



Ottimizzazione del Progetto di Nocciolo di ALFRED

G. Grasso, F. Lodi, C. Petrovich, D. Mattioli, M. Sumini



Ottimizzazione del Progetto di Nocciolo di ALFRED

G. Grasso, C. Petrovich, D. Mattioli - ENEA, F. Lodi, M. Sumini - CIRTEN UNIBO

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV Generazione

Obiettivo: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare

Responsabile del Progetto: Mariano Tarantino, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza e collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV generazione"

Responsabile scientifico ENEA: Mariano Tarantino

Responsabile scientifico CIRTEN: Giuseppe Forasassi

Titolo

Ottimizzazione del progetto di nocciolo di ALFRED

Descrittori

Tipologia del documento: Rapporto Tecnico
Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE su sicurezza nucleare e reattori di IV generazione
Argomenti trattati: Reattori veloci
 Progetto Nocciolo

Sommario

Al termine del progetto LEADER, una configurazione di sistema – ivi incluso il nocciolo – era stata proposta dai progettisti per studi e verifiche di dettaglio, grazie ai quali è stato possibile mettere in luce alcune criticità sul progetto stesso.

Il presente rapporto tecnico, dopo aver brevemente presentato il progetto di nocciolo di ALFRED, così come concepito e sviluppato nell'ambito del progetto LEADER, insieme alle criticità ad esso riscontrate, passerà in rassegna alcune possibili soluzioni, valutandone l'impatto sui noti problemi della esistente configurazione al fine di consentire la definizione di una nuova configurazione di riferimento per il nocciolo del reattore ALFRED.

Note

Autori: G. Grasso¹, F. Lodi², C. Petrovich¹, D. Mattioli¹, M. Sumini²

- (1) ENEA
- (2) Università di Bologna



Copia n.

In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	17/09/14	NOME	G. Grasso	M. Tarantino	M. Tarantino
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE	

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 050	0	L	2	15

SOMMARIO

1. Introduzione.....	3
2. Revisione del progetto di nocciolo di ALFRED – versione LEADER [5].....	3
2.1. Valutazione del sovrariscaldamento delle barrette angolari.....	5
2.2. Valutazione del sovradanneggiamento del vessel interno.....	6
2.3. Altre considerazioni	7
3. Analisi delle soluzioni al problema termoidraulico.....	8
4. Analisi delle soluzioni al problema del danneggiamento neutronico.....	11
5. Altre valutazioni e considerazioni di carattere generale.....	12
6. Conclusioni.....	14
Bibliografia.....	15

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 050	0	L	3	15

1. Introduzione

ALFRED – Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator – è il primo progetto di reattore nucleare interamente concepito e sviluppato da una comunità internazionale di ricercatori, che si sono ispirati all'ambizioso concetto espresso dal Generation IV International Forum (GIF) [1] per una nuova generazione di “sistemi energetici nucleari” più sicuri, puliti, economici e meno-proliferanti.

Individuata nell'innovativa tecnologia dei metalli liquidi pesanti la soluzione più promettente per raggiungere gli obiettivi sopra esposti, ALFRED avrà il compito non solo di mostrare la validità dell'idea, provandone la fattibilità tecnica, ma anche di dimostrare quantitativamente la possibilità di raggiungere quei livelli di sicurezza, sostenibilità e competitività economica che consentano, a questa nuova tipologia di reattori, la possibilità di incontrare le richieste della popolazione, verso un futuro più pulito e sicuro [2-4].

In linea con questa visione, il presente rapporto tecnico si inserisce nel contesto internazionale degli studi e delle ricerche per lo sviluppo del progetto del reattore, ed in particolare con quanto concerne il progetto del nocciolo del reattore, analizzando i punti critici emersi dalla prima stesura, ed individuando soluzioni che consentano di superare tutte le criticità, in vista della definizione di una nuova configurazione di riferimento per il reattore.

2. Revisione del progetto di nocciolo di ALFRED – versione LEADER [5]

In vista dell'individuazione dei possibili margini di ottimizzazione del nocciolo del reattore ALFRED, è stata condotta una minuziosa ricostruzione dei processi di concettualizzazione e caratterizzazione che hanno portato, durante lo svolgimento del progetto europeo LEADER, alla definizione di una configurazione di riferimento per il nocciolo in questione, orientata ad integrare principi e misure di sicurezza sin dal principio ed il più intrinsecamente possibile nel progetto. Il risultato di questa analisi ha condotto gli autori alla preparazione di una pubblicazione [6], già sottomessa ed approvata per la pubblicazione su *Nuclear Engineering and Design*, in cui sono descritti in maniera organica ed armonica i requisiti del sistema ed i vincoli tecnologici (principalmente: i limiti di temperatura di guaina e combustibile in condizioni nominali ed incidentali) che hanno guidato il progetto, i risultati delle analisi neutronica (eseguita per mezzo dei codici MCNPX ed ERANOS), termoidraulica (codici TRACE, CFD ed ANTEO) e di sicurezza per i transitori incidentali più significativi (codici RELAP, CATHARE e SIM-LFR), nonché i risultati dell'analisi di attivazione del piombo (eseguita mediante i codici MCNPX e FISPACT).

Il nocciolo di ALFRED – calibrato per produrre una potenza termica di 300 MW – è costituito da 171 elementi di combustibile di forma esagonale, disposti – insieme a 4 barre di sicurezza e 12 barre di controllo – a formare uno pseudo-cilindro nelle posizioni più interne della griglia destinata ad ospitare e fissare in posizione tali elementi. Sulla medesima griglia trovano posto anche 108 finti elementi (dummy) con il solo scopo di proteggere dall'irraggiamento dei neutroni del nocciolo il vessel interno che sostiene il nocciolo. In Figura 1 è mostrata una veduta in pianta di un quarto (per simmetria su entrambi gli assi) del nocciolo del reattore ALFRED.

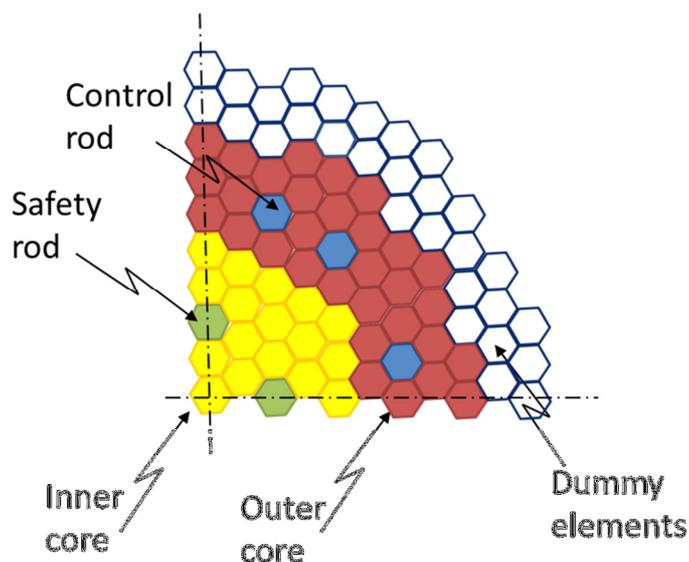


Figura 1 - Mappa delle posizioni di nocciolo di ALFRED (un quarto del sistema).

Ciascun elemento di combustibile, come già detto di forma esagonale, è costituito da 127 barrette di combustibile disposte secondo un reticolo triangolare ad occupare il volume interno di una scatola di acciaio Ferritico-Martensitico T91. La scatola, dello spessore di 4 mm e con una chiave interna di 15.8 cm, ha sia funzione strutturale che di guida per il flusso di refrigerante che lambisce il fascio scaldante. Le barrette di un elemento sono tenute in posizione – alla distanza di 13.86 mm l'una dall'altra – da una serie di griglie spaziatrici disposte lungo la luce del fascio, ad intervalli irregolari per smorzare modi vibrazionali delle barrette. In Figura 2 si mostra la sezione orizzontale di un elemento, con vista del fascio di barrette.

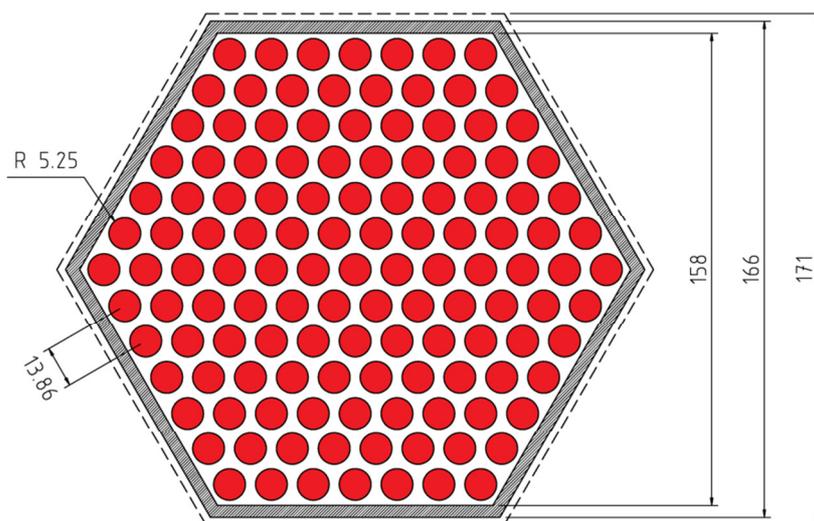


Figura 2 – Schema del fascio di barrette all'interno della scatola di un elemento.

Le barrette di combustibile, della lunghezza di 1.39 m (con zona attiva di 60 cm), sono costituite da un tubo (guaina) di acciaio inossidabile doppio-stabilizzato “1515Ti”, chiuso alle estremità da due tappi del medesimo materiale, all'interno del quale trovano posto 40

pastiglie, cilindriche dal diametro di 9 mm e dall'altezza di 15 mm, del combustibile vero e proprio: un ossido misto di Uranio e Plutonio. Assialmente le pastiglie presentano un foro, imposto in fase di realizzazione, del diametro di 2 mm atto a ridurre la temperatura massima nel combustibile stesso ed accomodare il rigonfiamento della matrice limitando le azioni meccaniche sulla guaina. Nel lato sinistro di Figura 3 si mostra lo schema di una barretta di combustibile, la cui sezione quotata – all'altezza del combustibile – è invece mostrata nel lato destro della stessa Figura.

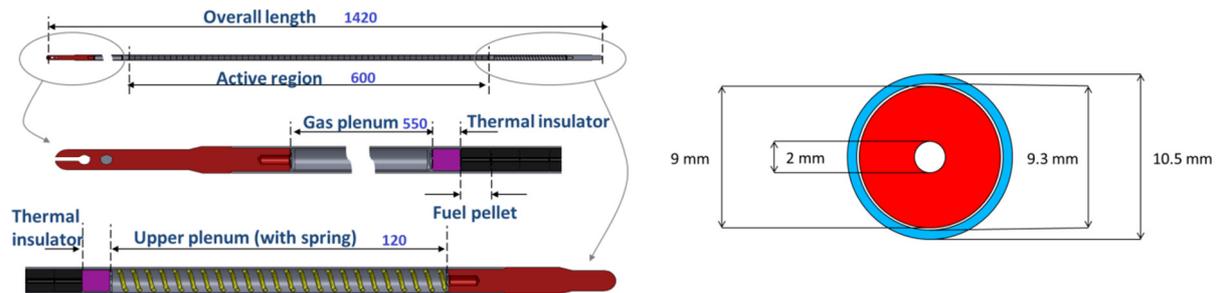


Figura 3 – Vista assiale (sinistra) e radiale (destra) di una barretta di combustibile.

Per appiattare la distribuzione di potenza, il combustibile è stato previsto con 2 diversi valori di arricchimento: il più basso (21.7% di Plutonio) nelle 57 posizioni più interne della pianta del nocciolo; il più alto (27.8% di Plutonio) nelle rimanenti 114 posizioni circostanti (Figura 1).

Per maggiori dettagli sulla configurazione del nocciolo, si rimanda ai rapporti tecnici, emessi all'interno del progetto LEADER, riguardanti il nocciolo [7-11].

2.1. Valutazione del sovrariscaldamento delle barrette angolari

Come evidenziato nel rapporto finale del progetto LEADER [8], la chiave interna della scatola degli elementi di combustibile, così come inizialmente prevista, determina uno strozzamento dei sottocanali angolari, ergo un sottoraffreddamento che porta la guaina delle barrette affacciate a tali sottocanali a superare la temperatura di 550 °C, fissata come vincolo di progetto in quanto limite di certa resistenza a corrosione per il materiale della ricopertura protettiva della guaina stessa.

L'effetto, estremamente localizzato, è imputabile ad una riduzione del diametro idraulico di detti sottocanali, cui segue un aumento della resistenza idraulica e dunque una riduzione della portata, rispetto ai rimanenti sottocanali interni o di parete del medesimo elemento, idraulicamente più favorevoli. Rispetto a quanto riportato nel citato documento [8], anche prendendo in considerazione l'effetto della conduzione di calore attraverso la scatola dell'elemento, ed aggiungendo come ulteriore canale di refrigerazione dell'elemento quello ricavato dall'interstizio fra ciascun elemento ed i 6 ad esso adiacenti, in cui fluisce la cosiddetta portata di by-pass¹, le temperature dei sottocanali angolari risultano sensibilmente

¹ Per valutare l'effetto della portata di by-pass sulla temperatura dei canali periferici di un elemento di combustibile, è stato necessario modificare il codice di analisi termoidraulica per sottocanali ANTEO. Ulteriori dettagli sul codice, le modifiche ad esso apportate e la validazione di tale strumento si rimanda il lettore ai rapporti [12-13].

superiori a quelle degli altri sottocanali (Figura 4), indicando l'opportunità di rivedere il progetto idraulico dell'elemento di combustibile nel suo insieme.

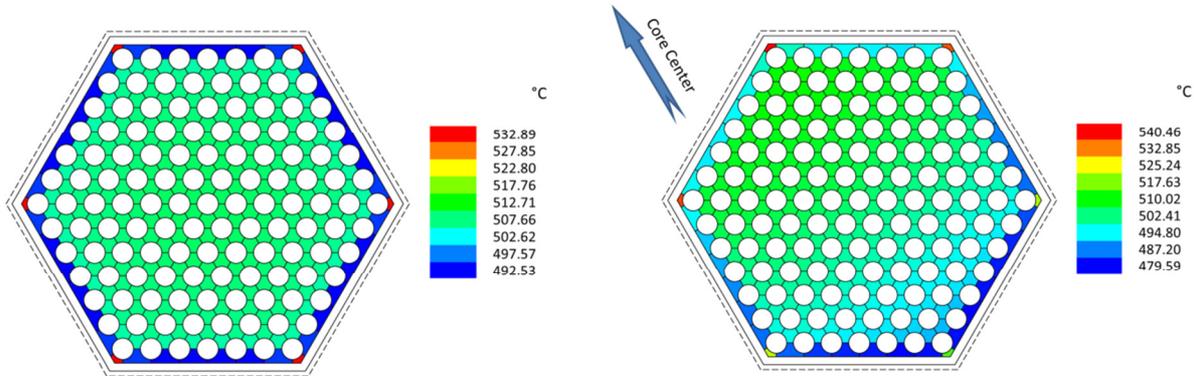


Figura 4 – Distribuzione delle temperature di sottocanale all'estremità superiore della colonna attiva, per l'elemento centrale (sinistra) e quello in cui è localizzata la barretta più calda (destra) [8].

2.2. Valutazione del sovradanneggiamento del vessel interno

Per la sua natura di dimostratore, nonché in prospettiva di favorire un progetto che faciliti la protezione dell'investimento, il disegno di ALFRED è stato orientato a garantire che tutti i componenti interni possano essere estratti dal vessel principale, per ispezione e loro potenziale sostituzione. Ciò nondimeno, è priorità assoluta proteggere il vessel interno contro il danneggiamento da radiazioni, garantendo che – fino a fine vita – esso non superi mai il limite di 2 DpA, entro il quale il danneggiamento da radiazione è trascurabile, non alterando le proprietà meccaniche del componente.

La protezione dell'inner vessel è affidata agli elementi dummy che circondano la zona moltiplicante. Il disegno di tali elementi è identico a quello degli elementi di combustibile, con il combustibile e la regione del gas plenum sostituite da una colonna di pastiglie cilindriche solide di zirconia stabilizzata con yttria (YSZ).

A seguito di analisi dettagliate, lo spessore dello schermo è risultato insufficiente, portando le sezioni dell'inner vessel a cavallo della mezzera del nocciolo a raggiungere il limite di 2 DpA in meno di 20 anni, ben prima del termine della vita utile prevista per l'impianto (dunque, auspicabilmente, anche per questo componente). In Figura 5 si riporta il danneggiamento cumulativo delle diverse sezioni assiali dell'inner vessel a diversi istanti temporali (supposto continuativo il funzionamento dell'impianto). In figura, è riportato il risultato integrale per ciascun segmento cilindrico di 20 cm di altezza, staccati (dunque numerati) a partire dal fondo dell'inner vessel, posto a circa -236 cm rispetto alla mezzera del nocciolo.

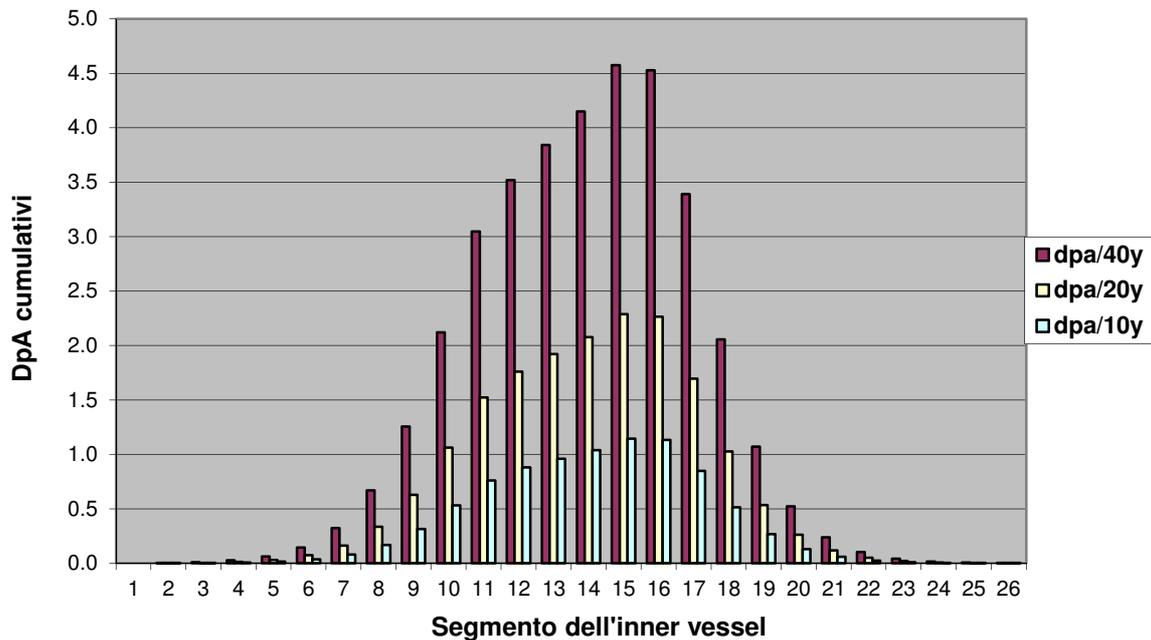


Figura 5 – Distribuzione assiale del danneggiamento cumulativo nelle diverse sezioni assiali dell'inner vessel (numerata a partire dal basso, con la mezzeria del nocciolo all'interno del segmento 12).

2.3. Altre considerazioni

In fase di progetto concettuale, non è stata presa in considerazione la possibilità di una erronea valutazione della massa critica, a causa della propagazione delle inevitabili incertezze intrinseche nella valutazione delle sezioni d'urto per i materiali di cui è composto il nocciolo. Nel caso la massa critica effettiva si discosti da quella teorica, non è infatti pensabile alterare la composizione materiale del combustibile, ad esempio alterandone l'arricchimento, bensì modificare il numero di elementi di combustibile caricati nel nocciolo, per lo meno per la prima ricarica.

Qualora la stima sia stata effettuata per eccesso – dunque nel caso si renda necessario aumentare la massa moltiplicante – sarebbe necessario aumentare il numero di elementi di combustibile, andando ad occupare ulteriori posizioni a scapito degli elementi schermanti, ad ulteriore riduzione del potere schermante di questi e dunque aumentando il problema del sovradanneggiamento dell'inner vessel. Qualsiasi modifica dello schermo dovrà pertanto tenere in conto la possibilità che alcune posizioni possano non essere più disponibili per lo schermaggio, essendo potenzialmente necessario sostituire, in tali posizioni, gli elementi schermanti con ulteriori elementi di combustibile.

Da ultimo, alcuni raffinamenti riguardanti il calcolo di riferimento per la stima della criticità sono riconosciuti necessari:

1. mentre è stata stimata la produzione di polonio dalle impurità di bismuto, per due diverse composizioni di piombo commercialmente disponibile, nel calcolo di criticità è stato invece sempre assunto piombo chimicamente puro, trascurando dunque il potenziale impatto delle sue inevitabili impurità sulla criticità stessa;

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 050	0	L	8	15

2. il materiale inizialmente previsto per la scatola si è successivamente dimostrato non idoneo per uso in ambiente di metallo liquido pesante, e ne è stata dunque decisa la sostituzione con lo stesso materiale con cui sono realizzate le guaine delle barrette di combustibile: l'impatto che questa sostituzione avrà sulla criticità deve essere pertanto valutata ed opportunamente compensata;
3. il calcolo di riferimento ha portato ad una definizione di arricchimenti e zone di arricchimento perfettibili, in quanto definiscono un sistema che giunge in leggera sottocriticità al termine del ciclo operativo, e con potenze lineari che eccedono il limite definito in fase di progetto²;
4. qualora le correzioni per i problemi di termoidraulica e danneggiamento neutronico sopra esposti, dovessero richiedere modifiche al sistema, l'impatto di tali modifiche andrebbe opportunamente compensato.

3. Analisi delle soluzioni al problema termoidraulico

Come descritto nel Paragrafo 2.1, il problema del sottoraffreddamento dei sottocanali angolari – in parte insito nella loro conformazione geometrica – deriva, nel caso specifico, da una distanza insufficiente tra le barrette periferiche e la parete interna della scatola dell'elemento. Diverse soluzioni possibili si prospettano in tal caso:

1. rimuovere le barrette angolari, per evitare che sia depositata potenza nei canali ad esse adiacenti, e dunque evitare alla radice che i canali angolari possano scaldarsi;
2. traslare opportunamente le barrette angolari radialmente verso l'interno, allargando i sottocanali angolari a scapito di quelli ad essi opposti;
3. allargare la chiave della scatola esagonale, allargando così tutti i canali periferici, ivi inclusi quelli angolari.

Alcune considerazioni di altra natura meritano però di essere avanzate prima di individuare la strada da intraprendersi, per poter disegnare un quadro completo delle implicazioni di ciascuna opzione.

Qualora si rimuovessero le barrette angolari, due nuovi problemi si presenterebbero, richiedendo soluzione:

- si verrebbero a formare, in ogni elemento, sei importanti canali di by-pass, che andrebbero a ledere le performance termoidrauliche del sistema ed a creare forti squilibri nella distribuzione circonferenziale delle temperature sulle barrette adiacenti a quelle rimosse, portando dunque a rilevanti distorsioni per dilatazioni differenziali delle fibre di guaina diametralmente opposte;
- verrebbe non solo rimossa una rilevante frazione di combustibile (6 barrette su 127 di ogni elemento, ovvero circa $1/21$, $\approx 5\%$), a scapito della massa critica, ma anche

² È opportuno ricordare che la potenza lineare in sé non rappresenti un reale vincolo tecnologico. Il vincolo tecnologico da tenere in considerazione è invece posto sulla temperatura massima del combustibile, considerando da una parte le performance di sicurezza desiderate (nel caso specifico: che il combustibile non raggiunga mai la temperatura di fusione in condizioni incidentali), e dall'altra la massima escursione di temperatura nel transitorio incidentale più significativo. Alla luce di tali informazioni, la temperatura massima del combustibile in condizioni nominali è fissata così da accomodare un sufficiente margine di sicurezza, e da tale valore dedotta la massima potenza lineare che consente di rispettare tale riferimento.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 050	0	L	9	15

imposto, alle rimanenti barrette, di farsi carico della potenza delle barrette rimosse, che verrebbe meno, andando ulteriormente ad innalzare la potenza lineare di picco, che già supera i limiti imposti.

Il primo problema potrebbe essere ovviato rimpiazzando le barrette angolari con barrette dummy opportunamente sagomate per strozzare i canali di by-pass, mentre il secondo potrebbe essere risolto solo aumentando il numero degli elementi di combustibile, o l'altezza attiva nelle barrette. Quest'ultima soluzione, in particolare, risulterebbe particolarmente gravosa nel nuovo disegno del nocciolo, al punto da rendere questa prima soluzione poco attraente.

L'ipotesi di traslare centripetamente le barrette angolari è da scartarsi, a causa delle complicazioni che essa implicherebbe sul sistema di ancoraggio al piede, ed in particolare sui binari a cui il piede delle barrette è incastrato: i due che risultano paralleli all'adiacente parete di scatola, infatti, dovrebbero essere opportunamente modificati per accomodare le barrette d'angolo, rendendo però di fatto impossibile – avendo sempre a mente che tutte le operazioni di assemblaggio dell'elemento devono necessariamente essere robotizzate a causa della presenza di ossidi di plutonio nel combustibile – l'inserimento delle altre 5 barrette di parete.

La soluzione prospettata dall'allargamento della chiave della scatola esagonale resta dunque, sotto tutti i punti di vista, quella le cui implicazioni sono più facilmente ovviabili, ed è pertanto quella che viene assunta a riferimento per la concezione della nuova configurazione di nocciolo di ALFRED.

Giocando sulla distanza tra barrette periferiche e scatola, così da incrementare il diametro idraulico dei sottocanali alla parete e dunque il flusso di refrigerante in essi, è possibile investigare l'andamento delle temperature, per tutte le tipologie di sottocanale, in funzione del cosiddetto W/D (il significato dei simboli è chiarito in Figura 6).

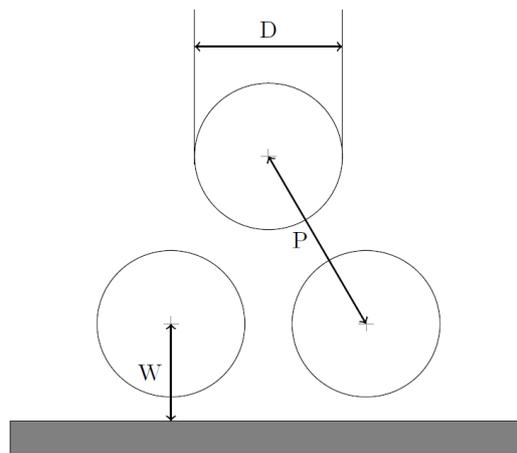


Figura 6 – Definizione dei parametri geometrici di analisi termoidraulica.

I risultati delle simulazioni ottenute con il codice ANTEO in un range di valori del rapporto W/D intorno al valore attualmente adottato per ALFRED (1.165) sono mostrati in Figura 7. Per facilità di comparazione, e velocità di analisi, i risultati sono plottati come salti termici di sottocanale normalizzati al salto termico medio, ossia

$$\Delta T_{norm} = \frac{T - T_{in}}{T_{ave} - T_{in}}$$

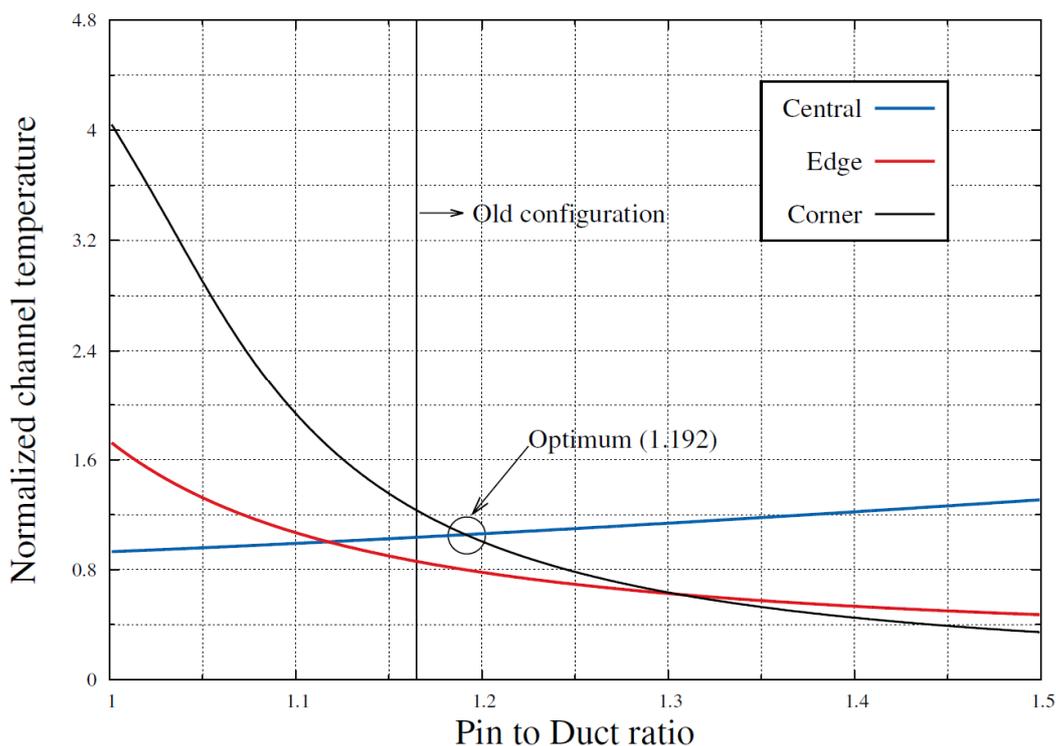


Figura 7 – Analisi parametrica della distribuzione delle temperature normalizzate di sottocanale al variare del rapporto W/D .

Dalla Figura 7 è chiaramente visibile che, nella presente configurazione, il sottocanale angolare è chiaramente sfavorito da un punto di vista termoidraulico; situazione che può essere accomodata aumentando il rapporto W/D fino al punto ottimale (1.192), individuato sul grafico precedente con un circoletto. Per tale valore – corrispondente ad una distanza barretta-parete di 7.266 mm, contro gli attuali 6.981 mm – la temperatura del sottocanale angolare diviene uguale a quella del sottocanale centrale, a fronte di una leggera riduzione di temperatura per i sottocanali angolari. Questo risultato è colto immediatamente confrontando la distribuzione di temperature nel nuovo caso (Figura 8) con quella del caso di riferimento (Figura 4).

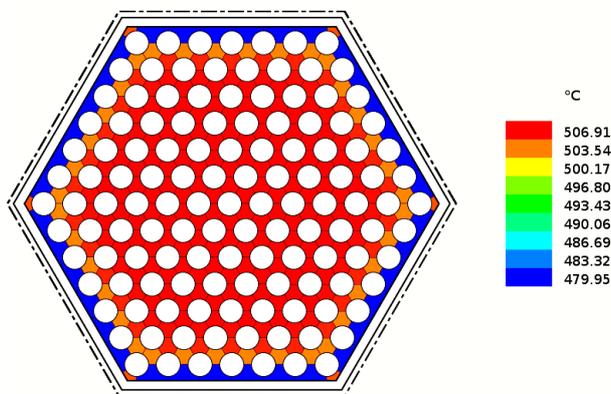


Figura 8 – Distribuzione delle temperature di sottocanale all'estremità superiore della colonna attiva, per l'elemento centrale, nella configurazione ottimizzata qui individuata.

La temperatura massima di refrigerante è ora intorno a 507 °C, circa 26 °C sotto al valore del caso precedente. Si deve però notare che ora – pur essendo uguali le temperature dei sottocanali centrali ed angolari – la temperatura massima di guaina si sposta in corrispondenza del sottocanale centrale, per via del suo più elevato diametro idraulico, dunque un più basso coefficiente di scambio alla parete; è pertanto da aspettarsi una riduzione della temperatura di guaina inferiore ai –26 °C riscontrati per il fluido. Il numero di Nusselt per i sottocanali centrali è circa 16.4; la conducibilità termica è approssimativamente la medesima; il diametro idraulico invece, come anticipato, è invece 9.67 mm, così che alla fine il coefficiente di scambio termico h risulta pari a 30200 W/m²K. Essendo il flusso termico circa 727 kW/m² (un po' più elevato al centro), il salto termico tra parete e fluido risulta dunque 24 °C, portando la temperatura di guaina a 531 °C, circa 17 °C in meno che con la precedente geometria; il margine al valore limite di progetto aumenta così fino a circa 20 °C. Solo un'accurata analisi di propagazione delle incertezze operative, di calcolo ed elementari potrà consentire di stabilire se anche le potenziali macchie calde che si andassero ad individuare sulla superficie della guaina delle barrette più sollecitate rispettano il limite di temperatura individuato per far fronte ai problemi tecnologici legati alla corrosione del rivestimento delle barrette. In ogni caso, è da osservarsi che la modifica qui proposta, che porta ad abbassare la temperatura dei sottocanali angolari portando dunque quelli centrali nella condizione di ospitare barrette calde, determina anche una configurazione in cui il numero delle barrette calde è maggiore e dunque, una condizione in cui l'analisi statistica di macchia calda risulta penalizzata.

Si noti infine anche che all'allargamento della scatola corrisponderebbe non solo un aumento della frazione volumetrica di refrigerante in un elemento, ma anche un aumento del passo degli esagoni nel reticolo del nocciolo, con un conseguente aumento della superficie esterna del nocciolo, dunque delle fughe neutroniche da questo. Quest'ultima modifica potrebbe però essere ovviata considerando la maggior resistenza meccanica del 1515Ti rispetto al T91, così che potrebbe dunque essere sufficiente un minor spessore della scatola per far fronte alla necessità di integrità strutturale per l'elemento.

4. Analisi delle soluzioni al problema del danneggiamento neutronico

Per incrementare lo schermaggio dell'inner vessel, la prima e più banale soluzione sarebbe l'allargamento del diametro dell'inner vessel stesso, così da accomodare un numero maggiore di corone di elementi dummy a sua protezione. Considerando anche la necessità di spazio all'interno dell'inner vessel per far fronte all'incertezza di valutazione della massa critica, senza andare a scapito dello schermaggio, si ritiene inevitabile l'allargamento del diametro dell'inner vessel, nonostante su quest'ultimo fosse stato posto un vincolo durante la fase di progettazione concettuale dell'intero sistema per contenere il volume – dunque le masse ed i costi – del primario.

Per cercare un compromesso tra l'aumento dello schermaggio e la minimizzazione del volume del sistema, si potrebbe pensare anche ad uno schermo polifunzionale, con elementi diversi nelle diverse corone che circondano la regione moltiplicante. Ragionando in tal senso, si riconoscono necessari una regione riflettente, adiacente al nocciolo, per non penalizzare l'economia neutronica, ed una assorbente, immediatamente prima dell'inner vessel, per minimizzare il flusso neutronico.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 050	0	L	12	15

In Tabella 1 sono riportati i valori di flusso neutronico totale e parziali che insistono sulla sezione centrale dell'inner vessel per alcune possibili configurazioni dello schermo, con riferimento a quella attuale.

Tabella 1 – Flussi neutronici totali e parziali all'inner vessel per diverse configurazioni dello schermo.

Configurazione	Flusso E > 1,35 MeV [n/cm² s]	Flusso E > 821 keV [n/cm² s]	Flusso E > 498 keV [n/cm² s]	Flusso E > 111 keV [n/cm² s]	Flusso tot. [n/cm² s]
“LEADER”	5,519E+11	1,587E+12	6,535E+12	2,751E+13	1,682E+14
Mod. 1	4,636E+10	1,339E+11	7,792E+11	4,256E+12	6,575E+13
Mod. 2	2,864E+10	9,807E+10	3,767E+11	1,665E+12	5,573E+12

In entrambe le modifiche è stato considerato un allargamento dello schermo, mentre nella seconda gli elementi dummy della corona più esterna dello schermo, contenenti riflettore, sono stati rimpiazzati con elementi assorbenti, in cui la zirconia stabilizzata con ittria è stata rimpiazzata con carburo di boro (quest'ultimo nella sua composizione isotopica naturale).

Proiettando il tempo necessario ad accumulare i 2 DpA sulla base delle diverse fluenze totali, e preso a riferimento il caso attuale, per il quale tale limite è raggiunto dopo circa 17.5 anni di irraggiamento, si ricavano circa 44.7 anni per la prima configurazione modificata, e ben più di 500 anni in caso siano impiegati elementi assorbenti, come nella seconda modifica proposta.

È inoltre utile far notare che nonostante l'uso di materiali assorbenti, il loro posizionamento in una regione lontana da quella moltiplicante ha consentito di minimizzare l'impatto sulla criticità, valutato in circa -200 pcm.

5. Altre valutazioni e considerazioni di carattere generale

Come si era accennato nella sezione 2.3, l'asestamento della criticità come eseguito in fase di progetto concettuale, è stato svolto per mezzo di un modello di calcolo riconosciuto affetto da diverse assunzioni e semplificazioni, la cui valutazione è essenziale per poter procedere con la definizione di una nuova configurazione di riferimento per ALFRED.

Con riferimento al grado di purezza del Piombo, sono state considerate quattro diverse composizioni elementari, come definite dagli standard russi di raffinamento: i cosiddetti C00, C0, C1 e C2C (in ordine decrescente di purezza). Tutti questi diversi gradi di purezza sono stati presi in considerazione perché commercialmente disponibili; non sono invece stati presi in considerazione ulteriori gradi di purezza (minore rispetto a quella degli standard qui considerati) perché evidentemente inadatti all'uso in reattore a causa delle alte concentrazioni di Bismuto, dunque a potenziali produzioni di Polonio ritenute inaccettabili. In Tabella 2 sono riportate le composizioni elementari del Piombo nei diversi gradi di purezza sopra citati.

Tabella 2 – Composizione del Piombo commerciale nei quattro diversi gradi di raffinamento considerati.

Elemento	Composizione [max %]			
	<i>C00</i>	<i>C0</i>	<i>C1</i>	<i>C2C</i>
Pb	99.9985	99.992	99.985	99.97
Ag	0.00001	0.0003	0.001	0.002
Cu	0.00001	0.0005	0.001	0.002
Zn	0.0001	0.001	0.001	0.002
Bi	0.0005	0.004	0.006	0.02
As	0.0005	0.0005	0.0005	0.002
Sn	0.0005	0.0005	0.0005	0.001
Sb	0.0001	0.0005	0.001	0.005
Fe	0.0001	0.001	0.001	0.001
Mg	0.0001	0.002	0.003	0.003
Ca	0.0001			
Na	0.0001			
Tl	0.0001	Non regolamentato	Non regolamentato	Non regolamentato
Cd	0.0001			
Al	0.0005			
Hg	0.0001			
In	0.0001			

Dai calcoli di neutronica effettuati sostituendo il Piombo puro con Piombo con diverse – crescenti – quantità di impurezze, così come indicato dalle colonne della precedente tabella, si è osservato un impatto crescente sulla criticità, ma sempre piuttosto modesto, variando dai –74 pcm nel caso del grado di purezza massimo (*C00*), ai –77 pcm, –83 pcm ed infine –99 pcm di tutti gli altri, nell’ordine.

Diverso è il discorso quando si va a valutare l’impatto in reattività del materiale con cui si intende fabbricare le scatole degli elementi (T91 nel progetto iniziale, 1515Ti come proposto in questa sede). Il contenuto estremamente diverso di Nickel nei due acciai – circa 1% nel primo, martensitico; circa il 15% nel secondo, austenitico – determina infatti un aumento sensibile delle catture parassite del nuovo materiale, con un effetto, sulla criticità, stimato in circa –400 pcm. Come però già fatto notare alla fine del Paragrafo 3, il nuovo materiale per la scatola esagonale ha proprietà termomeccaniche tali da suggerire la possibilità di un assottigliamento della parete della scatola stessa, senza comprometterne le funzionalità strutturali. L’impatto sulla reattività di una modifica in tal senso sarebbe evidente, e tale per cui una riduzione anche solo di 0.5 mm sullo spessore porterebbe ad un guadagno di reattività di circa +580 pcm, più che compensando l’aumento delle catture.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 050	0	L	14	15

6. Conclusioni

È stata svolta l'analisi di alcuni punti critici della precedente configurazione del nocciolo di ALFRED, e soluzioni opportune sono state individuate, criticamente analizzate e – ove possibile – saggiate stimandone l'impatto sul parametro di progetto che le medesime erano state chiamate a correggere.

Tutte le soluzioni proposte sembrano – in questa fase – ben soddisfare i requisiti inizialmente posti, e presentando implicazioni tutte apparentemente ovviabili, dunque senza che alcun punto critico emerga dal presente studio.

Anche per quanto concerne lo studio della criticità del nocciolo, tutti gli impatti risultano più o meno marcati, ma mai tali da indicare di non poter essere compensati agendo sulla composizione del combustibile, senza in tal modo violare il limite sul contenuto massimo di Plutonio.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 050	0	L	15	15

Bibliografia

- [1] U.S. Department Of Energy Nuclear Energy Research Advisory Committee and Generation IV International Forum. A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems. Technical Report GIF(2002), <http://www.gen-4.org/Technology/roadmap.htm>.
- [2] G. Grasso *et al.* A core design approach aimed at the sustainability and intrinsic safety of the European Lead-cooled Fast Reactor. In Proceedings of *Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios (FR13)*, Paris, France, March 4-7, 2013.
- [3] G. Grasso *et al.* Demonstrating the effectiveness of the European LFR concept: the ALFRED core design. In Proceedings of *Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios (FR13)*, Paris, France, March 4-7, 2013.
- [4] E. Bubelis *et al.* LFR safety approach and main ELFR safety analysis results. In Proceedings of *Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios (FR13)*, Paris, France, March 4-7, 2013.
- [5] EURATOM Seventh Framework Programme. Lead-cooled European Advanced DEMonstration Reactor (LEADER). Proposal/Contract no. FP7 – 249668, (2010), <http://www.leader-fp7.eu/default.aspx>.
- [6] G. Grasso et al. The core design of ALFRED, a demonstrator for the European lead-cooled reactors. *Nucl. Eng. Des.* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.07.032>
- [7] C. Petrovich *et al.* Definition of the ALFRED core and neutronic characterization. Technical Report LEADER-DEL007-2012 rev. 1, March 2013.
- [8] G. Grasso *et al.* ALFRED core: summary, synoptic tables, conclusions and recommendations. Technical Report LEADER-DEL027-2013, May 2013.
- [9] F. Manni. Mechanical design and drawings of ALFRED pin/fuel assembly/core. Technical Report LEADER-TEC054-2011, June 2012.
- [10] K. Mikiyuk *et al.* Thermal-hydraulic assessment of the ALFRED core. Technical Report LEADER-TEC056-2012, March 2013.
- [11] D. Gugiu and C. Petrovich. ALFRED core: DpA rates in the main components, activation, doses. Technical Report LEADER-TEC061-2012, January 2013.
- [12] S. Cevolani. ANTEO: An optimised PC computer code for the steady state thermal hydraulic analysis of rod bundles. Technical Report 9713, TIC Foreign Exchange Reports, 1996.
- [13] D. Mattioli and S. Cevolani. ANTEO-LFR: a PC code for thermal-hydraulic optimized core analysis in a Lead Fast Reactor. Technical Report UTFISSM-P000-007, ENEA, 2012.