



Ricerca di Sistema elettrico

Progetto del circuito secondario ad acqua in pressione dell'impianto a metallo liquido pesante NACIE

I. Di Piazza, P. Gaggini

PROGETTO DEL CIRCUITO SECONDARIO AD ACQUA IN PRESSIONE DELL'IMPIANTO A METALLO LIQUIDO PESANTE NACIE

I. Di Piazza, P. Gaggini (ENEA)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

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

Titolo

Progetto del circuito secondario ad acqua in pressione dell'impianto a metallo liquido pesante NACIE

Descrittori

Tipologia del documento: Rapporto Tecnico

Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE su sicurezza nucleare e reattori di IV generazione

Argomenti trattati: Termoidraulica
Tecnologia dei Metalli Liquidi
Generation IV Reactors

Sommario

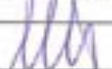
Nel presente report viene illustrato il design del circuito secondario di acqua in pressione dell'impianto a metallo liquido NACIE. Viene anche descritto il modello CFD della sezione HX a bassa potenza. Tale modello viene utilizzato per effettuare i pre-test della prossima campagna sperimentale.

Note

Autori: I. DI PIAZZA, P. GAGGINI (ENEA)

Copia n.

In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	18/09/2013	NOME	I. Di Piazza	M. Tarantino	M. Tarantino
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA		REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 025	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 2	di 20
--	--	------------------	----------------------	------------------	-----------------

Index

1. Introduzione.....	3
2. Concettualizzazione UPGRADE impianto NACIE (NACIE-UP).....	7
3. Circuito secondario ad acqua in pressione.....	11
4. Modello CFD dello scambiatore di calore	13
5. Risultati	15
6. Conclusioni.....	19
7. Bibliografia	20

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 025	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 3	di 20
--	--	------------------	----------------------	------------------	-----------------

1. Introduzione

I reattori di quarta generazione, sono oggetto di un’iniziativa avviata dal Dipartimento dell’Energia (DOE) USA nel gennaio 2000, allorquando dieci paesi si sono uniti per formare il Generation IV International Forum (GIF) col fine di sviluppare i sistemi nucleari di futura generazione, cioè i sistemi che potranno divenire operativi a partire dal 2030, subentrando all’attuale generazione di reattori a neutroni termici refrigerati ad acqua.

- ✓ I sistemi nucleari di quarta generazione sono stati concepiti per rispettare i seguenti requisiti:
- ✓ Sostenibilità, ovvero massimo utilizzo del combustibile e minimizzazione dei rifiuti radioattivi;
- ✓ Economicità, ovvero basso costo del ciclo di vita dell’impianto e livello di rischio finanziario equivalente a quello di altri impianti energetici;
- ✓ Sicurezza e affidabilità; in particolare i sistemi di quarta generazione dovranno avere una bassa probabilità di danni gravi al nocciolo del reattore e tollerare anche gravi errori umani; non dovranno, inoltre, richiedere piani di emergenza per la difesa della salute pubblica, non essendoci uno scenario credibile per il rilascio di radioattività fuori dal sito;
- ✓ Resistenza alla proliferazione e protezione fisica tali da rendere non conveniente il furto o la produzione non dichiarata di materiale nucleare o l’uso illecito della tecnologia e da assicurare un’aumentata protezione contro attacchi terroristici.

I paesi costituenti il GIF sono: Argentina, Brasile, Canada, Cina, Federazione Russa, Francia, Giappone, Gran Bretagna, Repubblica di Corea (Sud), Repubblica del Sud Africa, Svizzera, e Stati Uniti; anche l’Euratom, per l’Unione Europea, aderisce al Forum.

L’Italia – grazie all’impegno su buona parte dei progetti europei del VI e VII Programma Quadro indirizzati allo sviluppo dei reattori di IV generazione ed alla partecipazione per conto Euratom di singoli ricercatori ad alcune strutture organizzative di GIF - di fatto partecipa a Generation IV tramite l’Euratom.

Oltre 100 esperti dei 10 paesi aderenti a GIF hanno lavorato per due anni all’esame di un centinaio di alternative tecnologiche, e –con l’emissione nel dicembre 2002 di una *Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*- sono pervenuti alla selezione dei sei concetti più promettenti per la IV generazione di reattori nucleari, intorno a cui organizzare il successivo programma di ricerca e sviluppo. I sei sistemi nucleari selezionati da GIF sono:

- ✓ Gas-Cooled Fast Reactor (GFR) – reattori a spettro veloce, refrigerati a elio e con ciclo del combustibile chiuso, per una più efficiente conversione dell’uranio fertile e la gestione degli attinidi;
- ✓ Lead-Cooled Fast Reactor (LFR) - reattori a spettro veloce, refrigerati a piombo o eutettico piombo-bismuto e con ciclo del combustibile chiuso, per una più efficiente conversione dell’uranio fertile e la gestione degli attinidi;
- ✓ Molten Salt Reactor (MSR) – reattori a fissione prodotta in una miscela circolante di sali fusi, con spettro epitermico e possibilità di gestione degli attinidi;

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 025	0	L	4	20

- ✓ Sodium-Cooled Fast Reactor (SFR) - reattori a spettro veloce, refrigerati a sodio e con ciclo del combustibile chiuso, per una più efficiente conversione dell'uranio fertile e la gestione degli attinidi;
- ✓ Supercritical-Water-Cooled Reactor (SCWR) – reattore refrigerato ad acqua a temperatura e pressione oltre il punto critico, a spettro termico o veloce;
- ✓ Very-High-Temperature Reactor (VHTR) – reattore moderato a grafite e refrigerato ad elio, con ciclo del combustibile ad un solo passaggio (once-through). Questo reattore è ottimizzato per la produzione termochimica di idrogeno, oltre che di elettricità.

In ambito Generation IV l'impegno italiano è limitato ai sistemi LFR (Lead cooled Fast Reactor – LFR), nella configurazione a piscina integrata, poiché potenzialmente soddisfano tutti i requisiti introdotti per i sistemi nucleari di quarta generazione.

Sostenibilità: efficace utilizzo del combustibile e minimizzazione delle scorie.

Il piombo è un refrigerante che presenta una sezione di assorbimento neutronica molto bassa (inferiore a quella del sodio) e uno scarso potere moderante. Questa proprietà nucleare, intrinseca al refrigerante, permette di progettare ed esercire noccioli a spettro neutronico veloce anche con geometrie con un elevato rapporto refrigerante/combustibile, e quindi fuel bundles con un elevato rapporto passo su diametro. Questa caratteristica fornisce buoni margini di refrigerazione del nocciolo anche in circolazione naturale in eventi incidentali.

Inoltre la possibilità di operare con flussi neutronici “duri” consente di ottenere noccioli con rapporti di conversione unitario (il tasso di produzione di nuovo materiale fissile nel combustibile coincide con il tasso di consumo dello stesso), e quindi noccioli a lunga vita ed elevato tasso di bruciamento (elevata efficienza di utilizzo del combustibile, circa 150-200 volte superiore agli attuali sistemi di seconda e terza generazione).

Un flusso neutronico veloce permette non solo di accrescere la sostenibilità di tali sistemi mediante un utilizzo più efficace e razionale del combustibile nucleare, ma permette contemporaneamente una drastica riduzione della generazione di scorie ad elevata radiotossicità grazie ad un ciclo del combustibile “chiuso”. Le scorie prodotte sono infatti prive di plutonio e attinidi minori, che vengono completamente riciclati e riutilizzati nel ciclo del combustibile (detto per l'appunto chiuso), a parte un piccolo inventario (concentrazione di equilibrio) necessario per rendere il ciclo chiuso realizzabile dal punto di vista delle trasmutazioni nucleari. Il Plutonio e gli attinidi minori sono infatti i principali responsabili dell'elevata radiotossicità delle scorie nucleari dei sistemi GEN-II, GEN-III, che richiedono tempi di stoccaggio in siti geologici dell'ordine del milione di anni.

Con un ciclo del combustibile chiuso i sistemi LFR permettono di ridurre i volumi di scorie nucleari prodotte e la relativa radiotossicità, con la sola necessità di uno stoccaggio in siti superficiali per un tempo dell'ordine di 300-400 anni.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 025	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 5	di 20
--	--	------------------	----------------------	------------------	-----------------

Economicità: costi competitivi e rischio sul capitale investito paragonabile ad ogni altra forma di produzione di energia elettrica.

I sistemi LFR sono ideati e progettati per essere estremamente semplici, riducendo quindi i tempi di costruzione, i tempi di ammortamento del capitale investito (parametro molto critico per i sistemi nucleari), e il costo di produzione dell'energia elettrica.

Tale semplicità è in gran parte consentita dalle intrinseche proprietà del refrigerante utilizzato. Il piombo infatti non interagisce chimicamente con aria e acqua (a differenza del sodio), e ha una bassa tensione di vapore. Ciò consente di realizzare sistemi a bassa pressione (praticamente pressione atmosferica) e consente di installare direttamente nel sistema primario il Generatore di Vapore, portando ad una enorme semplificazione impiantistica (nei sistemi refrigerati a sodio ciò non è praticabile, e un apposito circuito intermedio a sodio è previsto, aumentando la complessità, dimensioni e costi di impianto).

Inoltre la diretta installazione del Generatore di Vapore nel sistema primario migliora l'efficienza energetica del sistema LFR, riducendo i costi di produzione dell'energia elettrica.

Infine mediante un accorto ed innovativo progetto di impianto, che lo rende estremamente semplice, è possibile sostituire o comunque ispezionare tutti i componenti del sistema primario, incrementando sensibilmente il fattore di utilizzo dell'impianto e riducendo quindi i tempi di ammortamento sul capitale investito.

Sicurezza e Affidabilità: elevata sicurezza e affidabilità durante l'esercizio, minimo rischio di danneggiamento del nocciolo, esclusione di un piano di evacuazione

I sistemi refrigerati a piombo, visto l'elevato punto di ebollizione del refrigerante utilizzato (1750°C), la sua bassa tensione di vapore anche ad elevate temperature, e le sue ottime capacità schermanti, sono progettati per essere eserciti a pressione atmosferica e a temperatura relativamente bassa. Ciò consente di ottenere elevati standard di sicurezza e affidabilità durante l'esercizio, con un rischio di esposizione agli operatori molto modesto vista la capacità del piombo di intrappolare i prodotti di fissione anche volatili e di schermare le radiazioni gamma.

Il piombo presenta inoltre ottime proprietà anche da un punto di vista termo-fisico (elevata capacità di asportare potenza termica, elevato calore specifico, elevato coefficiente di espansione termica) che associate alle ottime proprietà neutroniche permette di progettare noccioli ad elevato rapporto passo su diametro, il che implica direttamente sistemi a ridotte perdite di carico e quindi contenute potenze di pompaggio. Inoltre tale configurazione permette di incrementare le capacità del sistema di asportare la potenza di decadimento in regime di circolazione naturale, quindi in maniera completamente passiva, permettendo quindi una sensibile semplificazione dei sistemi di controllo e protezione e accrescendo ulteriormente il grado di sicurezza di tali sistemi.

Da un punto di vista prettamente nucleare i reattori refrigerati a piombo presentano un coefficiente di reattività per presenza di vuoto negativo nel caso di noccioli di piccole-medie dimensioni e leggermente positivi nel caso di noccioli di grosse dimensioni. Tuttavia visto l'elevato punto di ebollizione, e le soluzioni ingegneristiche proposte, non esiste alcun scenario ragionevolmente ipotizzabile che possa portare alla formazione di vuoto all'interno del nocciolo di un LFR.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 025	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 6	di 20
--	--	------------------	----------------------	------------------	-----------------

Inoltre in caso di rottura dei tubi del Generatore di Vapore, vista l'elevata densità del piombo e le soluzioni progettuali adottate, il rischio di inserzione di vapore nel centro del nocciolo (dove il coefficiente di vuoto è maggiormente positivo) è estremamente ridotto.

Va infine evidenziato come l'elevata densità del piombo, nel caso di una improbabile fusione del nocciolo, riduce significativamente il rischio di una successiva compattazione del combustibile e quindi di una nuova condizione di criticità del sistema. I fenomeni di dispersione del combustibile nel refrigerante sono infatti predominanti viste le densità del combustibile nucleare paragonabili a quelle del piombo e l'attitudine del piombo ad instaurare moti di circolazione naturale in ogni condizione incidentale ipotizzabile. Tale scenario non è invece trascurabile per i reattori ad acqua e a sodio, per i quali addirittura il rischio di parziale o completa fusione del nocciolo è meno ridotto che non nel caso di un LFR.

D'altro canto l'elevato punto di fusione del piombo (327°C) che può indurre problemi di esercizio e controllo dei sistemi LFR, introduce un enorme vantaggio per quanto riguarda la sicurezza di tali sistemi. In caso di rottura del vessel con fuoriuscita di piombo dal sistema primario, questo tenderebbe immediatamente a solidificare arrestando la fuoriuscita, senza alcuna conseguenza per le strutture circostanti data anche la sua inerzia chimica con aria e acqua. Per i sistemi a sodio ciò non è neanche lontanamente immaginabile.

Rimane infine la questione della produzione del Po-210, volatile e altamente pericoloso per la salute pubblica. Con una adeguata selezione dei materiali e una corretta implementazione dei sistemi di controllo della chimica, e ancora date le attitudini del piombo ad intrappolare i prodotti di fissione altamente volatili, il rischio di rilascio di Po-210 è estremamente ridotto.

Resistenza alla Proliferazione e Protezione Fisica: impossibilità di avere plutonio per la fabbricazione di bombe, elevata sicurezza per la salute pubblica in caso di atti terroristici.

L'uso di combustibile ad ossidi misti contenente attinidi minori (nel lungo termine) rende questi sistemi enormemente inefficaci per la produzione di plutonio weapon-grade. Inoltre nel breve termine, le proprietà neutroniche del piombo premettono la concezione di noccioli a lunga vita che li rendono inutilizzabili per la produzione di plutonio.

L'uso di un refrigerante chimicamente compatibile con aria e acqua operante a bassa pressione permette di aumentare sensibilmente la protezione fisica della popolazione residente nelle zone limitrofe all'installazione nucleare, riducendo inoltre la necessità di robusti e complessi sistemi di protezione contro eventi catastrofici iniziati da eventi terroristici. Inoltre per i sistemi LFR in nessuna configurazione è previsto l'utilizzo di fluidi infiammabili, eliminando quindi il rischio di propagazione di incendi nel sito.

Infine, viste le intrinseche proprietà del refrigerante adottato, non vi è alcun scenario ipotizzabile che possa indurre una propagazione catastrofica della pressione di esercizio del sistema.

L'Accordo di Programma (AdP) fra Ministero dello Sviluppo Economico (M.S.E.) ed ENEA, nell'ambito del tema di ricerca "Energia Nucleare" si pone diversi obiettivi programmatici concernenti lo sviluppo di competenze in tale ambito.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 025	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 7	di 20
--	--	------------------	----------------------	------------------	-----------------

In tale ambito, l'ENEA ha assunto l'impegno di svolgere studi di scambio termico in fuel pin bundle prototipici in regime di circolazione naturale o mista, mediante l'upgrade dell'impianto NACIE. Tali attività saranno svolte in sinergia con le azioni di ricerca e sviluppo sostenute da ENEA nell'ambito progetto europeo SEARCH (FP7-EC). L'attività prevede quindi la progettazione e installazione del circuito secondario ad acqua in pressione (16 bar) e la modifica del circuito di fill&drain che permetta di ospitare un fuel pin bundle prototipico evitandone il plugging nelle procedure di avvio e drenaggio di impianto.

A questo scopo, l'impianto sperimentale NACIE verrà modificata e migliorata nella strumentazione, nelle procedure e nel controllo (NACIE-UP).

Le principali modifiche riguardano:

- ✓ installazione di un Fuel Pin Bundle Simulator (19 pin, 250 kW);
- ✓ installazione di uno Scambiatore di calore (HX) shell and tube da 250 kW;
- ✓ installazione flow-meter ad induzione elettromagnetica;
- ✓ installazione di valvole a sfera servo-attuate nel circuito primario;
- ✓ installazione di prese di pressione e temperatura in vari rami;
- ✓ installazione circuito secondario ad acqua in pressione a 16 bar;
- ✓ implementazione sistema di fill&drain;
- ✓ implementazione nuovo sistema di acquisizione dati;

Il presente report documenta il lavoro di design sul circuito secondario di acqua a 16 bar.

2. Concettualizzazione UPGRADE impianto NACIE (NACIE-UP)

L'impianto a metallo liquido pesante NACIE-UP è stato definito e progettato con lo scopo di realizzare una “*multipurpose facility*” che possa supportare sperimentalmente lo sviluppo tecnologico dei sistemi refrigerati a piombo-bismuto (LBE) fluente. NACIE-UP risulta essere un Upgrade dell'esistente impianto NACIE, di cui rimane integro il vaso di espansione e tubazioni collegate, ed il circuito ausiliario a gas.

In particolare, gli ambiti nel quale si inserisce l'attività di ricerca e sviluppo prevista sull'impianto NACIE-UP, riguardano:

- ✓ caratterizzazione scambio termico in sistemi a metallo liquido pesante;
- ✓ termo-fluidodinamica dei metalli liquidi pesanti;
- ✓ caratterizzazione componenti prototipici;
- ✓ qualifica e caratterizzazione strumentazione;
- ✓ qualifica e validazione codici di calcolo di fluidodinamica computazionale (CFD);
- ✓ qualifica e validazione codici di sistema.

L'impianto NACIE-UP consiste di un circuito a piombo-bismuto (LBE) a sviluppo prevalentemente verticale, costituito da tratti di tubazione con estremità flangiate con diverse funzioni e da componenti d'impianto come descritti di seguito. Inoltre è prevista la realizzazione ed il montaggio del circuito secondario ad acqua in pressione a 16 bar.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 025	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 8	di 20
--	--	------------------	----------------------	------------------	-----------------

Le tubazione del circuito primario sono 2 ½ " S40 con flange di collegamento WN 2 ½ " 300 lbs, mentre le tubazione del circuito secondario sono 4" S40 con flange di collegamento WN 4" 300 lbs.

L'upgrade dell'impianto NACIE è stato concettualizzato secondo lo schema riportato nel P&ID, NA-0100, vedi Figura 1. Il layout del circuito primario è riportato in Figura 2. Nel presente documento viene descritto l'upgrade relativo al circuito secondario (acqua in pressione 16 bar).

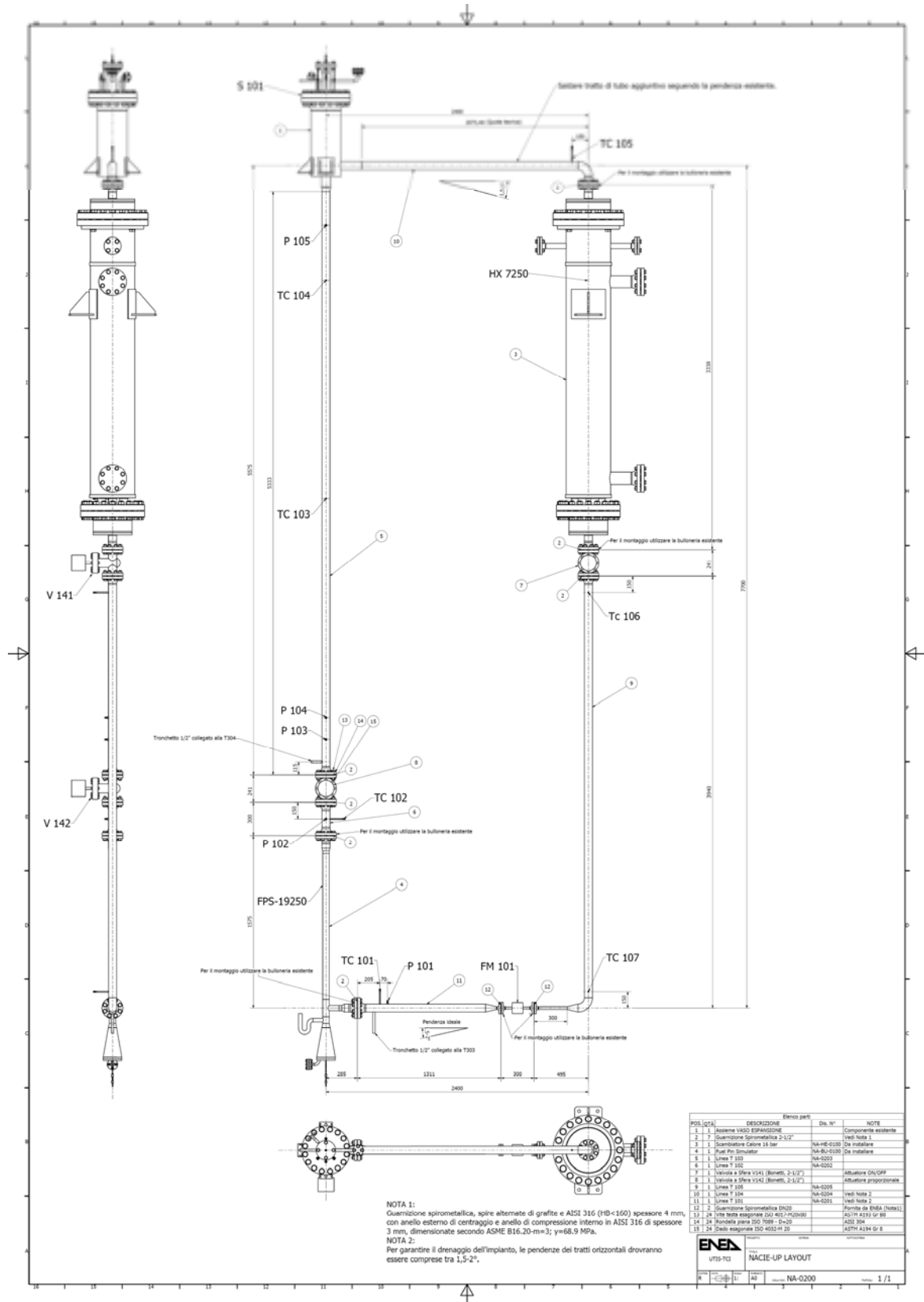


Figura 2 Layout schematico del circuito primario della facility NACIE-UP.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 025	0	L	11	20

3. Circuito secondario ad acqua in pressione

Il circuito secondario di acqua in pressione (16 bar) sarà collegato al circuito primario attraverso lo scambiatore di calore lato mantello, nella sezione a bassa potenza mediante flange WN 1 ½ ", 300 lbs, ANSI B 16.5, e nella sezione ad alta potenza mediante flange WN 4", 300 lbs, ANSI B 16.5.

Il P&ID allegato (NA-0100, Figura 1) contiene la concettualizzazione del circuito secondario. I layout concettuale del circuito secondario inserito nell'edificio PEC e del posizionamento dei diversi componenti del circuito è riportato in Figura 3. La definizione di dettaglio del layout, la progettazione di dettaglio, realizzazione, certificazione, montaggio e collaudo in situ del circuito secondario è a completo carico del fornitore.

Il piping del circuito secondario sarà costituito principalmente da tubazioni in acciaio inox AISI304/316 da 4" S40. Fanno eccezione i rami di collegamento (T212, T214) con la sezione a bassa potenza che avranno dimensioni 1 ½ " S40. La realizzazione e installazione delle tubazioni ed i relativi supporti sono completa responsabilità del fornitore.

Nel circuito secondario sono previste valvole in maggioranza motorizzate. Tutte le valvole indicate nel P&ID dovranno essere acquistate dal fornitore compresi di attuatori ON/OFF e dovranno essere installate nel circuito secondario. Il fornitore dovrà responsabilizzarsi, concordando con ENEA la scelta del tipo di valvola e le relative dimensioni.

La pompa di circolazione PC201, esclusa dalla fornitura, dovrà essere collegata al piping del circuito secondario. La pompa suddetta è già stato acquistato ed è posizionato già nella hall sperimentale.

L'aerotermostato E201, escluso dalla fornitura, dovrà essere collegato al piping del circuito secondario. L'aerotermostato suddetto è già stato acquistato ed è posizionato già nella hall sperimentale.

Il pressurizzatore dovrà essere progettato e realizzato per garantire una pressione di esercizio di 16 bar. La pressurizzazione del cielo verrà garantita attraverso la linea Argon con riduttore di pressione. Un sistema di regolazione con pressostato e valvola di sfiato garantirà la corretta pressurizzazione del componente. Il dimensionamento, la progettazione, la realizzazione ed il montaggio in situ del componente, nonché la sua certificazione PED sono completa responsabilità del fornitore. I dati di progetto sono:

- ✓ Temperatura di Progetto: 212 °C
- ✓ Temperatura di Esercizio: 200 °C
- ✓ Tipo di Fluido: acqua demineralizzata
- ✓ Pressione di Progetto: 20 bar
- ✓ Pressione di Esercizio: 16 bar
- ✓ Volume: da definire dal Fornitore
- ✓ Gas di Pressurizzazione: Argon

La sezione scaldante del circuito secondario sarà realizzata sul tratto T204. Sarà costituita da 5 collari scaldanti per tubazioni da 4" della potenza di circa 3 kW ciascuno (potenza installata totale dell'ordine dei 15 kW).

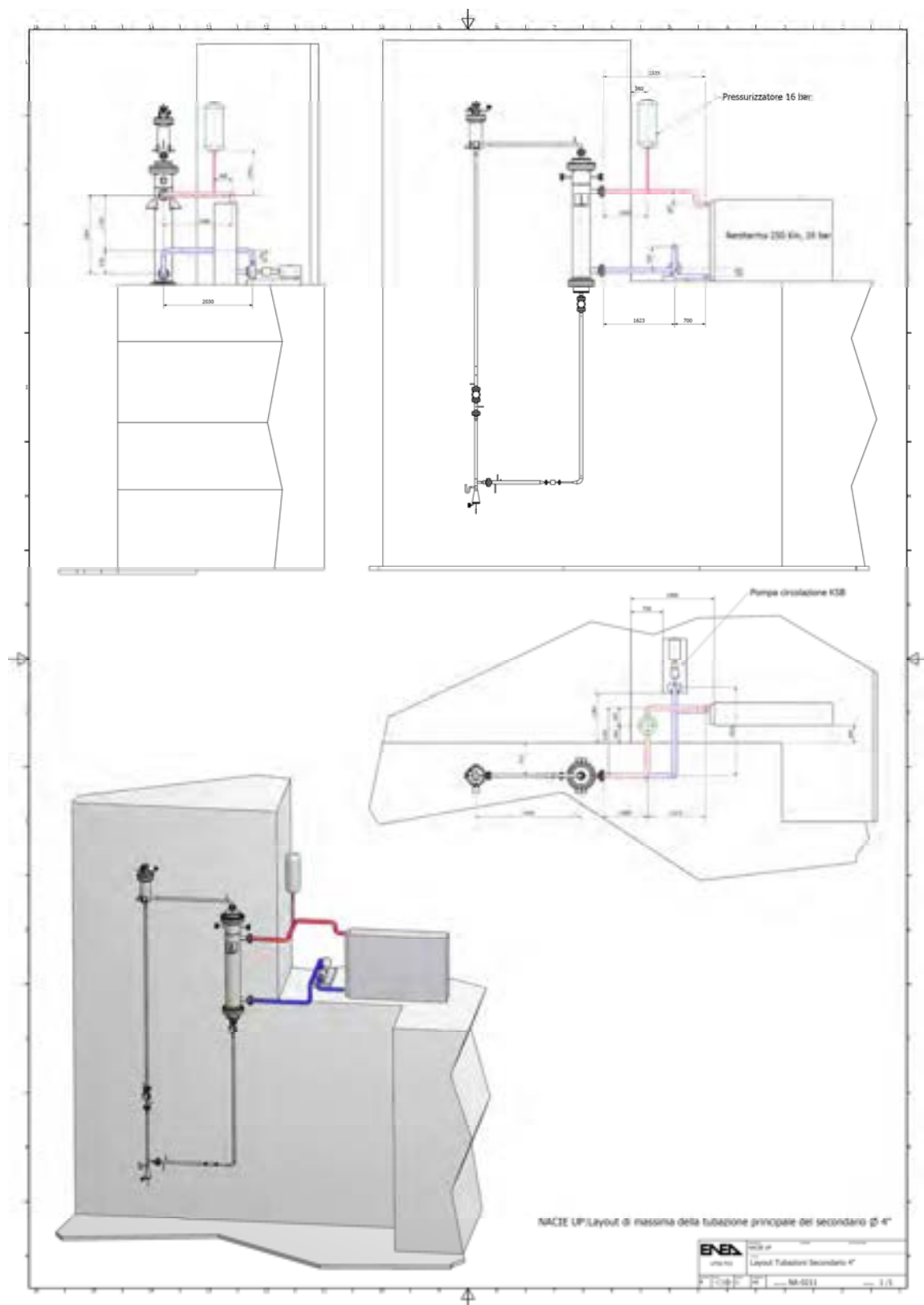


Figura 3 Layout del circuito secondario di NACIE-UP inserito nelle strutture civile dell'edificio PEC (ENEA Brasimone).

4. Modello CFD dello scambiatore di calore

Per garantire la possibilità di pre-test sull'accoppiamento primario-secondario, si è realizzato un modello numerico CFD della sezione a bassa potenza (0-30 kW) dello scambiatore di calore.

Il modello riproduce la geometria reale dell'HX ed include la parte acqua lato mantello, LBE lato tubi, i tubi in acciaio inossidabile interno ed esterni ed il gap di polvere. Queste ultime tre strutture sono trattate come solide e trasmettono il calore per conduzione, mentre le equazioni di Navier-Stokes con modello di turbolenza SST $k-\omega$ sono state risolte nei domini fluidi. In tal modo il modello è full 3D ed include lo scambio termico coniugato.

Per LBE, sono state considerate le proprietà fisiche a 300 °C, come riportato in Tabella 1.

Tabella 1 Proprietà fisiche del LBE a 300 °C.

ρ [kg/m ³]	Density	10337
ν [m ² /s]	Kinematic viscosity	$1.8 \cdot 10^{-7}$
k [W/mK]	Thermal Conductivity	12.1
c_p [J/kgK]	Specific heat at constant pressure	145.9
Pr	Prandtl number	0.022
α [1/K]	Thermal expansion coefficient	$1.28 \cdot 10^{-4}$

Per l'acciaio dei tubi AISI316L, si è introdotta una conducibilità termica variabile con la temperatura, secondo l'andamento lineare $k = 14.35 + 0.0142 T [^{\circ}\text{C}]$ [W/mK] che rispecchia i dati noti in letteratura. Per la polvere nel gap, è stata considerata una conducibilità termica variabile secondo i risultanti della campagna sperimentale sulla facility TxP [1], tramite la funzione $k = 0.2287 + 0.0015 T [^{\circ}\text{C}]$ [W/mK], che fornisce valori di conducibilità tra 0.5 ed 1 nel range di interesse. Tali valori appaiono probabilmente sottostimati rispetto a quanto risulta dall'operatività di scambiatori di calore costruiti con questa stessa tecnologia; ad esempio dalle prove sperimentali eseguite su NACIE [2], risulterebbe un valore di k della polvere più elevato tra 1 ed 1.5. In ogni caso, per i presenti calcoli viene adottata la funzione data sopra derivata dagli esperimenti su TxP.

Il dominio del modello computazionale è mostrato in Figura 4 (vista prospettica) ed in Figura 5 (vista dall'alto). In particolare, in Figura 5 è possibile osservare il gap di polvere, i tubi e le sezioni di ingresso ed uscita del fluido secondario.

Condizioni di adiabaticità e no-slip sono state imposte alla parete del mantello, e condizioni di pressione sono state imposte alle sezioni di uscita per acqua ed LBE.

Portate di massa ($\dot{m}_{in}^w, \dot{m}_{in}^{LBE}$) e temperature (T_{in}^w, T_{in}^{LBE}) sono state imposte alle sezioni di ingresso per l'acqua ed LBE e questi parametri controllano completamente i fenomeni di scambio termico e determinano la potenza totale scambiata.

La griglia computazionale è strutturata multiblocco e risolve lo strato limite meccanico e termico sia per l'acqua che per LBE con $y^+ \sim 1$ alla parete. La mesh nella sezione centrale è mostrata in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

Il modello ed il calcolo viene effettuato con ANSYS CFX-13.

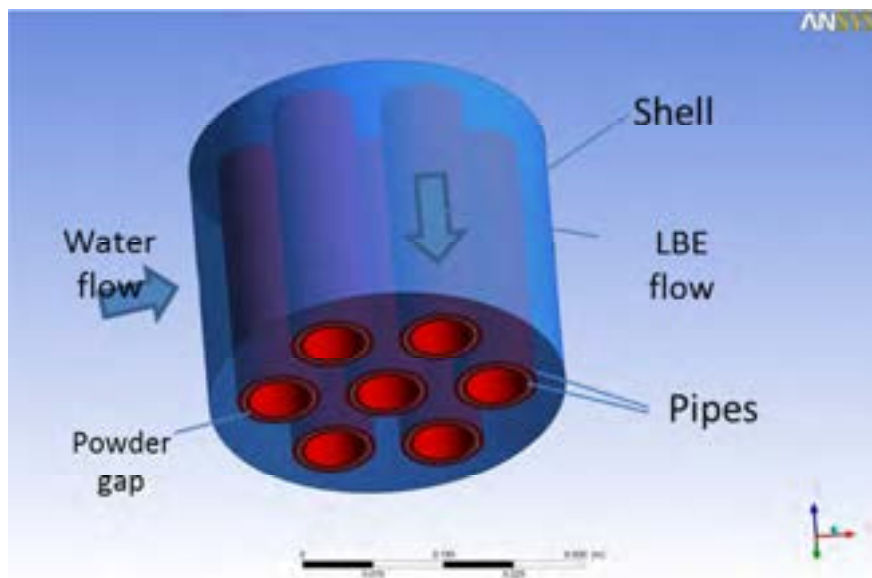


Figura 4 Dominio di calcolo dello scambiatore di calore: vista prospettica.

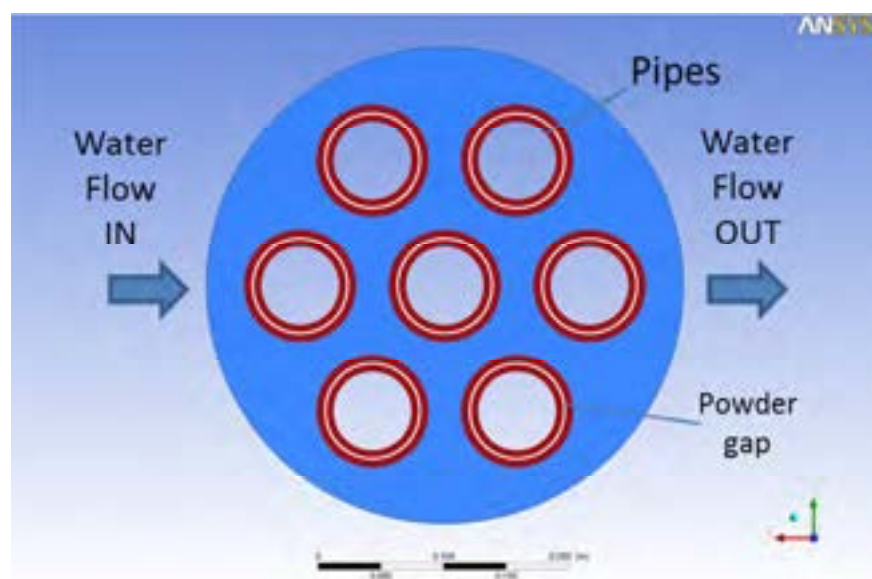


Figura 5 Dominio di calcolo dello scambiatore di calore: vista dall'alto.

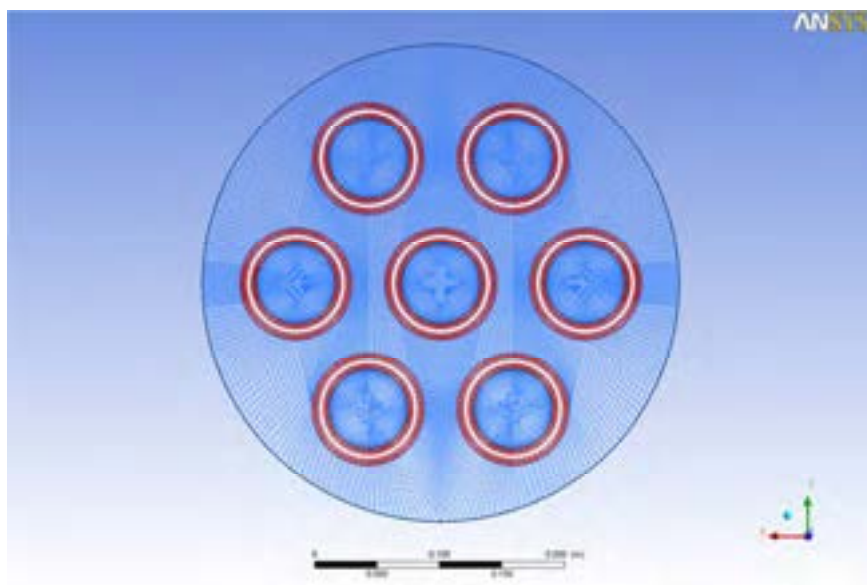


Figura 6 Mesh di calcolo adottata: sezione intermedia.

5. Risultati

Un esempio di calcolo accoppiato convettivo-conduttivo dello scambio termico nello scambiatore di calore di NACIE-UP è riportato in questa sezione.

Le condizioni al contorno del caso simulato e la potenza totale scambiata sono riportate in Tabella 2.

Figura 7 mostra la distribuzione di temperatura sulla superficie esterna dei tubi a contatto con l'acqua secondaria. E' possibile osservare il minimo (100 °C) in corrispondenza della zona di impingement della portata secondaria, mentre i massimi (120 °C) sono localizzati in prossimità della zona ingresso LBE (in alto) nelle zone di ristagno del fluido secondario.

Tabella 2 Condizioni al contorno e potenza totale scambiata per il caso descritto.

CASE	$\dot{m}_{in}^{LBE}$ [kg/s]	T_{in}^{LBE} [°C]	$\dot{m}_{in}^w$ [m ³ /h]	T_{in}^w [°C]	Q [kW]
2	1.37	350	10	100	15.3

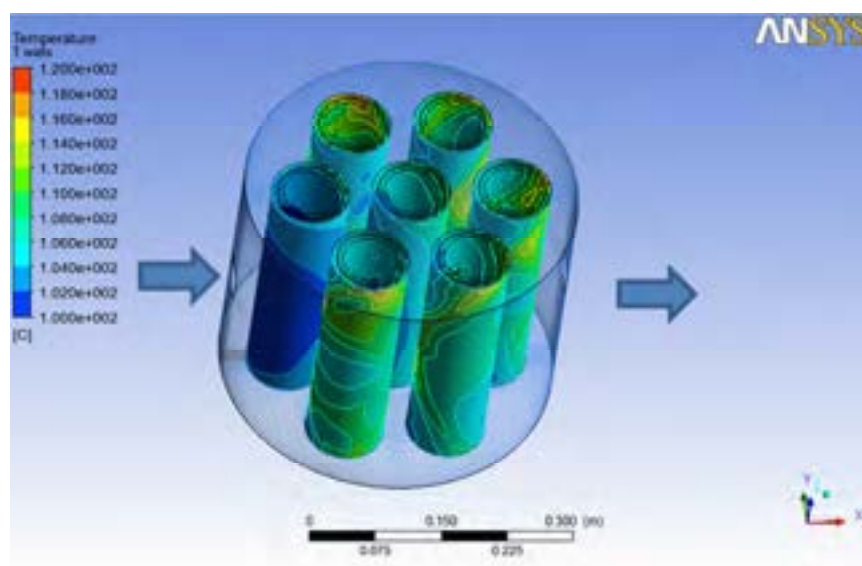


Figura 7 Distribuzione di temperatura sulla superficie esterna dei tubi a contatto con l'acqua secondaria.

Errore. L'origine riferimento non è stata trovata. mostra il vector plot di velocità del fluido secondario sul piano medio; è da notare l'impingement del fluido nella zona di ingresso e la presenza di una zona di ristagno a valle.

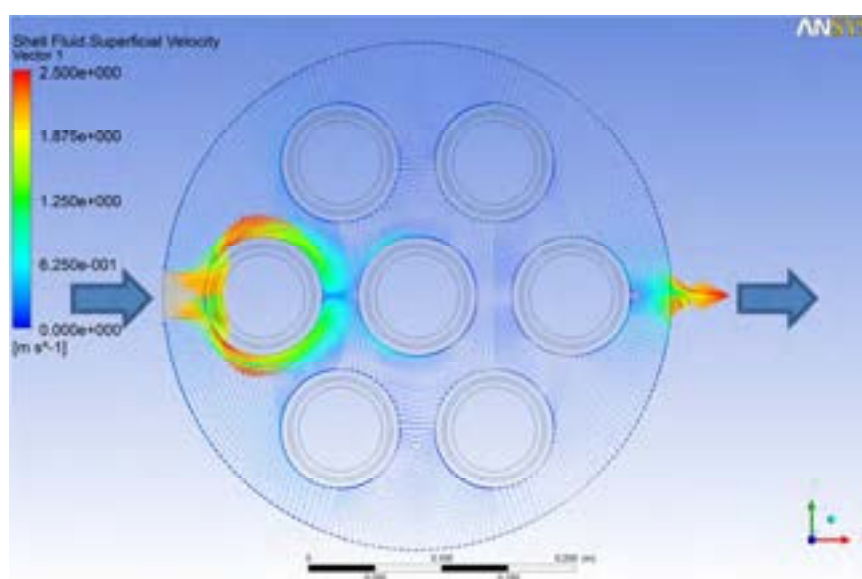


Figura 8 Vector plot relativo alla circolazione del fluido secondario sul piano medio.

Per ciò che riguarda il lato tubi, Figura 9e Figura 10 mostrano rispettivamente le distribuzioni di velocità principale e di temperatura nel fluido primario.

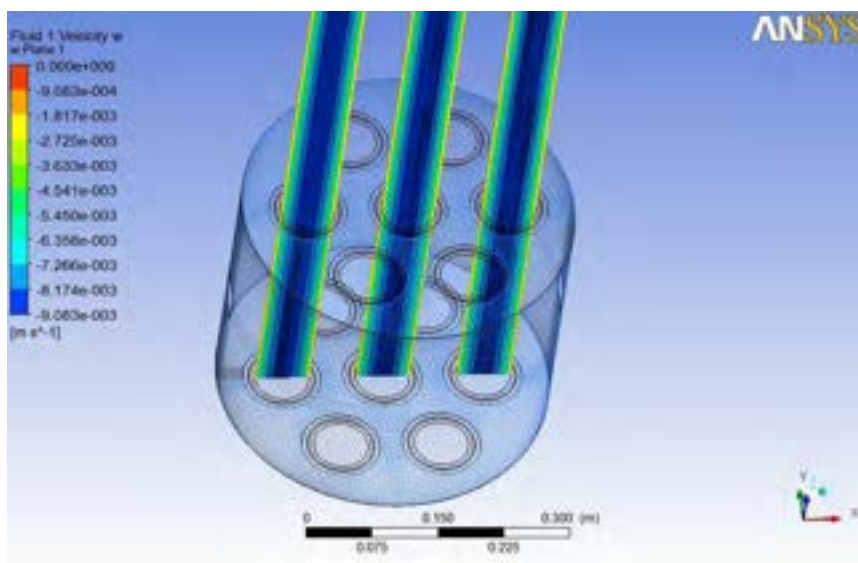


Figura 9 Contour di velocità principale nelle tubazioni LBE.

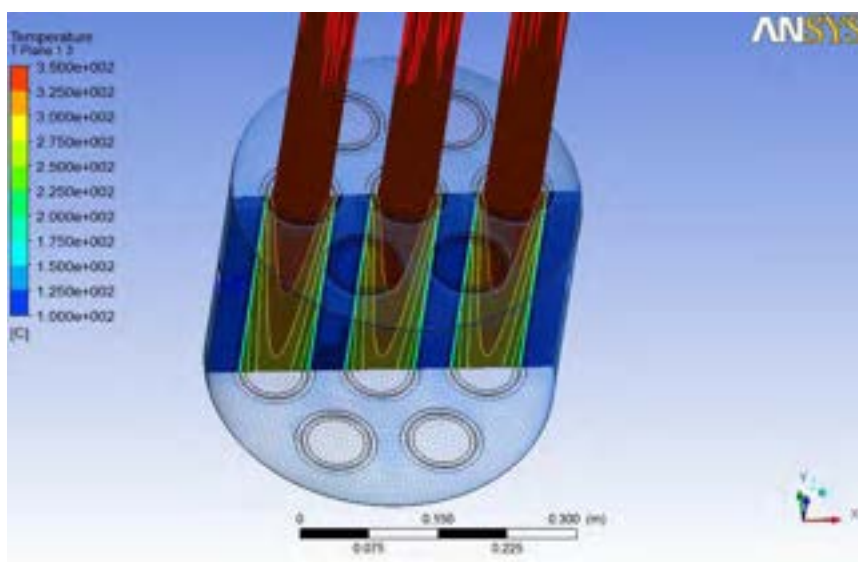


Figura 10 Contur di temperature sul piano XZ.

Figura 11 mostra la distribuzione di temperatura sul piano medio dello scambiatore. E' possibile notare che buona parte del salto termico avviene nel gap (~130 °C su 200 °C), e dunque lo stress sui tubi risulta effettivamente mitigato da questo tipo di design costruttivo.

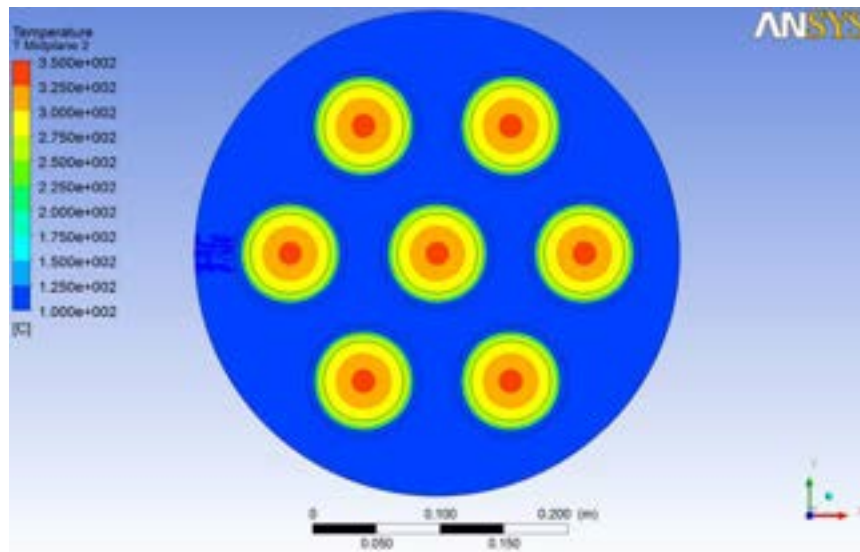


Figura 11 Distribuzione di temperatura sul piano medio.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 025	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 19	di 20
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

6. Conclusioni

E' stato illustrato il progetto concettuale del circuito secondario ad acqua in pressione dell'impianto a metallo liquido pesante NACIE per la nuova configurazione NACIE-UP. Alcuni dei componenti di tali circuito, in particolare lo scambiatore, l'aeroterma, la pompa, sono già stati acquistati e si trovano sul sito dell'impianto.

A scopo dimostrativo è stato introdotto un modello numerico dello scambiatore di calore per la sezione a bassa potenza che include i fluidi primario e secondario, i tubi e la polvere di acciaio utilizzata come guardia termica. I calcoli mostrano la fattibilità e robustezza del modello numerico e permettono di prevedere le prestazioni del componente.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 025	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 20	di 20
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

7. Bibliografia

- [1] D. Rozzia, G. FASANO, M. Tarantino, P. Agostini, A. Alemberti, F. Oriolo, Powder's Conductivity Measurements in the TxP Facility, Proc. NENE Conference, September 9-12, 2013, Slovenia.
- [2] I. Di Piazza, D. Martelli, Experimental Circulation Tests on a prototypical inductive flow meter with the NACIE loop, NA-T-R-029 ENEA C.R. Brasimone Report, 2013.