un conto alla rovescia, sia pure lungo, per la realizzazione dei primi reattori a fusione commerciali poteva dirsi cominciato.

L'annuncio non era giunto inaspettato poiché:

- già l'8 agosto 2021, i ricercatori del NIF avevano realizzato una reazione di fusione dalla quale si erano ottenuti 1,3 MJ di energia, pari al 70% dell'energia utilizzata per l'innesco (1,86 MJ), mentre subito dopo
- il 21 dicembre 2021, i ricercatori del gruppo JET (Joint European Torus - Progetto Condiviso Europeo di Camera Toroidale) di Oxford avevano prodotto 59 MJ di energia da fusione (una quantità più che doppia rispetto ai 21,6 MJ del record precedente del gruppo risalente ancora al 1997) e, finalmente, nello storico esperimento esperimento citato all'inizio
- i ricercatori del NIF avevano ottenuto 3,15 MJ di energia, pari al 154% dell'energia utilizzata per l'innesco (2,05 MJ).

Al di là degli entusiasmi, tuttavia, i dati vanno interpretati correttamente perché, ad esempio, i 3,15 MJ di energia prodotti sono superiori del 54% ai 2,05 MJ di energia assorbiti dal bersaglio ma, per fare assorbire 2,05 MJ di energia al bersaglio (una sferetta del

diametro di un circa 2 millimetri), i 192 laser impiegati nell'esperimento hanno utilizzato ben 322 MJ di energia. (I restanti, quasi 320 MJ di energia, sono stati riflessi o dispersi).

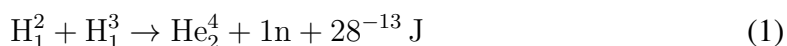
Pertanto l'esperimento del 5 dicembre 2022 è un importantissimo successo scientifico ma non si qualifica come un successo impiantistico. Infatti, per arrivare alla produzione commerciale di energia da fusione il percorso è ancora lungo anche se, probabilmente, non richiederà tutto il tempo considerato necessario dalle stime pessimistiche (e magari non del tutto disinteressate) dei fautori di altre tecnologie. Negli anni scorsi, del resto, lo sviluppo dei vaccini anti-COVID ha mostrato che i tempi di attesa si abbreviano nel caso di sforzi convergenti di più gruppi di ricerca stimolati da investimenti che, in caso di successo, portano ad enormi profitti.

D'altra parte, come diceva Nils Bohr (1885-1962, Premio Nobel per la Fisica nel 1922 e fondatore della scuola quantistica di Copenhagen): "Le previsioni sono sempre difficili, soprattutto quando riguardano il futuro". Pertanto, nel seguito non si faranno previsioni sui tempi necessari a completare il percorso, ma ci si limiterà a fornire alcune informazioni sulle basi fisiche ormai acquisite del processo e sui passi tecnologici compiuti e da compiere per arrivare all'auspicato traguardo degli impianti commerciali a fusione.

2 L'imitazione del Sole

L'energia generata dal Sole deriva dalla fusione di nuclei leggeri quali gli isotopi di idrogeno e litio. Idrogeno e litio, però, abbondano anche sulla Terra e, quindi, è naturale la speranza di potere utilizzare la fusione nucleare degli stessi nuclei come una sorgente di energia primaria sostanzialmente inesauribile al pari dell'energia solare.

La più promettente tra le possibili reazioni di fusione coinvolge il deuterio e il trizio, due isotopi pesanti dell'idrogeno. Il nucleo dell'idrogeno H_1^1 è formato da un solo protone e $1-1 = 0$ neutroni, mentre il nucleo del deuterio $D = H_1^2$ è formato da 1 protone e $2-1 = 1$ neutroni e quello del trizio $T = H_1^3$ da 1 protone e $3-1 = 2$ neutroni. La fusione di deuterio e trizio dà origine all'isotopo più comune dell'elio, cioè elio-4 = He_2^4 , il cui nucleo è formato da 2 protoni e $4-2 = 2$ neutroni e, in aggiunta, libera 1 neutrone e genera una quantità di energia ΔE equivalente (in base alla relazione di Einstein: $\Delta E = C^2 \Delta m$), alla perdita di massa Δm dei partecipanti alla reazione. In ultima analisi, si ha:



Dal punto di vista energetico, si può stimare che l'energia ottenuta dalla fusione di un'unità di massa di deuterio e trizio sia pari a circa $1,1 \cdot 10^7$ volte l'energia ottenuta dalla combustione di un'unità di massa di carbone. Ciò significa che 1 grammo di miscela utilizzata per la fusione nucleare libera la stessa energia di $1 \cdot 10^7$ g, ovvero 10 tonnellate di carbone.

(Infatti, alla reazione di fusione sopra riportata partecipano una mole di deuterio e una di trizio, cioè il numero di Avogrado, pari a $6,02 \cdot 10^{23}$ di atomi di deuterio, ed altrettanti di trizio per un totale di 5 g di miscela. Pertanto 5 grammi di miscela generano

$$28 \cdot 10^{-13} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 168,6 \cdot 10^{10} \text{ J}$$

Il carbone ha un potere calorifico di circa $30 \cdot 10^7$ J/kg, ovvero $30 \cdot 10^4$ J/g e, quindi, pari a $150 \cdot 10^4$ joule per 5 grammi. Pertanto il rapporto tra l'energia prodotta dalla fusione di 5 g di miscela di deuterio e trizio e quella prodotta dalla combustione di 5 g di carbone è pari a

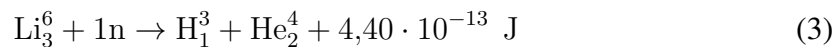
$$\frac{168,6 \cdot 10^{10}}{150 \cdot 10^4} \approx 1,1 \cdot 10^7$$

come specificato all'inizio.)

Affinché venga raggiunta l'accensione controllata di una reazione di fusione, occorre che la temperatura sia mantenuta a valori dell'ordine di $100 \cdot 10^6$ °C (cento milioni di gradi Celsius, ovvero oltre sei volte la temperatura massima nel Sole). Inoltre, il prodotto della densità N della miscela (espressa in particelle per centimetro cubo) per l'intervallo di tempo Δt di permanenza a quella densità (espresso in secondi), deve essere tale da soddisfare la condizione di Lawson

$$N \Delta t > 5 \cdot 10^{14} \frac{\text{particelle} \cdot \text{secondo}}{\text{centimetro cubo}} \quad (2)$$

Il deuterio occorrente per la reazione si può ricavare dall'acqua del mare, mentre non è reperibile nell'ambiente il trizio, che ha un nucleo radioattivo ed è caratterizzato da un tempo di dimezzamento di dodici anni. Il trizio si può, comunque, ottenere dal litio, disponibile in natura in grandi quantità sotto forma di una miscela al 7,5% di litio-6 = Li_3^6 e 92,5% di litio-7 = Li_3^7 . A tal fine, le pareti interne dei reattori di fusione vengono ricoperte da schermi protettivi a base di litio in grado di assorbire i neutroni generati dalla fusione. Quando questi neutroni vengono assorbiti, nel materiale degli schermi si verifica una delle seguenti due reazioni:



o



La reazione (3) è più probabile, perché è esotermica e coinvolge il litio-6 che ha elevate capacità di cattura. La reazione (4) è meno probabile perché è endotermica e coinvolge il litio-7 che ha ridotte capacità di cattura ma, in compenso, la reazione (4) ha il vantaggio di non consumare neutroni. Il trizio prodotto negli schermi può essere periodicamente rimosso e riciclato nel plasma come combustibile. In un certo senso, quindi, si può dire che una volta ricavato il deuterio dall'acqua di mare, basta innescare la fusione per ottenere il trizio e alimentare "con l'acqua", per tutto il ciclo di vita, un reattore a fusione di deuterio e trizio.

Il problema principale, nella realizzazione di un reattore a fusione, è costituito piuttosto dalla necessità di mantenere confinata la miscela di deuterio e trizio a temperatura e densità superiori a quelle previste dalla condizione di Lawson. Nessun contenitore materiale è concepibile per queste condizioni estreme e, di conseguenza, le ricerche si sono tradizionalmente rivolte verso tecnologie di confinamento di tipo magnetico od inerziale.

2.1 Confinamento magnetico

Sino a questo momento, la produzione di energia dalla fusione è stata perseguita principalmente attraverso la tecnica del confinamento magnetico nei "tokamak" (acronimo russo

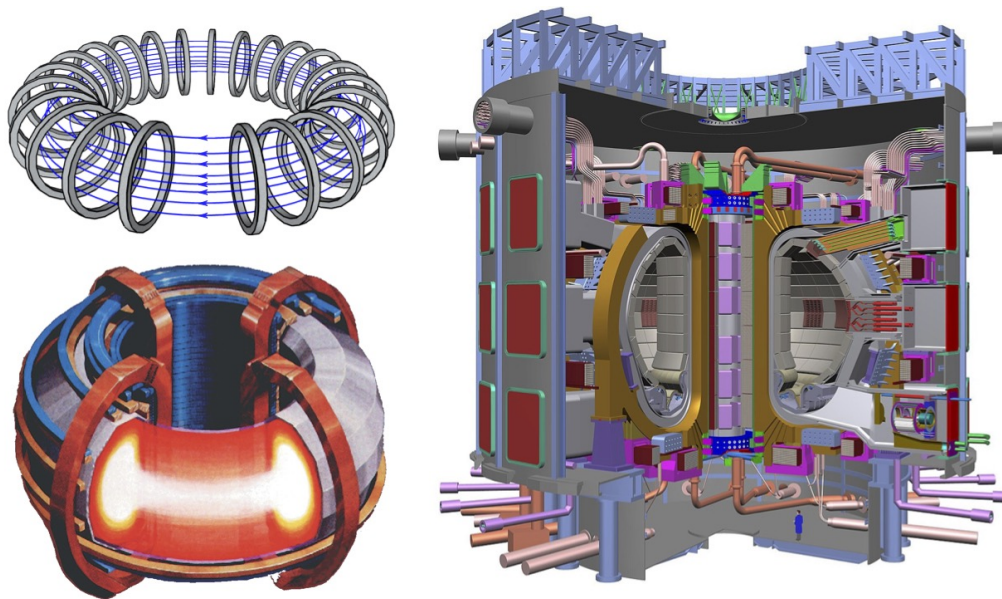


Figura 1: Fusione nucleare con reattore a confinamento magnetico. Sopra a sinistra: avvolgimento magnetizzante [Wikipedia, Creative Commons (modificata)]; sotto a sinistra: rappresentazione artistica del plasma confinato, e a destra ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor - Reattore Termonucleare Internazionale Sperimentale ed, evidentemente, anche “cammino” in latino [US Department of Energy, Public Domain (modificate)]).

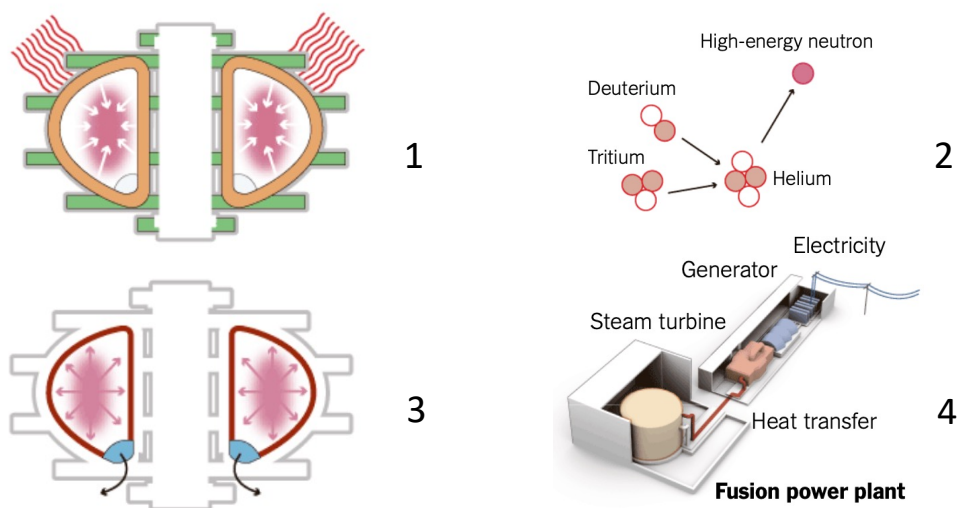


Figura 2: Fusione nucleare con reattore a confinamento magnetico: (1) plasma reattivo confinato dal campo magnetico, (2) esempio di reazione nucleare di fusione, (3) i neutroni liberati colpiscono le pareti metalliche generando calore che viene utilizzato nella centrale termoelettrica a fusione (4) [New York Times (modificata)].

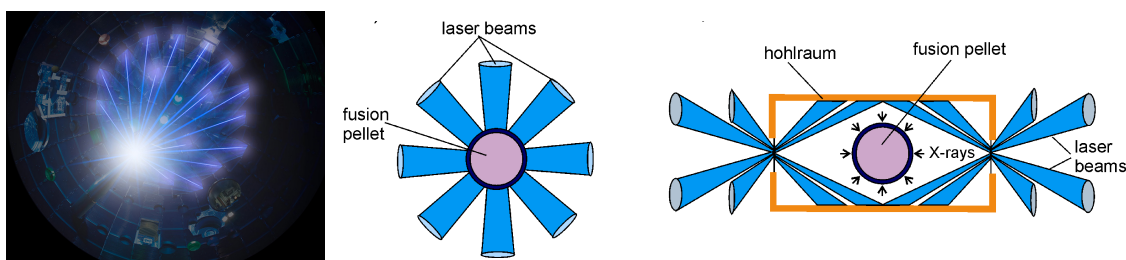


Figura 3: A sinistra: istantanea di un innesco di fusione [LLNL]. Al centro: innesco per irraggiamento diretto e a destra innesco per irraggiamento indiretto [J. Badziak (modify)].

per “camera toroidale con spire magnetiche”). Questa, ad esempio, è l’idea alla base di ITER, il progetto finanziato dall’Unione Europea e da sei Paesi, tra cui gli Stati Uniti che ha portato alla costruzione a Cadarache nel sud della Francia del tokamak più grande al Mondo con l’obiettivo di entrare in funzione nel 2025 e raggiungere l’ignizione nel 2035.

Nel reattore ITER, schematizzato nella Figura 1, le particelle di materia sono riscaldate con onde radio e microonde sino ad arrivare a temperature e densità superiori a quelle previste dalla condizione di Lawson. In tale stato termodinamico le particelle esistono sotto forma di plasma, con nuclei (positivi) ed elettroni (negativi) liberi da legami reciproci ma in proporzioni tali da rendere elettricamente neutra la miscela. Quindi, nel plasma le particelle in movimento sono assimilabili a correnti elettriche che possono essere confinate nel volume toroidale da un potentissimo campo magnetico esterno come indicato nella Figura 2.1.

A regime, i nuclei e gli elettroni del plasma confinato nel tokamak possiedono un’energia cinetica elevatissima (in quanto proporzionale alla temperatura) e, in base (ad esempio) alla reazione di fusione tra deuterio e trizio, richiamata nella Figura 2.2, quando si urtano possono fondersi liberando neutroni a loro volta dotati di alta energia. A quel punto, come indicato nella Figura 2.3, i neutroni liberati colpiscono le pareti della camera toroidale generando calore, mentre l’elio prodotto dalla reazione viene rimosso dal fondo. Come indicato schematicamente nella Figura 2.4, il calore generato dalla reazione dovrà essere asportato da un circuito intermedio (ad esempio a sodio liquido e quindi in grado di operare ad altissime temperature) e da questo fornito ad un generatore di vapore del tipo “a recupero”, in modo da sostituire funzionalmente le caldaie utilizzate nelle centrali termoelettriche tradizionali.

2.2 Confinamento inerziale

L’innesco di una fissione nucleare a confinamento inerziale, del tipo di quella fotografata nella Figura 3 a sinistra, prevede l’impiego di numerosi raggi laser concentrati su un unico bersaglio. Tali raggi possono essere utilizzati con le modalità alternative dell’irraggiamento diretto, il cui principio è schematizzato nella Figura 3 al centro, o dell’irraggiamento indiretto, il cui principio è schematizzato nella Figura 3 a destra.

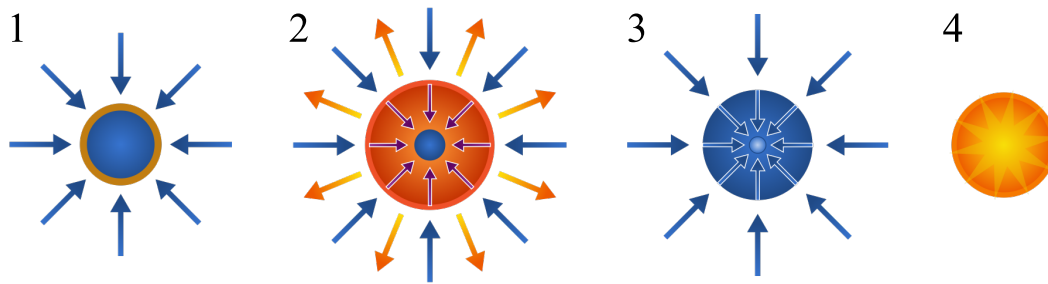


Figura 4: Schema del processo di fusione nucleare a confinamento inerziale e irraggiamento diretto: (1) arrivo dei raggi laser sulla superficie della sfera di deuterio e trizio; (2) eiezione del materiale superficiale e, per reazione, compressione e riscaldamento della parte centrale; (3) alla fine della fase di compressione il centro raggiunge densità e temperatura critiche e (4) l'esplosione termonucleare distrugge il residuo della capsula generando una quantità di energia che può essere molto superiore all'energia fornita [Wikipedia, Creative Commons (modificata)].

Nell'irraggiamento diretto, adottato nella maggior parte dei centri di ricerca europei, si procede come indicato nella Figura 4. Le vampe di energia emesse dai laser disposti simmetricamente arrivano senza riflessioni alla superficie di una capsula sferica di combustibile costituito da una miscela di deuterio e trizio solidi (perché a bassissima temperatura) del diametro di un paio di millimetri. L'arrivo dell'energia irraggiata dai laser causa un rapidissimo aumento di temperatura che, a sua volta, induce l'eiezione, ad altissima velocità, di uno strato di materiale superficiale. In questo modo, la parte centrale delle capsule viene compressa e portata a temperature e densità superiori a quelle critiche previste da Lawson, innescando una reazione di fusione nucleare, potenzialmente in grado di generare una quantità di energia molte volte superiore alla quantità fornita. Poiché l'aspetto essenziale del meccanismo di compressione è lo sfruttamento del principio di conservazione della quantità di moto, questa modalità di fusione viene definita "a confinamento inerziale".

Nell'irraggiamento indiretto, adottato nel Lawrence Livermore National Laboratory (e nella maggior parte dei centri di ricerca statunitensi), si procede come indicato nella Figura 5. In questo caso, la capsula di combustibile è contenuta in una cavità ("hohlraum" in inglese) con due aperture alle estremità verso le quali vengono indirizzati i raggi laser. La cavità si comporta come un "corpo nero" in quanto, a causa delle riflessioni multiple sulle superfici, assorbe praticamente tutta l'energia entrante. Inoltre, per il secondo principio della termodinamica, la densità energetica, e quindi la temperatura, sono sostanzialmente uniformi all'interno della cavità. Di conseguenza, anche gli aumenti istantanei di temperatura indotti dai laser sono sostanzialmente uniformi su tutta la superficie ma, in negativo, si perde energia nelle riflessioni sulle pareti interne.

Come si può vedere dai diagrammi in basso a sinistra, nell'esperimento del LLNL nella cavità si raggiungono temperature dell'ordine dei 290 eV (equivalenti a circa 3,4 milioni di gradi celsius) in pochi miliardesimi di secondo. Tali temperature sono più che sufficienti a provocare l'eiezione, ad altissima velocità, del materiale superficiale della

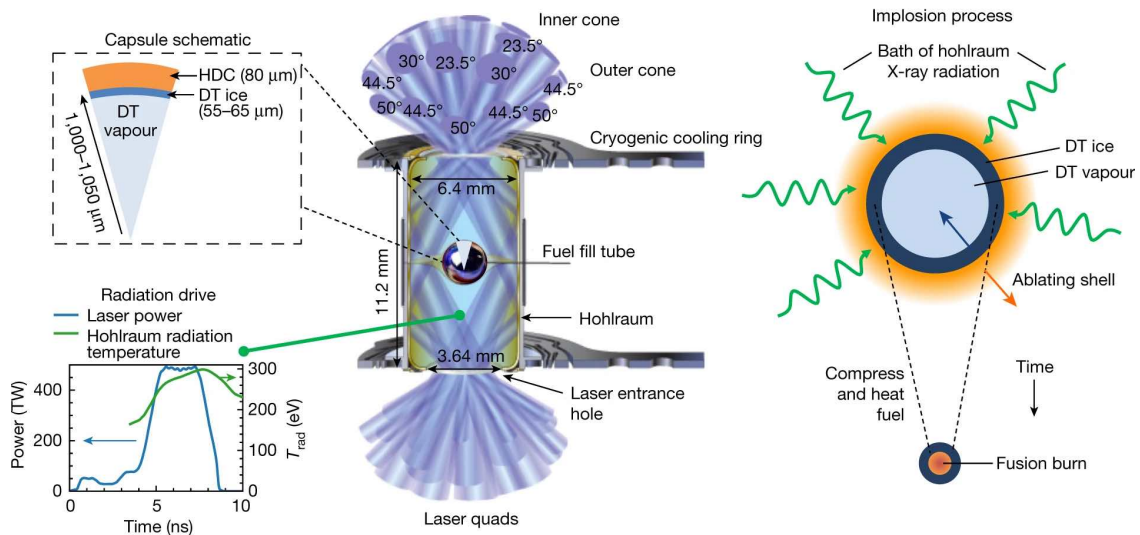


Figura 5: Schema del processo di fusione nucleare a confinamento inerziale e irraggiamento indiretto [LLNB].

capsula di combustibile ed a comprimere la parte centrale della capsula facendo procedere la reazione di fusione come descritto in precedenza.

Evidentemente, per produrre energia elettrica il calore generato dalla reazione di fusione non deve essere disperso come nelle prove di laboratorio, ma asportato da un circuito intermedio (ad esempio a sodio liquido e quindi ad alta temperatura) e da questo fornito ad un generatore di vapore del tipo “a recupero”, che sostituisce funzionalmente le caldaie utilizzate nelle centrali termoelettriche tradizionali.

Nel caso del confinamento inerziale, il passaggio dalla sperimentazione alle applicazioni appare più difficile rispetto al caso del confinamento magnetico perché, per realizzare una centrale da 500 MW elettrici e, di conseguenza, da almeno 1000 MW termici, si dovranno aumentare di un ordine di grandezza le rese energetiche per singola reazione e, soprattutto, di quasi 6 ordini di grandezza la frequenza delle reazioni passando da una reazione al giorno, frequenza tipica delle sperimentazioni nei laboratori, alla frequenza di target, fissata dai ricercatori del LLNL in dieci reazioni di fusione al secondo, ovvero 864.000 reazioni al giorno.

(Poiché 1000 MW equivalgono a 1000 MJ/s, con dieci reazioni al secondo si dovranno ottenere oltre 420 - 430 MJ per reazione, contro gli attuali 3,15 MJ, in modo che, al netto del consumo dei laser, attualmente pari a 322 MJ restino almeno 100 MJ/s utili).

Oltre alle difficoltà tecnologiche, il ritardo nelle applicazioni energetiche della fusione a confinamento inerziale è dovuto al fatto che il Lawrence Livermore National Laboratory è nato come laboratorio di ricerca militare nel quale le reazioni di fusione avevano come scopo principale, se non unico, la manutenzione delle scorte di armi termonucleari degli Stati Uniti, garantendo un modo alternativo per testarle dopo il bando degli esperimenti nucleari sotterranei nel 1996. Ma gli ultimi risultati hanno ampliato la missione del LLNL, che ora include anche la produzione di energia tanto che nel corso di un summit tenuto alla Casa Bianca il 17 gennaio 2022 l’approccio inerziale è stato incluso nel piano

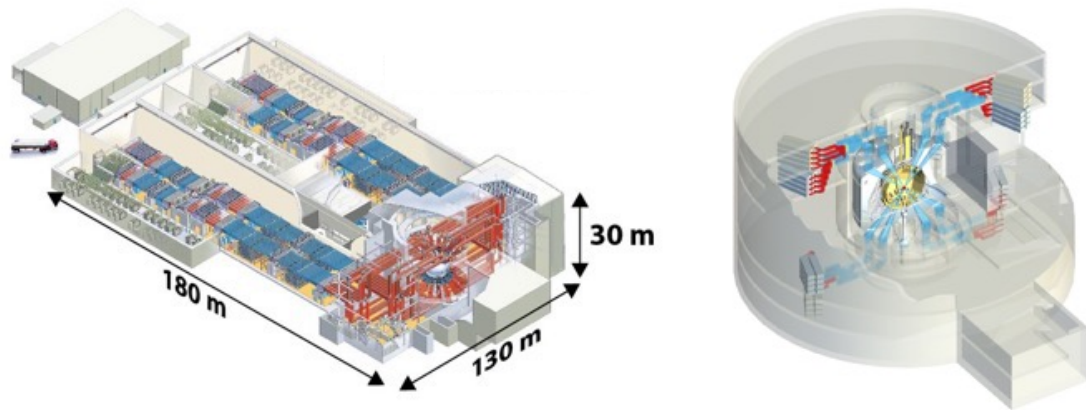


Figura 6: Confronto tra il LLNL, dove ha avuto luogo la prima reazione di fusione e un possibile generatore di vapore inseribile in una centrale termoelettrica a fusione nucleare[LLNL].

per commercializzare l'energia di fusione entro il prossimo decennio. Un esempio tipico di questo "vento nuovo" è la proposta formulata dal LLNL stesso per un possibile percorso concettuale, riportato nella Figura 6, volto al passaggio dall'attuale laboratorio ad un generatore di vapore inseribile in una centrale termoelettrica a fusione nucleare.

3 L'intervento dei privati

Durante un'indagine condotta nell'ottobre 2021 dalla FIA (Fusion Industry Association) ben 33 "startup" hanno dichiarato il loro coinvolgimento nel migliorare le tecnologie di fusione nucleare "tradizionali" o nello sviluppare tecnologie innovative. Tra queste, 18 hanno fatto conoscere anche l'ammontare dei finanziamenti non governativi ricevuti che, all'epoca dell'indagine, ammontavano a oltre 2 miliardi di dollari in totale. Da allora, secondo La Repubblica del 14 dicembre 2022, le startup hanno raccolto altri 2,8 miliardi di dollari portando il totale ad oltre 4,8 miliardi di dollari. (Evidentemente, a parità di risultati, i finanziatori si aspettano dalle startup un forte abbassamento dei costi di ricerca rispetto ai progetti pubblici, grazie alla semplificazione dei processi di fusione e, soprattutto, alla riduzione dei tempi di sviluppo).

3.1 Commonwealth Fusion System

Tra le "startup" che hanno scelto di migliorare le tecnologie tradizionali, spicca la CFS (Commonwealth Fusion System) che, a gennaio 2023, aveva in cassa oltre 1,8 miliardi di dollari arrivati da organizzazioni non governative (tra le quali la compagnia petrolifera norvegese Equinor, ex Statoil, l'ENI e la fondazione Gates). Grazie, però, a finanziamenti pubblici aggiuntivi del Regno Unito, la CFS, pur essendo uno spin-off dell'MIT (Massachusetts Institute of Technology), ha aperto una sede nelle vicinanze dell'Università

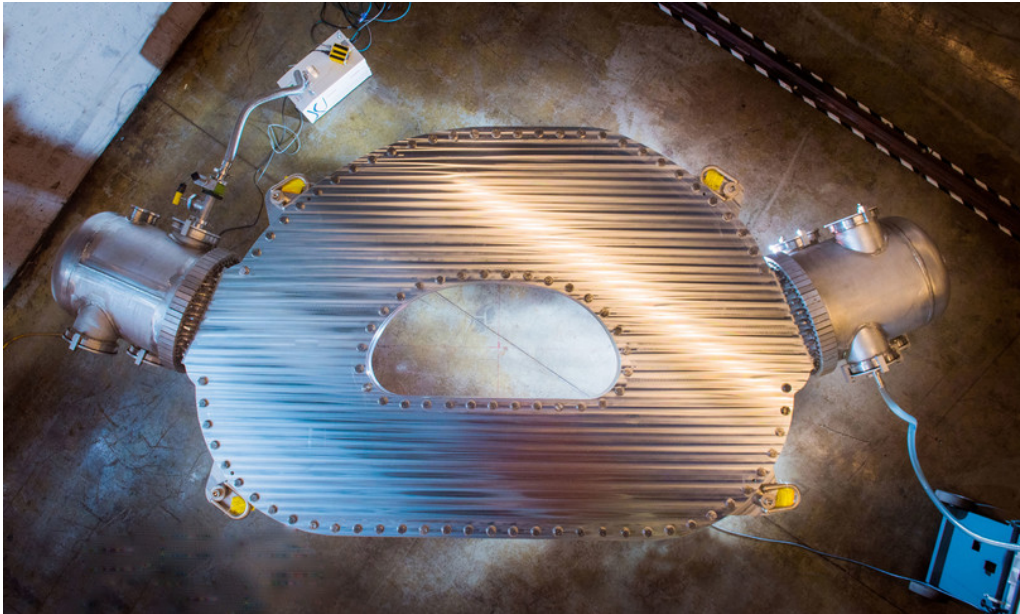


Figura 7: L'elettromagnete più potente al Mondo realizzato dall'MIT impiegando superconduttori ad alta temperatura [MIT].

di Cambridge, nella quale ha optato per la ben collaudata tecnologia del confinamento magnetico nei tokamak.

La carta vincente di CFS è la realizzazione degli elettromagneti impiegando un tipo innovativo di superconduttori elettrici che possono essere raffreddati con azoto liquido ($-196,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) anziché con elio liquido ($-268,9\text{ }^{\circ}\text{C}$), come i superconduttori impiegati nella realizzazione degli elettromagneti di ITER. I nuovi superconduttori, a base di ossidi di terre rare, bario e rame (ReBCO - Rare Earth Barium Copper Oxide), sono stati messi a punto dall'MIT, e rendono possibile l'utilizzo di correnti elettriche molto più alte negli elettromagneti che creano i campi magnetici di contenimento del plasma. Di conseguenza, i reattori risultano molto più compatti ed efficienti di quelli concepiti fino ad ora.

Ad esempio SPARC, l'impianto pilota della CFS avrà ancora una configurazione toroidale ma con un diametro di soli 6 metri, contro i 30 metri di ITER. Gli obiettivi di SPARC saranno la conferma del corretto funzionamento in opera dei nuovi elettromagneti, fotografati nella Figura 7, e il raggiungimento di un bilancio positivo dell'energia prodotta che beneficerà dei consumi energetici ridotti nella realizzazione del campo magnetico di contenimento. A SPARC, entro il 2033 seguirà ARC, il primo reattore dimostrativo su scala industriale, che dovrebbe immettere in rete di 200 MW di potenza elettrica senza alcuna generazione di anidride carbonica.

3.2 TAE - TriAlphaEnergy Technologies

Al secondo posto tra le startup più finanziate si trova la californiana TAE (TriAlphaEnergy) Technologies che, a luglio 2022, aveva ricevuto fondi per 1,2 miliardi di dollari da investitori del calibro di Google, Chevron e Sumitomo. Il nome TriAlphaEnergy è ispira-

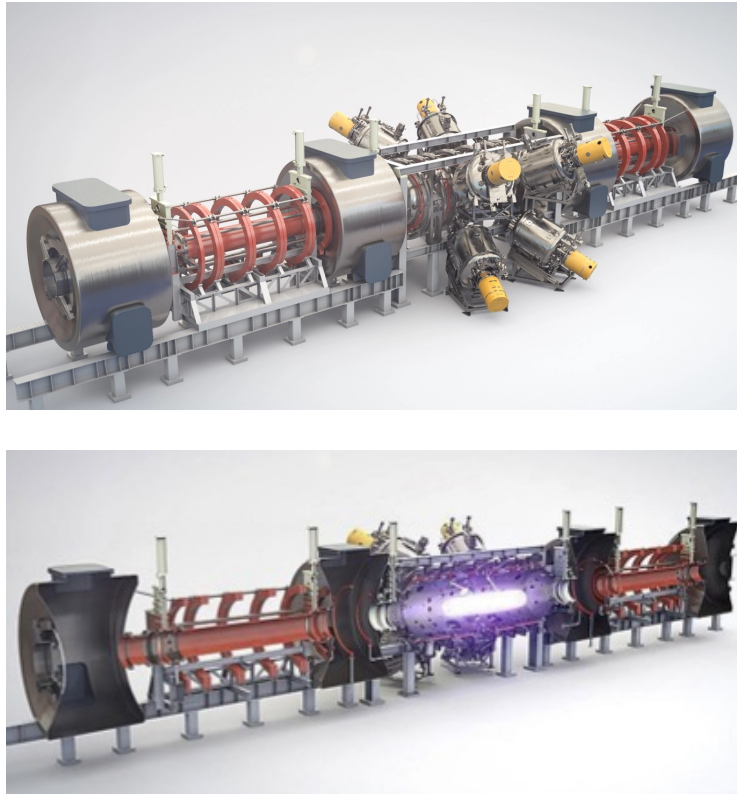


Figura 8: Vista (in alto e rendering della sezione trasversale (in basso) del reattore di quinta generazione Norman proposto dalla TAE Technologies con evidenziati i sei iniettori tangenziali, i due generatori dei proiettili di plasma agli estremi e la camera di reazione della lunghezza di circa due metri e mezzo [TAE Technologies].

to alla reazione (5), utilizzata nella fusione, che produce tre nuclei di elio-4 allo stato di plasma, ovvero tre nuclei $[H_2^4]^{++}$ conosciuti anche come particelle α , e sei elettroni liberi.

(Può essere interessante segnalare che Google, oltre che finanziatore, è anche “partner” scientifico di TAE in quanto ha messo a punto e implementato l’algoritmo “optometrico” per l’ottimizzazione dei reattori. L’algoritmo è fondato sull’interazione tra progettista umano e computer elaboratore dei risultati e, di conseguenza, l’aggettivo optometrico sottolinea l’analogia con le visite oculistiche nelle quali lo specialista interagisce con il paziente elaboratore dei risultati).

I reattori TAE più recenti sono quelli della quinta generazione, illustrati nella Figura 8 e chiamati Norman in onore del fisico del plasma canadese Norman Rostoker che è stato uno dei co-fondatori della compagnia. Ai due estremi dei reattori vengono generati simultaneamente due “proiettili” di plasma rotanti nella forma illustrata nella Figura 9 che, in linguaggio tecnico, viene definita FRC - Field Reverse Configuration. (In linguaggio comune tale forma potrebbe essere chiamata ad “anello di fumo rotante”, ponendo l’accento sul fatto che la rotazione intorno al proprio asse è importante come nelle “trottole”, in quanto serve alla autostabilizzazione e, in questo caso, permette di ridurre l’intensità del campo magnetico necessario al contenimento del plasma).

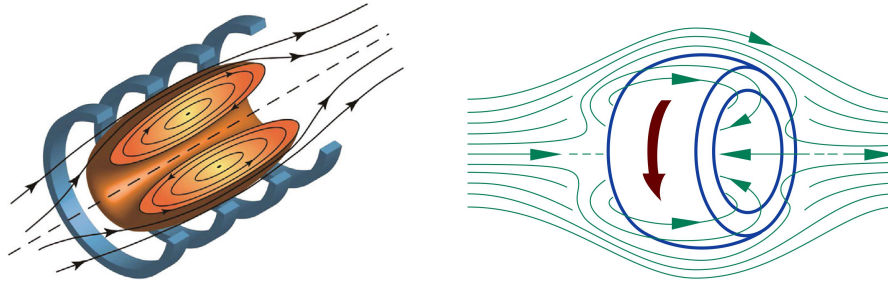
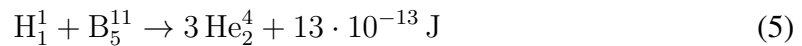


Figura 9: “Proiettili” di plasma rotanti nella configurazione FRC: rendering a sinistra e schema a destra [TAE Technologies a sinistra e Wikipedia a destra].

Nel percorso verso la camera centrale di reazione, i proiettili sono accelerati fino a raggiungere la velocità di un milione di chilometri al secondo. Durante l’incontro/scontro, che ha luogo nella camera, i proiettili convertono l’energia cinetica del moto in energia interna delle particelle e, come si intuisce dalla Figura 8 a destra, danno origine a una nuova configurazione FRC rotante sul proprio asse a forma di ellissoide forato e allungato. L’iniezione tangenziale di particelle nei 6 punti della camera evidenziati nella Figura 8 a sinistra, mantiene la rotazione dell’ellissoide per tutto il tempo necessario alla reazione di fusione.

Dopo la quinta generazione (Norman), TAE ha già programmata la sesta generazione (Copernicus) con l’obiettivo di arrivare alla ignizione, e la settima (Da Vinci) con l’obiettivo di generare, a partire dal 2030, più energia elettrica di quella necessaria al funzionamento dei reattori. Quest’ultimo obiettivo è reso particolarmente ambizioso dalla reazione di fusione adottata:



basata sull’utilizzo idrogeno atomico e boro-11 come reagenti, al fine di ottenere elio-4 ed energia come prodotti.

I vantaggi della reazione (5) rispetto alla fusione di deuterio e trizio sono molteplici perché i reagenti idrogeno normale e boro sono facilmente disponibili e, quindi, poco costosi. Inoltre, la reazione è “aneutronica”, ovvero non genera neutroni ma solo elio-4 sotto forma di plasma, ovvero di particelle cariche (ioni ed elettroni) ad alta energia cinetica che, in linea di principio. Tali particelle ben si prestano ad essere utilizzate per la generazione diretta di energia elettrica attraverso l’utilizzo di un’apparecchiatura (Ciclotrone Inverso) già brevettata da TAE. L’unico svantaggio, non di poco conto, è che la fusione di idrogeno e boro richiede il raggiungimento di temperature dell’ordine di un miliardo di gradi Celsius, ovvero di un ordine di grandezza superiori ai cento milioni di gradi Celsius delle fusioni “neutroniche” di deuterio e trizio realizzate finora.

3.3 Helion Energy

Al terzo posto tra le startup più finanziate dai privati, si trova la Helion Energy che ha sede nello stato di Washington ed ha ricevuto fondi per 578 milioni di dollari da un gruppo di investitori comprendente Sam Altman, CEO of OpenAI (la startup dell’intelligenza

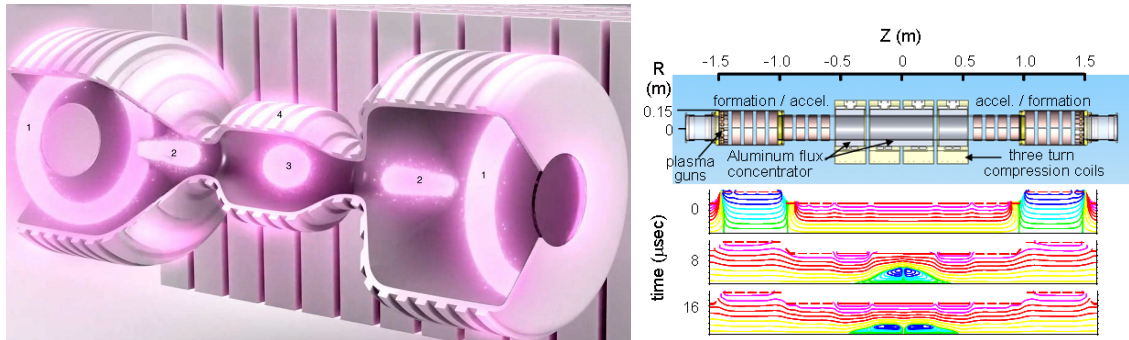
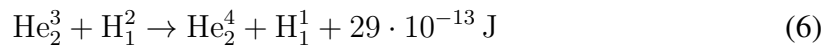


Figura 10: Reattore proposto dalla Helion. A sinistra: schema con evidenziati i generatori dei proiettili di plasma (1), la sezione di accelerazione (2), la camera di reazione (3) all'interno del generatore del campo magnetico di compressione (4) *Helion Energy*. A destra: dimensioni geometriche del reattore e sviluppo del campo magnetico nel tempo [Slough e altri].

artificiale valutata 28 miliardi di dollari), il co-fondatore di Facebook Dustin Moskovitz, e le società di investimento Mithril Capital e Capricorn Investment Group specializzate in sviluppo sostenibile.

Il processo di fusione scelto da Helion



prevede l'utilizzo di elio-3 e deuterio come reagenti, per ottenere elio-4, idrogeno ed energia come prodotti. (Helion è il nome inglese di elio-3, molto più suggestivo dell'equivalente italiano Elione).

La reazione (6) richiede il raggiungimento di temperature dell'ordine dei cinquecento milioni di gradi Celsius, intermedie tra quelle delle fusioni di deuterio e trizio e di idrogeno e boro-11. La reazione (6) è aneutronica, o meglio: quasi-aneutronica. Infatti diversi nuclei di deuterio che partecipano alla (6) reagiscono tra di loro producendo elio-3 e neutroni ad energia relativamente bassa. L'elio-3 è immediatamente riciclato come combustibile nel plasma mentre, come nei reattori tokamak, i neutroni sono catturati dagli schermi protettivi a base di litio. A differenza dei tokamak, però, il trizio rimosso dagli schermi non viene utilizzato nella reazione ma viene immagazzinato in attesa del decadimento spontaneo ad elio-3.

La tecnologia della Helion, schematizzata nella Figura 10, è una versione semplificata di quella adottata da TAE. Ai due estremi (1) del reattore vengono generati simultaneamente due "proiettili" di plasma rotanti nella configurazione FRC. Nel percorso (2) verso la camera centrale di reazione, i proiettili sono accelerati prima dell'incontro/scontro che dà origine alla nuova configurazione rotante (3). A questo punto un potentissimo campo magnetico generato all'interno della camera di reazione (4) comprime rapidamente il plasma fino ad innescare la fusione. Dopo la fusione il plasma si espande e il suo campo magnetico interagisce con quello del reattore inducendo una corrente elettrica sfruttabile a fini energetici.

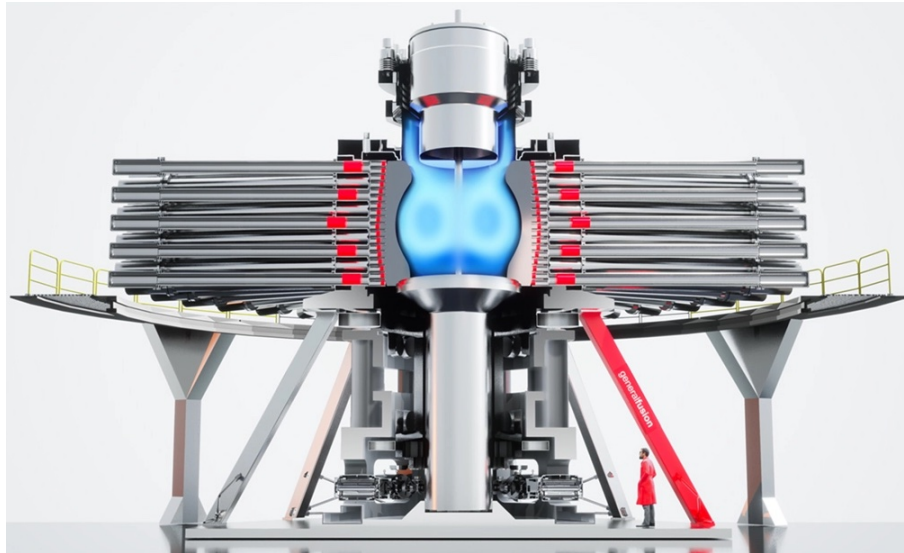


Figura 11: Reattore dimostrativo dalla General Fusion, con evidenziati l’iniettore del “bersaglio” di plasma, la camera di reazione cilindrica, la cavità creata all’interno del metallo liquido contenuto nella camera, e il sistema di compressione-collasso della cavità con gli stantuffi pneumatici disposti radialmente [General Fusion].

3.4 GF - General Fusion

La startup canadese General Fusion ha guadagnato l’attenzione di Jeff Bezos, il “padre” di Amazon, e di Tobias Lütke, il miliardario fondatore e CEO di Shopify, la società specializzata nella realizzazione e gestione per conto terzi dei siti di commercio elettronico. Antagonisti nel campo del commercio elettronico, Bezos e Lütke si trovano, quindi, fianco a fianco nel sostenere GF che nel complesso ha racimolato 400 milioni di dollari da organizzazioni non governative. Attratta dai finanziamenti pubblici aggiuntivi del Regno Unito e dalle possibili sinergie con la ricerca di alto livello, la GF ha scelto di installarsi nei dintorni dell’Università di Oxford dove ha privilegiato un approccio originale alla fusione, definito “magnetized target fusion” (“fusione di un bersaglio magnetizzato”) che è intermedio tra il confinamento magnetico ed il confinamento inerziale.

Nella fase iniziale, la camera centrale cilindrica del reattore schematizzato nella Figura 11 viene parzialmente riempita con una miscela di metalli liquidi (piombo e litio) che viene posta in rapida rotazione da due campi magnetici generati dalle basi girevoli del cilindro. La forza centrifuga associata alla rotazione forma sopra e sotto due vortici che unendosi lasciano una cavità al centro della camera e uno strato di metallo liquido alla pareti. In tempi brevissimi, l’iniettore riempie (dall’alto) la cavità con un “bersaglio” di plasma di deuterio e trizio, ruotante su sé stesso nella, più volte citata, configurazione FRC.

La Figura 11 rappresenta il reattore alla fine della fase di riempimento, quando diverse centinaia di stantuffi pneumatici disposti radialmente, “sparano” nella camera dei “proiettili” di metallo fuso provocando il collasso della cavità, ovvero “bersagliano” indirettamente il plasma in essa contenuto. Durante il collasso, infatti, il volume della cavità viene

ridotto fin quasi a zero in modo pressoché istantaneo, comprimendo adiabaticamente il plasma e facendo così aumentare la sua temperatura fino ad innescare la fusione.

Nella versione commerciale del processo messo a punto dalla GF, la fusione riscalda il metallo liquido generando calore che viene utilizzato in una centrale termoelettrica a vapore. Va sottolineato che, anche nei reattori della General Fusion il trizio è autoprodotta nella reazione, in quanto i neutroni veloci della reazione (1) vengono assorbiti dal metallo fuso a base di piombo e litio utilizzato nella compressione del plasma.

4 Conclusioni

Il problema principale, nella realizzazione di un reattore a fusione, è la necessità di mantenere confinata la miscela dei reagenti a temperatura e densità superiori a quelle previste dalla condizione di Lawson. Nessun contenitore materiale è concepibile per queste condizioni estreme e, di conseguenza, le ricerche si sono tradizionalmente rivolte verso tecnologie di confinamento di tipo magnetico od inerziale.

Alle realizzazioni tradizionali, proprie delle grandi organizzazioni di ricerca pubblica, appartengono la tecnologia dei tokamak, basata sul confinamento magnetico e impiegata nel reattore ITER, e quella dei raggi laser, concentrati su un unico bersaglio, basata sul confinamento inerziale impiegata dal Lawrence Livermore National Laboratory.

Il fatto nuovo degli ultimi anni è stato l'ingresso dei privati nella corsa alla fusione che ha portato a schemi originali e semplificati nella speranza, secondo molti fondata, di arrivare a reattori commerciali a fusione entro il 2030. Utilizzando come criterio l'ammontare dei finanziamenti privati, nel testo si sono esaminate quattro realizzazioni particolarmente interessanti:

- Commonwealth Fusion System, basata sulla tecnologia tokamak resa più efficiente e meno costosa dall'adozione di elettromagneti di nuova generazione che utilizzano superconduttori raffreddati con azoto liquido anziché con elio liquido come in ITER;
- TAE Technologies, basata sulla combinazione tra i due acceleratori di plasma lineari che sparano i "proiettili" uno contro l'altro e gli iniettori "booster" tangenziali che incrementano ulteriormente l'energia cinetica di agitazione posseduta dalle particelle di plasma dopo lo scontro;
- Helion Energies, basato su una semplificazione dello schema adottato dalla TAE senza gli iniettori "booster" tangenziali sostituiti da una ulteriore compressione magnetica;
- General Fusion, basata sulla compressione del plasma attraverso il collasso di una cavità nel metallo liquido che lo contiene, grazie al pompaggio pneumatico di quantità supplementari di metallo liquido nella camera di reazione.

Per quanto riguarda i reagenti impiegati nella fusione, si ha che:

- LLNL, ITER, Commonwealth Fusion System e General Fusion utilizzano deuterio e trizio e, di conseguenza, operano con temperature nell'intorno dei cento milioni di gradi Celsius;
- TAE Technologies utilizza idrogeno e boro e, di conseguenza, opera con temperature nell'intorno dei cento milioni di gradi Celsius;
- Helion Energies utilizza elio-3 e deuterio e, di conseguenza, opera con temperature nell'intorno dei cento milioni di gradi Celsius.

Dal punto di vista del processo, si ha che:

- solo i tokamak possono operare con continuità a differenza degli altri reattori che, operando con impulsi devono raggiungere frequenze-obiettivo molto elevate, ovvero comprese tra 1 e 10 impulsi al secondo (contro la frequenza attuale degli esperimenti pari ad 1 impulso al giorno),

Infine, dal punto di vista della generazione di energia elettrica, si ha che:

- solo TAE Tecnologie ed Helion Energies operano con reazione aneutroniche (ovvero che non generano neutroni veloci) e, di conseguenza possono puntare sulla generazione diretta dell'energia elettrica anziché sull'utilizzo del calore generato dalla fusione attraverso un ciclo termodinamico a vapore.

Bibliografia

P. Ball, *The race to fusion energy*, Nature, Vol 599, 362-366, 2021.

J. Badziak, *Laser nuclear fusion: current status, challenges and prospect*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, Vol 60, 729-738, 2012.

K. Chung, *Scientists Achieve Nuclear Fusion Breakthrough With Blast of 192 Lasers*, NewYorkTimes, December 13, 2022.

G. Comini e M. Libralato, *Verso una Nuova Energetica - Dalle Fonti Esauribili alla Decarbonizzazione*, libreriauniversitaria edizioni, Padova 2022.

J. D'Alessandro, *Fusione nucleare: le startup dell'energia pulita nel mondo*, Green&Blue, la Repubblica, 14 dicembre, 2022.

H. Fountain, *A Dream of Clean Energy at a Very High Price*, NewYorkTimes, March 27, 2017.

H. Fountain, *Climate Forward: Is fusion the solution?*, NewYorkTimes, December 13, 2022.

ITER, *Fuelling the Fusion Reaction e documenti vari*, www.iter.org, visti il 12 gennaio 2022.

M.G. Laberge e D.H. Richardson, *System and Methods for Compressing Plasma*, General Fusion Inc., Patent US9424955, August 23, 2016.

P. Lobner, *Helion Energy Inc. - The Fork in the Road to Electric Power From Fusion*, lynceans.org, 1 February 2021.

P. Lobner, *TAE Technologies (formerly Tri Alpha Energy) - The Fork in the Road to Electric Power From Fusion*, lynceans.org, 1 February 2021.

T. Ma, *Burning plasma and ignition threshold on NIF, and what it means for aggressive IFE development*, ARPA-E Workshop, LLNL, April 26, 2022.

C. Sabelli, *Cosa significa per l'Europa il risultato statunitense sulla fusione*, Nature Italy, 22 dicembre 2022.

J. Slough, G. Votroubek e C. Phli, *Creation of a high-temperature plasma through merging and compression of supersonic field reversed configuration plasmoids*, Nuclear Fusion, 51 (5), 2011.

J. Tollefson, *US achieves laser-fusion record: what it means for nuclear-weapons research*, Nature, Vol 597, 163-164, 2022.

J. Tollefson e E. Gibney, *Nuclear-fusion lab achieves "ignition": what does it mean?*, Nature, doi.org/10.1038/d41586-022-04440-7, 2022.

M. Tuszewski e altri, *System and Methods for Forming and Maintaining a High Performance FRC*, TAE Technologies Inc., Patent US10049774, August 14, 2018.

A. B. Zylstra e altri, *Burning plasma achieved inertial fusion*, Nature, Vol 601, 542-548, 2022.