



Ricerca di Sistema elettrico

## Fornitura scambiatore di calore a tubi a baionetta

*D. Rozzia, A. Del Nevo, M. Tarantino, P. Gaggini, D. Vitale Di Maio,  
G. Caruso, L. Gramiccia*



## FORNITURA SCAMBIATORE DI CALORE A TUBI A BAIONETTA

D. Rozzia, A. Del Nevo, M. Tarantino, P. Gaggini (ENEA), D. Vitale Di Maio, G. Caruso, L. Gramiccia (UNIROMA1)

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

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

Responsabile scientifico ENEA: Mariano Tarantino

Responsabile scientifico CIRTEN: Giuseppe Forasassi

**Titolo**
**FORNITURA SCAMBIATORE DI CALORE A TUBI A BAIONETTA**
**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**

Il documento riguarda la specifica tecnica di fornitura della sezione di prova sperimentale HERO - Heavy liquid metal - pressurized water cooled tube da installare nella facility CIRCE. Lo scopo di HERO è quello di verificare la fabbricabilità dei tubi del generatore di vapore dell'impianto prototipico ALFRED (LFR), oltreché di caratterizzarne le performance di scambio termico, verificandone la temperatura di uscita del vapore surriscaldato. L'apparecchiatura descritta nella presente specifica tecnica consentirà inoltre di caratterizzare il funzionamento di sette tubi in scala 1:1 simultaneamente. La strumentazione è stata definita allo scopo 1) di poter misurare in modo dettagliato lo scambio termico tra tubo interno e tubo anulare, attraverso le polveri di SiC, tra acqua e LBE, 2) di rilevare e quantificare instabilità termoidrauliche nei tubi in specifiche condizioni operative, 3) di controllare in modo accurato le condizioni al contorno in modo da effettuare esperimenti rilevanti per la qualifica di codici di calcolo. La specifica tecnica riporta l'oggetto, la descrizione, e i requisiti della fornitura.


**Note**

Autori: D. Rozzia, A. Del Nevo, M. Tarantino, P. Gaggini (ENEA)  
 D. Vitale Di Maio, G. Caruso, L. Gramiccia (UNIROMA1)

**Copia n.**
**In carico a:**

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE	
2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	18/09/2013	NOME	A. Del Nevo	P. Console Camprini	M. Tarantino
			FIRMA	<i>A. Del Nevo</i>	<i>P. Console</i>	<i>M. Tarantino</i>
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE	

## INDICE

Lista delle Figure.....	3
Lista delle Tabelle .....	3
1 Considerazioni introduttive sull'apparecchiatura sperimentale HERO.....	4
2 Oggetto della Fornitura .....	4
3 Scopo.....	6
4 Breve introduzione su CIRCE ed il GENERATORE DI VAPORE del dimostratore ALFRED (LFR).....	6
4.1 CIRCE facility.....	6
4.2 Generatore di vapore del dimostratore ALFRED.....	7
5 Descrizione della fornitura .....	13
5.1 Sezione di prova HERO .....	13
5.2 Strumentazione della sezione di prova HERO .....	16
6 Requisiti della fornitura.....	24
6.1 Fabbricazione .....	24
6.2 Materiali .....	24
6.3 Strumentazione.....	24
6.4 Saldature.....	24
6.5 Prova in pressione .....	25
6.6 Pulizia.....	25
7 Estensione della fornitura.....	25
7.1 Controlli dimensionali e verifiche in officina .....	25
7.2 Imballo e trasporto.....	25
7.3 Accettazione e garanzia.....	26
8 Limiti della fornitura, esclusioni, interfacce.....	26
9 Durata della fornitura, penali, pagamenti .....	26
10 Allegati .....	27
Lista dei Riferimenti.....	28

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	ADPFISS – LP2 – 028	0	L	3	28

## LISTA DELLE FIGURE

Fig. 4.1 – CIRCE facility: vista isometrica .....	10
Fig. 4.2 – CIRCE facility: dettaglio di alcuni particolari dell'impianto .....	10
Fig. 4.3 – Progetto LEADER: schema del generatore di vapore di ALFRED.....	11
Fig. 4.4 – Progetto LEADER: layout dell'alloggiamento della pompa e del “heat dispersion removal system”. .....	11
Fig. 4.5 – Schema del tubo a baionetta e doppia parete del generatore di vapore di ALFRED.	12
Fig. 5.1 – Configurazione sezione di prova HERO: disposizione e geometria dei sette tubi nella sezione di prova e della scatola esagonale.....	14
Fig. 5.2 – Disegno di assieme della sezione di prova HERO.....	15
Fig. 5.3 – Sezione di prova: disposizione della strumentazione – termocoppie (1 di 4).....	20
Fig. 5.4 – Sezione di prova: disposizione della strumentazione – termocoppie (2 di 4).....	21
Fig. 5.5 – Sezione di prova: disposizione della strumentazione – termocoppie (3 di 4).....	22
Fig. 5.6 – Sezione di prova: disposizione della strumentazione – portate e perdite di carico (4 di 4).....	23

## LISTA DELLE TABELLE

Tab. 4.1 – Principali parametri di impianto .....	8
Tab. 4.2 – Dati del generatore di vapore di ALFRED. ....	9
Tab. 5.1 – ZIRCOFOAM 250: conduttività termica.....	14
Tab. 5.2 – Lista della strumentazione della sezione di prova HERO.....	19

## 1 Considerazioni introduttive sull'apparecchiatura sperimentale HERO

Nell'ambito dell'implementazione del laboratorio di termo-fluidodinamica dei metalli liquidi pesanti, ENEA-UTIS ha assunto l'impegno di completare le attività di ricerca e sviluppo per la caratterizzazione preliminare di generatori di vapore (GV) per applicazioni in sistemi nucleari refrigerati a piombo (LFR). L'attività prevede la progettazione di dettaglio e la conseguente realizzazione della sezione di prova sperimentale HERO – *Heavy liquid mEtal pRessurized water cOoled tube* –, concettualizzata nella precedente annualità<sup>[1]</sup>.

In considerazione degli studi effettuati relativi alle possibili *performace* di un'apparecchiatura sperimentale "ad hoc" per lo studio del singolo tubo in scala 1:1, supportate da simulazioni di sistema (REALP5/Mod3.3) e CFD (ANSYS CFX)<sup>[1][2][3]</sup>, e tenendo in conto i costi necessari per costruire ed esercire tale facility, si è valutato di rivedere il progetto di HERO. In particolare, si è ritenuto che la fabbricazione di una sezione di prova da installare nella *facility* sperimentale CIRCE (vedi sezione 4.1) avrebbe consentito vantaggi dal punto di vista delle della rilevanza scientifica e tecnologica attraverso 1) la capacità di studiare un maggior numero di aspetti caratterizzanti il funzionamento del GV prototipico; 2) un più accurato controllo dei parametri di impianto; e 3) una minore distorsione dei dati sperimentali rispetto a quelli che si avrebbero nel generatore di vapore prototipico.

CIRCE dispone di una potenza più elevata di quanto si potesse installare in una nuova apparecchiatura sperimentale, consentendo di poter testare più di un tubo e ridurre pertanto gli effetti di bordo sul tubo centrale. Inoltre è possibile testare i tubi nelle stesse condizioni termoidrauliche del GV prototipico (i.e. velocità e temperatura dell'LBE lato mantello). La presenza di più tubi potrà consentire di effettuare studi di instabilità termoidrauliche tipiche del funzionamento di GV surriscaldato a tubi paralleli attraverso l'installazione di orifizi intercambiabili e specifica strumentazione (vedi sezione 5.2). La presenza di un vero e proprio *bundle* di tubi consentirà inoltre di acquisire dati sperimentali per la valutazione dello scambio termico convettivo lato mantello, potendo disporre di sotto-canali nella configurazione geometrica dell'impianto prototipico.

La strumentazione è stata definita allo scopo 1) di poter misurare in modo dettagliato lo scambio termico tra tubo interno e tubo anulare, attraverso le polveri di SiC, tra acqua e LBE; 2) di rilevare e quantificare instabilità termoidrauliche nei tubi in specifiche condizioni operative, 3) di controllare in modo accurato le condizioni al contorno in modo da effettuare esperimenti rilevanti per la qualifica di codici di calcolo.

## 2 Oggetto della Fornitura

La fornitura consiste nella realizzazione di una sezione sperimentale di prova da installare nell'apparecchiatura sperimentale CIRCE, costituita da 7 tubi a baionetta e rappresentativa della

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	ADPFISS – LP2 – 028	0	L	5	28

configurazione di un generatore di vapore dell'impianto nucleare prototipico di IV generazione refrigerato a piombo (ALFRED).

Il materiale utilizzato dovrà essere AISI 304 o 316.

La fornitura della sezione di prova (vedi descrizione in sezione 0) consiste di:

- progettazione di dettaglio,
- approvvigionamento di tutti i materiali, con l'esclusione di quanto esplicitamente specificato sotto
  - Item 1, Fig. 5.2 → forgiato (non lavorato) per ottenere la flangia di collegamento di spessore 30mm
  - Item 4, Fig. 5.2 → Tubi *second* ( $\phi_e=25.40$  mm,  $s= 1.65$ mm)
  - Item 6, Fig. 5.2 → Tubi *inner* ( $\phi_e=19.05$  mm,  $s= 1.65$ mm)
  - Item 7, Fig. 5.2 → Tubi *slave* ( $\phi_e=9.53$  mm,  $s= 1.22$ mm)
  - Item 17, Fig. 5.2 → Tubo da 2" per sonde O<sub>2</sub>
  - Item 18, Fig. 5.2 → Flange da 2" ANSI 300
  - Item 19, Fig. 5.2 → Griglie spaziatrici
  - Item 21, Fig. 5.2 → Tubi *third* ( $\phi_e=33.40$  mm)
  - scatola esagonale esterna;
  - polvere SiC per il riempimento della intercapedine;
- le tenute Swagelok da installare sul fondo dei 3 tubi (dove saranno installati i trasduttori di pressione differenziali) per effettuare le prove in pressione;
- la realizzazione dei disegni costruttivi;
- le verifiche termo-meccaniche delle tubazioni e delle flange (oggetto della fornitura) e la relativa certificazione;
- la fabbricazione dei componenti, le lavorazioni meccaniche e il relativo assemblaggio;
- l'installazione della strumentazione che fornirà ENEA (49 termocoppie, come riportato in sezione 5.2);
- i controlli e i test in corso d'opera e di fine realizzazione;
- il dossier di fine fabbricazione comprensivo di certificazioni;
- l'imballo e la spedizione presso il sito ENEA del Brasimone;
- collaudi finali di accettazione in sito.

La fornitura dovrà essere progettata e costruita in accordo con PED per le seguenti condizioni operative:

- fluidi di processo: acqua, argon ed LBE;
- sistema acqua/vapore
  - pressione max acqua: 170bar;
  - temperatura ingresso acqua: 335°C

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	ADPFISS – LP2 – 028	0	L	6	28

- temperatura uscita vapore: 430°C
- sistema LBE
  - pressione nominale 1bar (max 16 bar)
  - temperatura min 150 °C – max: 500°C

### 3 Scopo

La Specifica Tecnica ha lo scopo di descrivere l'oggetto della fornitura, di stabilire i criteri generali per la fabbricazione, la documentazione conforme alla direttiva 97/23/CE (PED), i controlli, le prove non distruttive, l'imballaggio e quanto necessario alla realizzazione, trasporto e installazione del componente sull'impianto CIRCE, presso l'edificio PEC del C.R. Brasimone.

## 4 Breve introduzione su CIRCE ed il GENERATORE DI VAPORE del dimostratore ALFRED (LFR)

### 4.1 CIRCE facility

L'impianto CIRCE (Circolazione Etuttica) <sup>[4] [5]</sup> è un apparecchiatura sperimentale dedicata alla ricerca sui sistemi nucleari innovativi refrigerati a metallo liquido pesante. E' possibile realizzare prove integrali, inerenti la termoidraulica e la chimica del refrigerante, la qualifica di componenti, la caratterizzazione di sistemi innovativi, in supporto ai sistemi nucleari quali *Accelerator Driven System* (ADS) e *Lead-cooled Fast Reactor* (LFR).

CIRCE consiste principalmente di un vessel di prova (S100), in cui viene alloggiata la sezione di prova, e di due serbatoi ausiliari S200 e S300, rispettivamente adibiti allo stoccaggio del metallo liquido durante le fasi di manutenzione e al trasferimento della lega dal vessel di prova al serbatoio di stoccaggio e viceversa.

Attualmente, l'impianto CIRCE è la più grande apparecchiatura sperimentale esistente al mondo operante nel settore della tecnologia dei metalli liquidi pesanti. Il contenuto complessivo di lega eutettica può raggiungere le 90 ton.

Il vessel di prova, realizzato in AISI 316L, ha in configurazione di prova una altezza di circa 10 m, un diametro di 1.2 m ed è progettato per una pressione massima di 16 bar.

Nell'attuale configurazione, denominata ICE – *Integral Circulation Experiment* –, è installata una sorgente termica della potenza di 1 MW ed uno scambiatore di calore prototipico proposto come sistema di rimozione del calore di decadimento di un sistema LFR. Gli esperimenti condotti hanno permesso di dimostrare la fattibilità tecnologica del sistema primario di reattore LFR/ADS in scala, analizzandone il comportamento termo-fluidodinamico, e qualificando prototipi di sistemi ausiliari,

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	ADPFISS – LP2 – 028	0	L	7	28

quali il sistema di condizionamento del tenore di ossigeno disciolto nella lega e i sistemi di sicurezza DHR.

Attualmente è utilizzato per studi di termoidraulica monofase relativi alla caratterizzazione dei transitori incidentali (circolazione naturale) e alla caratterizzazione dei fenomeni di stratificazione termica in sistemi a piscina.

I principali parametri di impianto sono riportati in Tab. 4.1.

#### **4.2 Generatore di vapore del dimostratore ALFRED**

Il progetto preliminare del reattore veloce refrigerato a piombo, ALFRED (*Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator*), è il principale obiettivo del progetto FP7 EC LEADER<sup>[6]</sup>. Questo impianto presenta una nuova configurazione di generatore di vapore a doppia parete di tipo “a baionetta”. Nell’ambito del PAR-2012, ENEA si è posta come obiettivo di costruire un *mock-up* del generatore di vapore al fine di verificarne la fattibilità oltreché, caratterizzarne le performance dal punto di vista termoidraulico. A tal fine è stato formalizzato un progetto concettuale di sezione di prova da installare nella *facility* CIRCE composta da 7 tubi in scala 1:1. La strumentazione prevista (vedi sezione 5.2) consentirà un’accurata misura dei principali parametri del processo, per comprendere e quantificare in funzionamento del tubo e i fenomeni/processi (i.e. perdite di carico, scambio termico conduttivo e convettivo, regimi di flusso, instabilità termoidrauliche) di interesse, in differenti condizioni operative.

Il progetto del reattore ALFRED [6] prevede 8 generatori di vapore. Sulla base delle valutazioni di progetto sono previsti 510 tubi a baionetta per generatore. I principali dati geometrici e di funzionamento del generatore di vapore (Fig. 4.3 e Fig. 4.2) basati sul progetto preliminare sono riportati in Tab. 4.2.

La singola unità ha la capacità di rimuovere 37.5 MW (73.5kW per singolo tubo a baionetta). Ciascun generatore di vapore è accoppiato ad una pompa assiale collocata nella parte calda del circuito primario (Fig. 4.4). La presa della pompa è direttamente sopra il core, dove il piombo fluisce dal basso verso l’alto. Il piombo è poi pompato attraverso apposite fessure nel generatore di vapore in direzione discendente. La lunghezza dove avviene lo scambio termico tra primario e secondario è alta 6 m (lunghezza attiva dei tubi) e lo scambio termico avviene in controcorrente. La parte sovrastante il metallo liquido, all’interno del contenitore primario, è circa un metro ed è inertizzata con gas Argon.

Il singolo tubo (Fig. 4.5) a baionetta sarà costruito in acciaio martensitico T91 e consiste di tre tubi concentrici. Il refrigerante secondario (acqua) entra nel tubo interno dall’alto, raggiunto il fondo, risale verso l’alto nella regione anulare tra il primo e il secondo tubo (in figura identificato come *annular*

*riser*). La transizione monofase – bifase avviene nella parte anulare ascendente [8]. Il dati nominali di progetto prevedono la produzione di vapore secco surriscaldato a 450°C e 18MPa in uscita dal generatore di vapore. La temperatura di uscita del fluido secondario ha particolare rilevanza perché influenza direttamente il funzionamento della turbina e pertanto le prestazioni (rendimento) dell’impianto. Lo scambio termico tra fluido primario e secondario avviene attraverso una doppia parete (doppio tubo concentrico) che, pur riducendo lo scambio termico, ha lo scopo di abbassare la probabilità che l’acqua secondaria possa entrare nel sistema primario. Il gap tra i due tubi è riempito con polveri (i.e. polveri di diamante o SiC) per minimizzarne la resistenza termica <sup>[2] [3] [9] [10]</sup> e pressurizzato ad elio, in modo da poter rilevare un eventuale perdita, e prevenire l’evento iniziatore del transitorio indentale SGTR (*steam generator tube rupture*).

Questa configurazione, pur presentando benefici dal punto di vista della sicurezza, richiede la quantificazione del deterioramento dello scambio termico a causa: 1) della presenza della doppia parete tra fluidi primario e secondario, ed 2) dello scambio termico attraverso la parete del primo tubo tra fluido secondario liquido discendente e bifase/vapore surriscaldato ascendente.

PARAMETERS	VALUE
Outside Diameter	1200 mm
Wall Thickness	15 mm
Material	AISI 316L
Max LBE Inventory	90000 kg
Electrical Heating	47 kW
Cooling Air Flow Rate	3 Nm <sup>3</sup> /s
Temperature Range	200 to 550 °C
Operating Pressure	15 kPa (gauge)
Design Pressure	450 kPa (gauge)
Argon Flow Rate	15 NI/s
Argon Injection Pressure	600 kPa (gauge)

**Tab. 4.1 – Principali parametri di impianto**

STEAM GENERATOR GENERAL PROPERTIES			
Description	Quantity	Description	Quantity
<i>Removed Power [MW]</i>	<b>37.5</b>	<i>Number of tubes</i>	<b>510</b>
<i>Feed-water flow rate [kg/s]</i>	<b>24.1</b>	<i>Water pressure [bar]</i>	<b>180</b>
<i>Bundle geometry</i>	<b>triangular</b>	<i>Pitch / tube diameter</i>	<b>1.42</b>
<i>Feed-water temperature [°C]</i>	<b>335</b>	<i>Steam outlet temperature [°C]</i>	<b>450</b>
<i>Lead inlet temperature [°C]</i>	<b>480</b>	<i>Lead outlet temperature [°C]</i>	<b>400</b>
BAYONET TUBE GEOMETRY			
Description	Quantity	Description	Quantity
<i>Slave tube outer diameter [mm]</i>	<b>9.52</b>	<i>Slave tube thickness [mm]</i>	<b>1.07</b>
<i>Inner tube outer diameter [mm]</i>	<b>19.05</b>	<i>Inner tube thickness [mm]</i>	<b>1.88</b>
<i>Second tube outer diameter [mm]</i>	<b>25.40</b>	<i>Second tube thickness [mm]</i>	<b>1.88</b>
<i>Third tube outer diameter [mm]</i>	<b>31.37</b>	<i>Third tube thickness [mm]</i>	<b>2.11</b>
<i>Powder annular gap width [mm]</i>	<b>1.07</b>	<i>Length of heat exchange [mm]</i>	<b>6000</b>
<i>Argon plenum height [mm]</i>	<b>1000</b>	<i>He plenum height [mm]</i>	<b>800</b>
<i>Steam plenum height [mm]</i>	<b>800</b>	<i>T91 plates thickness [mm]</i>	<b>250</b>
<i>Feed-water flow rate [g/s]</i>	<b>47.3</b>	<i>Tube material</i>	<b>T91</b>

Tab. 4.2 – Dati del generatore di vapore di ALFRED.

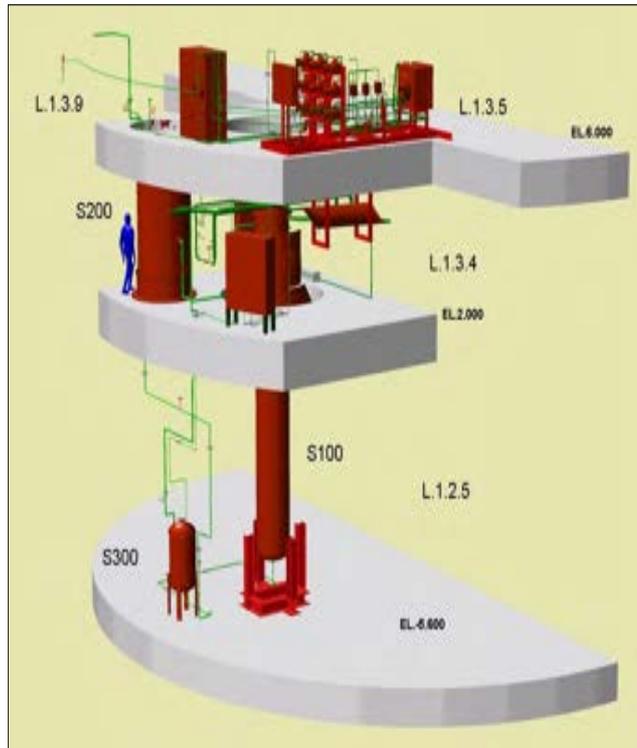


Fig. 4.1 – CIRCE facility: vista isometrica

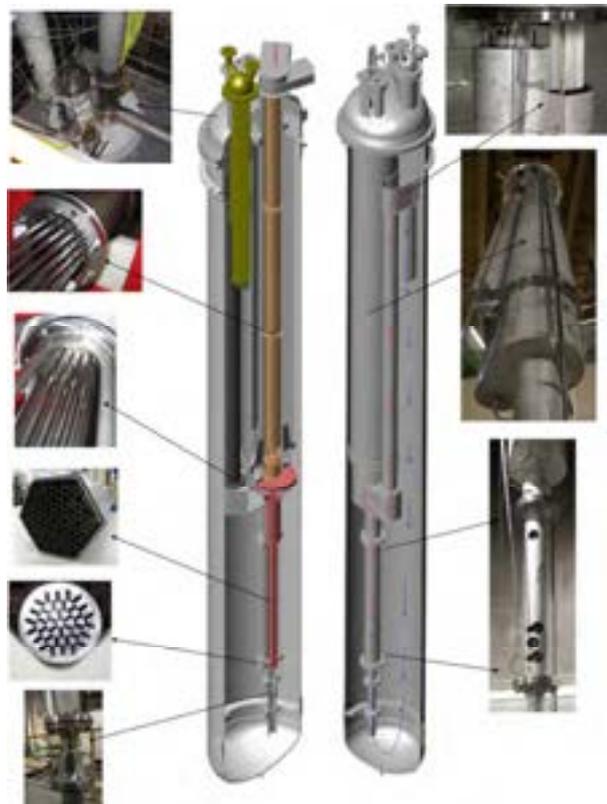


Fig. 4.2 – CIRCE facility: dettaglio di alcuni particolari dell'impianto

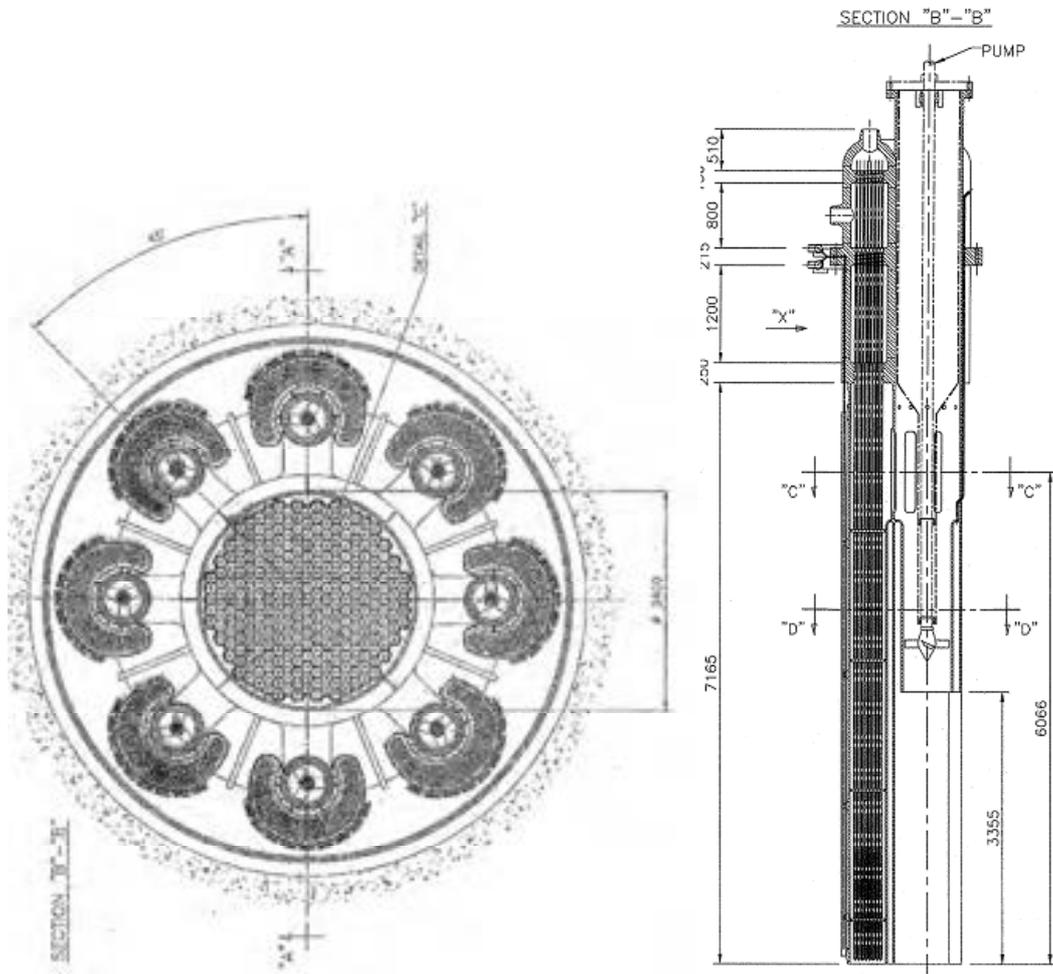


Fig. 4.3 – Progetto LEADER: schema del generatore di vapore di ALFRED.

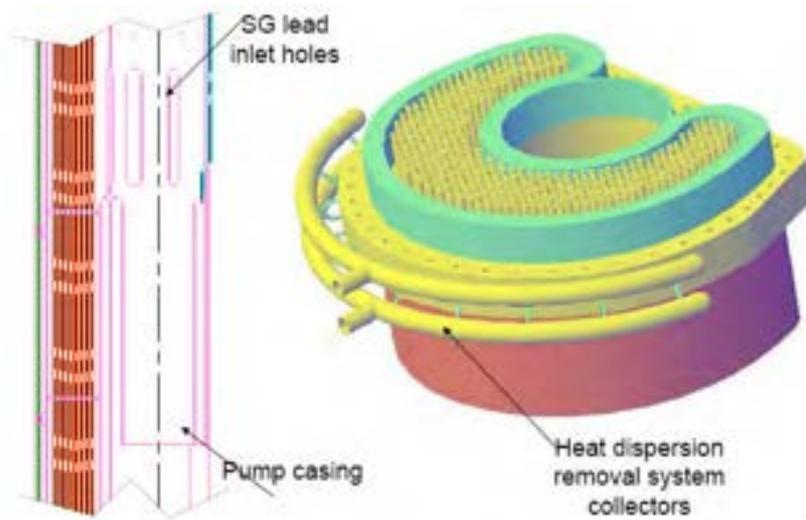


Fig. 4.4 – Progetto LEADER: layout dell'alloggiamento della pompa e del "heat dispersion removal system".

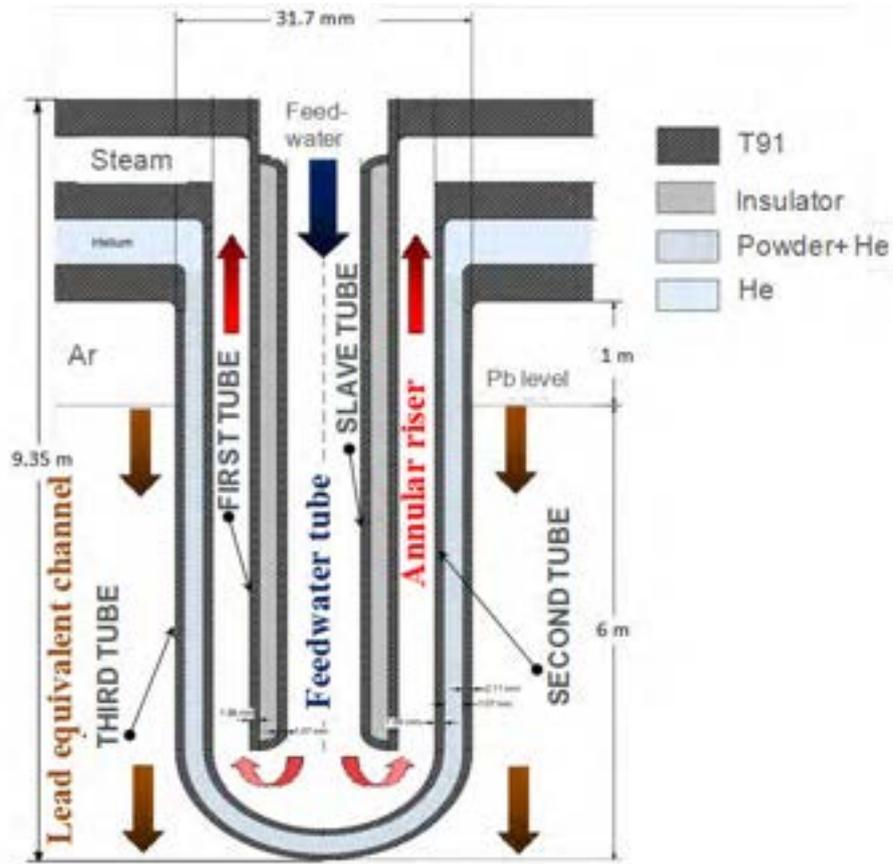


Fig. 4.5 – Schema del tubo a baionetta e doppia parete del generatore di vapore di ALFRED.

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	ADPFISS – LP2 – 028	0	L	13	28

## 5 Descrizione della fornitura

### 5.1 Sezione di prova HERO

Il disegno di assieme della sezione di prova HERO è riportato in Fig. 5.2. La figura riporta il solo tubo centrale dei sette installati. Informazioni sulla disposizione geometrica dei tubi è riportata in Fig. 5.1.

L'assemblato è costituito da una flangia della misura di 14" e spessore 30mm (item 1 in Fig. 5.2) di collegamento all'impianto sperimentale CIRCE.

Sopra la flangia è presente la camera ad elio leggermente pressurizzata necessaria per rilevare eventuali perdite dei tubi attraverso cui avviene lo scambio termico tra primario e secondario (i.e. *second* e *third*). Questa camera, saldata alla flangia di collegamento con S100, è costituita da un tubo 6" sch.40 saldato sopra ad un setto a tenuta che separa la camera ad elio da quella vapore.

Sopra la camera ad elio è prevista la camera vapore. Tale camera, punto di raccolta del vapore surriscaldato (170bar e 430°C) dovrà essere realizzata con un tubo 6" sch 120, alla cui sommità è saldato un secondo setto a tenuta sul quale sono fissati i terminali dei tubi a baionetta. Il vapore è poi convogliato attraverso un bocchello di uscita 2½" sch 80 (item 9, Fig. 5.2).

Entrambe le camere, ad elio e a vapore, avranno la necessità di riportare un apertura radiale attraverso la quale far uscire i segnali delle termocoppie installati nei tubi. Una possibile opzione è la connessione con tubazioni 1" sch40 (item 11, Fig. 5.2). Le tubazioni sono saldate dal lato camere elio e vapore e con un attacco filettato per termocoppie, con i relativi tappi da 1", dall'altro. Alternativa è quella di saldare alle due camere due tubature a "collo d'oca" per effettuare la tenuta attraverso il congelamento di LBE. La scelta, concordata tra Fornitore ed ENEA, sarà effettuata durante la preparazione del progetto definitivo.

I 7 tubi a baionetta sono connessi all'acqua di alimento attraverso terminali di attacco, passanti Swagelok ed un orifizio calibrato intercambiabile (item 13, 14 e 15, Fig. 5.2). Sono costituiti da 4 tubi concentrici. I tubi attraversano la camera vapore (i tubi *salve* e *inner*, item 6 e 7, Fig. 5.2), la camera elio (*salve*, *inner* e *second*, item 4, 6 e 7) ed entrano nella tanca principale di CIRCE (S100) attraverso la flangia di collegamento, dove il tubo *third* (item 21) è connesso attraverso un soffierto elastico, capace di una corsa di circa +/-10-12mm. Il gap tra i tubi *inner* e *slave* è riempito con un isolante termico (ZIRCOFOAM 250) al fine di ridurre lo scambio termico tra tubo interno e tubo anulare esterno. La conducibilità dichiarata in funzione della temperatura è riportata in Tab. 5.1. Viceversa, il gap tra il tubo *second* e *third* sarà riempito con SiC e sarà direttamente comunicante con la camera ad elio. Il condotto anulare dove è presente flusso di vapore ascendente è delimitato dai tubi *inner* e *second*. Il centraggio è effettuato attraverso appositi distanziali che avranno anche il compito di

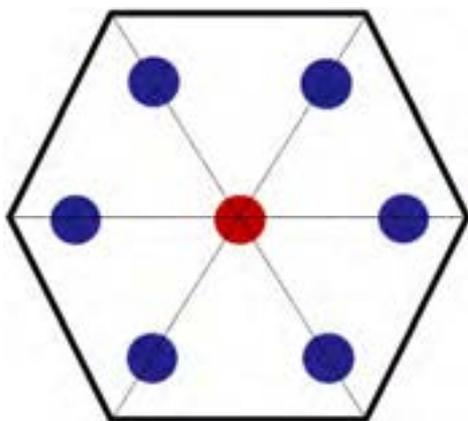
preservare l'integrità delle termocoppie durante la fase di montaggio. Sul fondo del tubo è presente una penetrazione di tipo 1/8 NPT dove può essere connesso un terminale del trasduttore di pressione differenziale o chiuso attraverso tappi Swagelok (inclusi nella fornitura).

I sette tubi sono contenuti in una scatola esagonale e mantenuti in posizione attraverso 5 griglie spaziatrici distanziate 1m l'una dall'altra. La sezione di prova è isolata termicamente dalla pool di CIRCE attraverso un tubo concentrico con l'esagono. Il gap è isolato dal fluido circostante e riempito di aria.

Infine, tre bocchelli 2" con relative flange di attacco (item 17 e 18, Fig. 5.2) sono saldate alla flangia di collegamento ed hanno la funzione di consentire l'installazione di sonde ad ossigeno.

Temperature [K]	Thermal conductivity [W/mK]
423.15	0.060
523.15	0.071
673.15	0.088
873.15	0.113

Tab. 5.1 – ZIRCOFOAM 250: conduttività termica.



Geometria tubo a baionetta		
D	m	0.0334
P	m	0.0475
P/D		1.422
Passo	--	Triangolare
Geometria scatola sezione di prova		
Lato scatola	m	0.0726
Area scatola	m <sup>2</sup>	0.0137
R circ. circoscritta	m	0.0726
Potenza scambiata	kW	504

Fig. 5.1 – Configurazione sezione di prova HERO: disposizione e geometria dei sette tubi nella sezione di prova e della scatola esagonale.

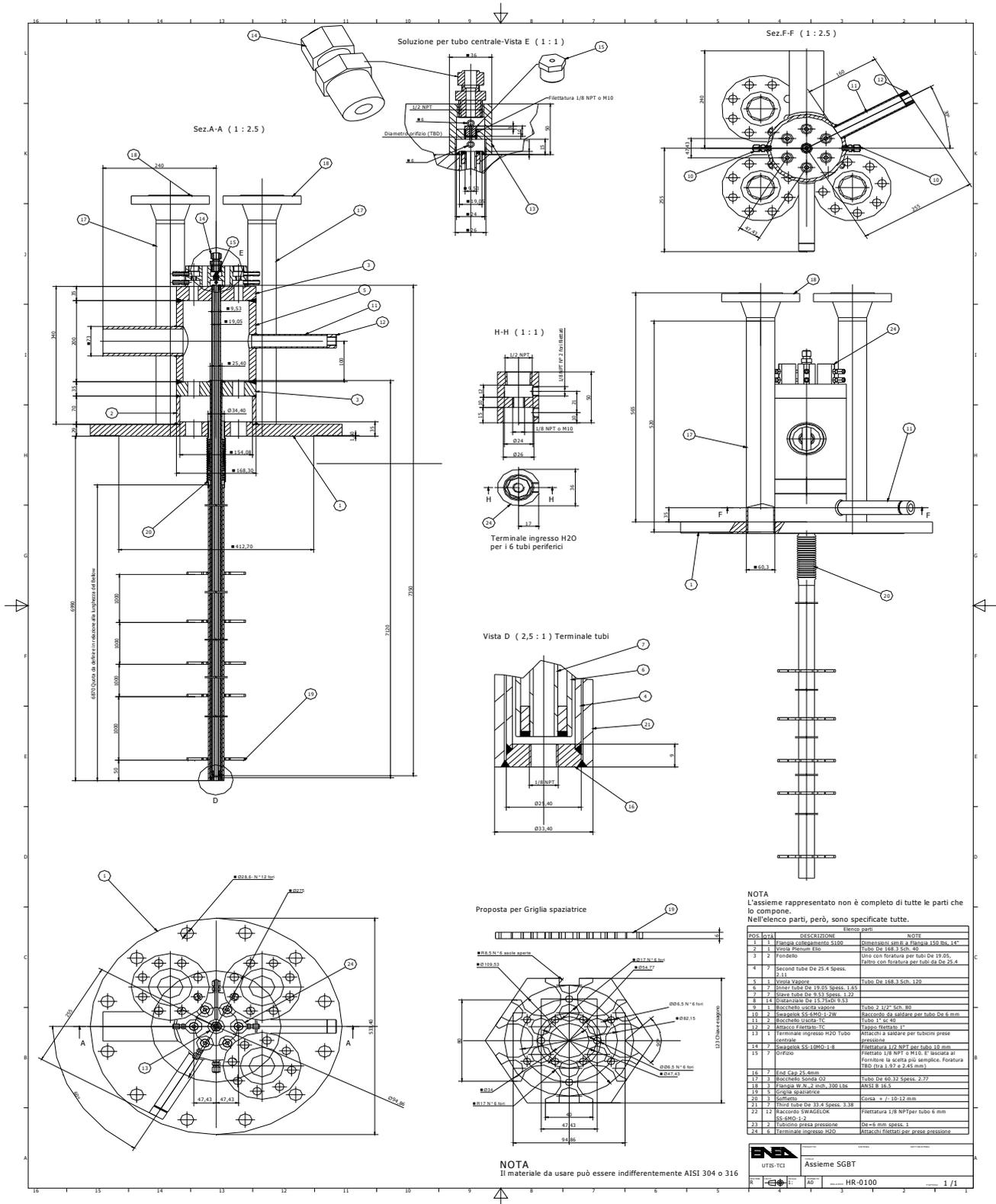


Fig. 5.2 – Disegno di assieme della sezione di prova HERO.

## 5.2 Strumentazione della sezione di prova HERO

La strumentazione della sezione di prova sarà composta da:

- 75 termocoppie (escluse dalla fornitura), di cui 49 saranno montate dal Fornitore sui tubi della sezione di prova secondo lo schema riportato in Fig. 5.3, Fig. 5.4 e Fig. 5.5. Le rimanenti termocoppie saranno installate dal personale ENEA presso il CR Brasimone.
- 13 trasduttori di pressione differenziale (Fig. 5.6).
- 2 trasduttori di pressione assoluta installati in ingresso e uscita dalla sezione di prova.
- 8 misuratori di portata di cui 1 installato a monte della sezione di prova per misurare la portata complessiva di alimento e 7 all'ingresso di ogni tubo.

L'elenco completo della strumentazione è riportato in Tab. 5.2.

#	ID	Instrument location			Measurement		Type
		Zone	Elev (1). / Position	Medium	Measurand	Dim	
1	TC-C0-I00	Tube 0 – Inner tube	Inlet	Water	Temperature	°C	D=0.5mm
2	TC-C0-I01	Tube 0 – Inner tube	Outlet	Water	Temperature	°C	D=0.5mm
3	TC-C0-O15	Tube 0 – Second tube	1500mm	Water	Temperature	°C	D=0.5mm
4	TC-C0-O18	Tube 0 – Second tube	1800mm	Water	Temperature	°C	D=0.5mm
5	TC-C0-O21	Tube 0 – Second tube	2100mm	Water	Temperature	°C	D=0.5mm
6	TC-C0-O24	Tube 0 – Second tube	2400mm	Water	Temperature	°C	D=0.5mm
7	TC-C0-O27	Tube 0 – Second tube	2700mm	Water	Temperature	°C	D=0.5mm
8	TC-C0-O30	Tube 0 – Second tube	3000mm	Water	Temperature	°C	D=0.5mm
9	TC-C0-O33	Tube 0 – Second tube	3300mm	Water	Temperature	°C	D=0.5mm
10	TC-C0-O36	Tube 0 – Second tube	3600mm	Water	Temperature	°C	D=0.5mm
11	TC-C0-O39	Tube 0 – Second tube	3900mm	Water	Temperature	°C	D=0.5mm
12	TC-C0-O42	Tube 0 – Second tube	4200mm	Water	Temperature	°C	D=0.5mm
13	TC-C0-O60	Tube 0 – Second tube	6000mm	Water	Temperature	°C	D=0.5mm
14	TC-C0-O70	Tube 0 – Second tube	7016mm	Water	Temperature	°C	D=0.5mm
15	TC-W0-W68	Tube 0 – Inner tube	6800mm	Wall – Water	Temperature	°C	D=0.5mm

#	ID	Instrument location			Measurement		Type
		Zone	Elev (1). / Position	Medium	Measurand	Dim	
16	TC-W0-P15	Tube 0 – Second tube	1500mm / 0°	Wall – SiC	Temperature	°C	D=0.5mm
17	TC-W0-P30	Tube 0 – Second tube	3000mm / 0°	Wall – SiC	Temperature	°C	D=0.5mm
18	TC-W0-P40	Tube 0 – Second tube	4200mm / 0°	Wall – SiC	Temperature	°C	D=0.5mm
19	TC-W0-P60	Tube 0 – Second tube	6000mm / 0°	Wall – SiC	Temperature	°C	D=0.5mm
20	TC-W0-L10	Tube 0 – Third tube	1500mm / 0°	Wall – LBE	Temperature	°C	D=1mm
21	TC-W0-L11	Tube 0 – Third tube	1500mm / 120°	Wall – LBE	Temperature	°C	D=1mm
22	TC-W0-L12	Tube 0 – Third tube	1500mm / 240°	Wall – LBE	Temperature	°C	D=1mm
23	TC-W0-L30	Tube 0 – Third tube	3000mm / 0°	Wall – LBE	Temperature	°C	D=1mm
24	TC-W0-L31	Tube 0 – Third tube	3000mm / 120°	Wall – LBE	Temperature	°C	D=1mm
25	TC-W0-L32	Tube 0 – Third tube	3000mm / 240°	Wall – LBE	Temperature	°C	D=1mm
26	TC-W0-L40	Tube 0 – Third tube	4200mm / 0°	Wall – LBE	Temperature	°C	D=1mm
27	TC-W0-L41	Tube 0 – Third tube	4200mm / 120°	Wall – LBE	Temperature	°C	D=1mm
28	TC-W0-L42	Tube 0 – Third tube	4200mm / 240°	Wall – LBE	Temperature	°C	D=1mm
29	TC-W0-L60	Tube 0 – Third tube	6000mm / 0°	Wall – LBE	Temperature	°C	D=1mm
30	TC-W0-L61	Tube 0 – Third tube	6000mm / 120°	Wall – LBE	Temperature	°C	D=1mm
31	TC-W0-L62	Tube 0 – Third tube	6000mm / 240°	Wall – LBE	Temperature	°C	D=1mm
32	TC-C1-I00	Tube 1 – Inner tube	Inlet	Water	Temperature	°C	D=0.5mm
33	TC-C1-O70	Tube 1 – Second tube	7016mm	Water	Temperature	°C	D=0.5mm
34	TC-C2-I00	Tube 2 – Inner tube	Inlet	Water	Temperature	°C	D=0.5mm
35	TC-C2-O70	Tube 2 – Second tube	7016mm	Water	Temperature	°C	D=0.5mm
36	TC-C3-I00	Tube 3 – Inner tube	Inlet	Water	Temperature	°C	D=0.5mm
37	TC-C3-O70	Tube 3 – Second tube	7016mm	Water	Temperature	°C	D=0.5mm
38	TC-C4-I00	Tube 4 – Inner tube	Inlet	Water	Temperature	°C	D=0.5mm
39	TC-C4-O70	Tube 4 – Second tube	7016mm	Water	Temperature	°C	D=0.5mm
40	TC-C5-I00	Tube 5 – Inner tube	Inlet	Water	Temperature	°C	D=0.5mm
41	TC-C5-O70	Tube 5 – Second tube	7016mm	Water	Temperature	°C	D=0.5mm
42	TC-C6-I00	Tube 6 – Inner tube	Inlet	Water	Temperature	°C	D=0.5mm
43	TC-C6-O70	Tube 6 – Second tube	7016mm	Water	Temperature	°C	D=0.5mm
44	TC-W1-L11	Tube 1 – Third tube	1500mm / 120°	Wall – LBE	Temperature	°C	D=1mm

#	ID	Instrument location			Measurement		Type
		Zone	Elev (1). / Position	Medium	Measurand	Dim	
45	TC-W2-L12	Tube 2 – Third tube	1500mm / 240°	Wall – LBE	Temperature	°C	D=1 mm
46	TC-W1-L31	Tube 1 – Third tube	3000mm / 120°	Wall – LBE	Temperature	°C	D=1 mm
47	TC-W2-L32	Tube 2 – Third tube	3000mm / 240°	Wall – LBE	Temperature	°C	D=1 mm
48	TC-W1-L41	Tube 1 – Third tube	4200mm / 120°	Wall – LBE	Temperature	°C	D=1 mm
49	TC-W2-L42	Tube 2 – Third tube	4200mm / 240°	Wall – LBE	Temperature	°C	D=1 mm
50	TC-01-L15	Subchannel 1 center	1500mm	LBE	Temperature	°C	D=1 mm
61	TC-07-L15	Subchannel 7 center	1500mm	LBE	Temperature	°C	D=1 mm
62	TC-09-L15	Subchannel 9 center	1500mm	LBE	Temperature	°C	D=1 mm
63	TC-11-L15	Subchannel 11 center	1500mm	LBE	Temperature	°C	D=1 mm
64	TC-01-L30	Subchannel 1 center	3000mm	LBE	Temperature	°C	D=1 mm
65	TC-07-L30	Subchannel 7 center	3000mm	LBE	Temperature	°C	D=1 mm
66	TC-09-L30	Subchannel 9 center	3000mm	LBE	Temperature	°C	D=1 mm
67	TC-11-L30	Subchannel 11 center	3000mm	LBE	Temperature	°C	D=1 mm
68	TC-01-L42	Subchannel 1 center	4200mm	LBE	Temperature	°C	D=1 mm
69	TC-07-L42	Subchannel 7 center	4200mm	LBE	Temperature	°C	D=1 mm
70	TC-09-L42	Subchannel 9 center	4200mm	LBE	Temperature	°C	D=1 mm
71	TC-11-L42	Subchannel 11 center	4200mm	LBE	Temperature	°C	D=1 mm
72	TC-SL-W01	Steamchamber outlet	--	Water	Temperature	°C	D=1 mm
73	TC-SL-W02	Steamchamber outlet	--	Water	Temperature	°C	D=1 mm
74	TC-SL-W03	Steamchamber outlet	--	Water	Temperature	°C	D=1 mm
75	TC-SL-W04	Steamchamber outlet	--	Water	Temperature	°C	D=1 mm
76	DP-C0-W00	Tube 0	Overall	Water	Press. diff.	kPa	
77	DP-C0-W01	Tube 0	Descending	Water	Press. diff.	kPa	
78	DP-C0-W02	Tube 0	Ascending	Water	Press. diff.	kPa	
79	DP-C1-W00	Tube 1	Overall	Water	Press. diff.	kPa	
80	DP-C1-W01	Tube 1	Descending	Water	Press. diff.	kPa	
81	DP-C1-W02	Tube 1	Ascending	Water	Press. diff.	kPa	
82	DP-C2-W00	Tube 2	Overall	Water	Press. diff.	kPa	

#	ID	Instrument location			Measurement		Type
		Zone	Elev (1). / Posistion	Medium	Measurand	Dim	
83	DP-C2-W01	Tube 2	Descending	Water	Press. diff.	kPa	
84	DP-C2-W02	Tube 2	Ascending	Water	Press. diff.	kPa	
85	DP-C3-W00	Tube 3	Overall	Water	Press. diff.	kPa	
86	DP-C4-W00	Tube 4	Overall	Water	Press. diff.	kPa	
87	DP-C5-W00	Tube 5	Overall	Water	Press. diff.	kPa	
88	DP-C6-W00	Tube 6	Overall	Water	Press. diff.	kPa	
89	PC-00-I00	FW collector	--	Water	Pressure	MPa	
90	PC-00-O00	Steam collector	--	Water	Pressure	MPa	
91	MF-00-I00	Tube 0 – inlet	--	Water	Mass flow	g/s	
92	MF-01-I00	Tube 1 – inlet	--	Water	Mass flow	g/s	
93	MF-02-I00	Tube 2 – inlet	--	Water	Mass flow	g/s	
94	MF-03-I00	Tube 3 – inlet	--	Water	Mass flow	g/s	
95	MF-04-I00	Tube 4 – inlet	--	Water	Mass flow	g/s	
96	MF-05-I00	Tube 5 – inlet	--	Water	Mass flow	g/s	
97	MF-06-I00	Tube 6 – inlet	--	Water	Mass flow	g/s	
98	MF-FW-I00	FW collector	--	Water	Mass flow	g/s	

(1) 0.00m located at tube bottom

**Tab. 5.2 – Lista della strumentazione della sezione di prova HERO.**

Central byonet tube

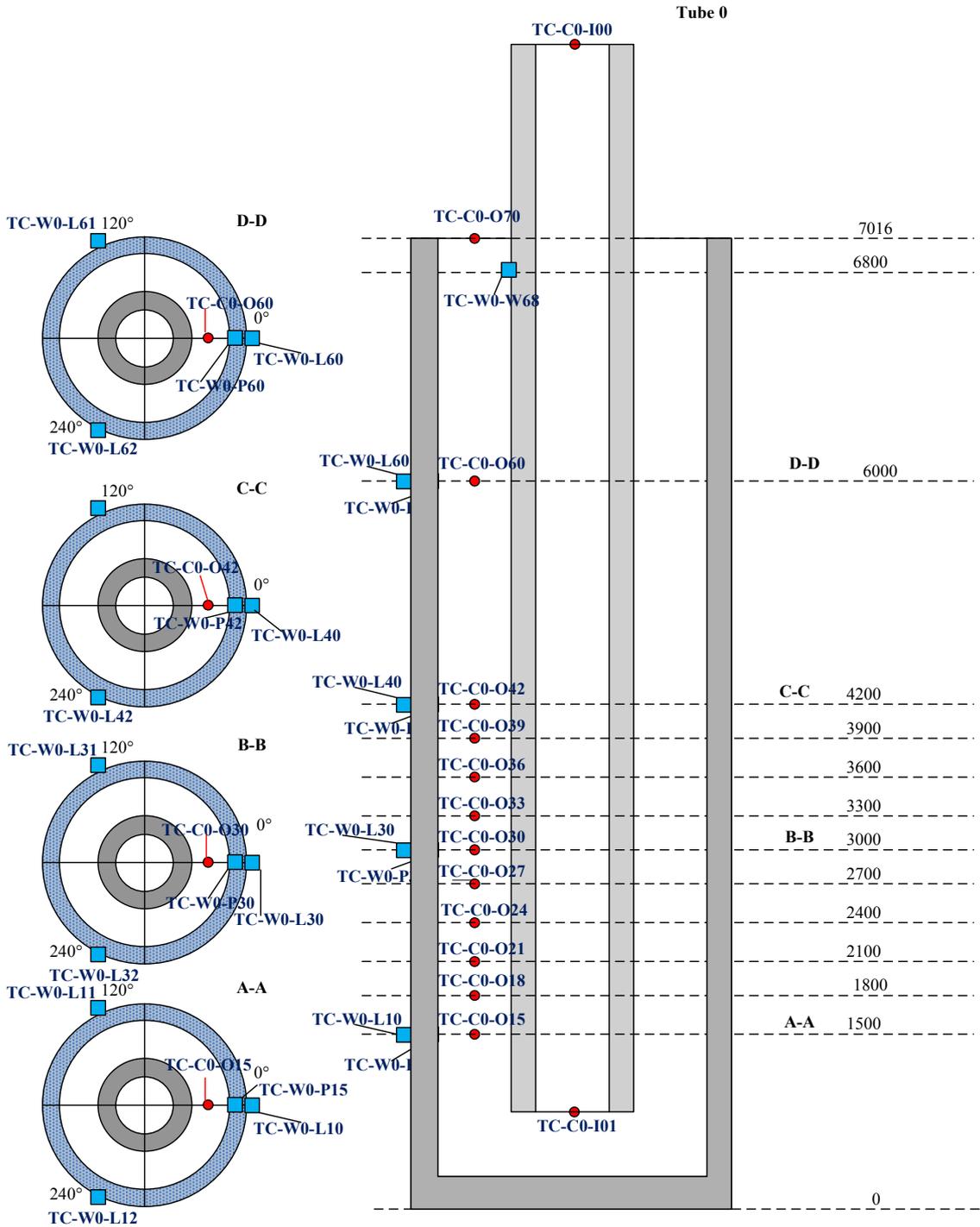


Fig. 5.3 – Sezione di prova: disposizione della strumentazione – termocoppie (1 di 4).

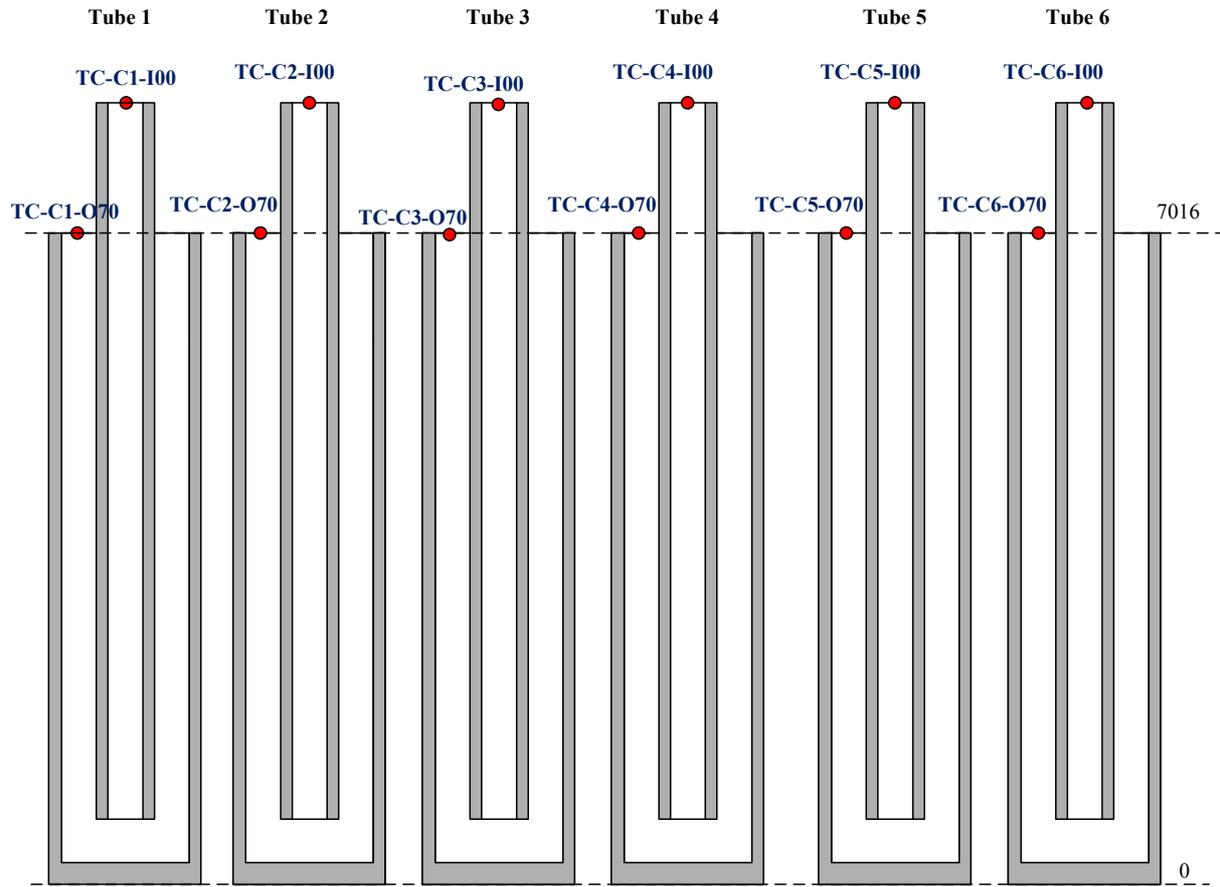


Fig. 5.4 – Sezione di prova: disposizione della strumentazione – termocoppie (2 di 4).

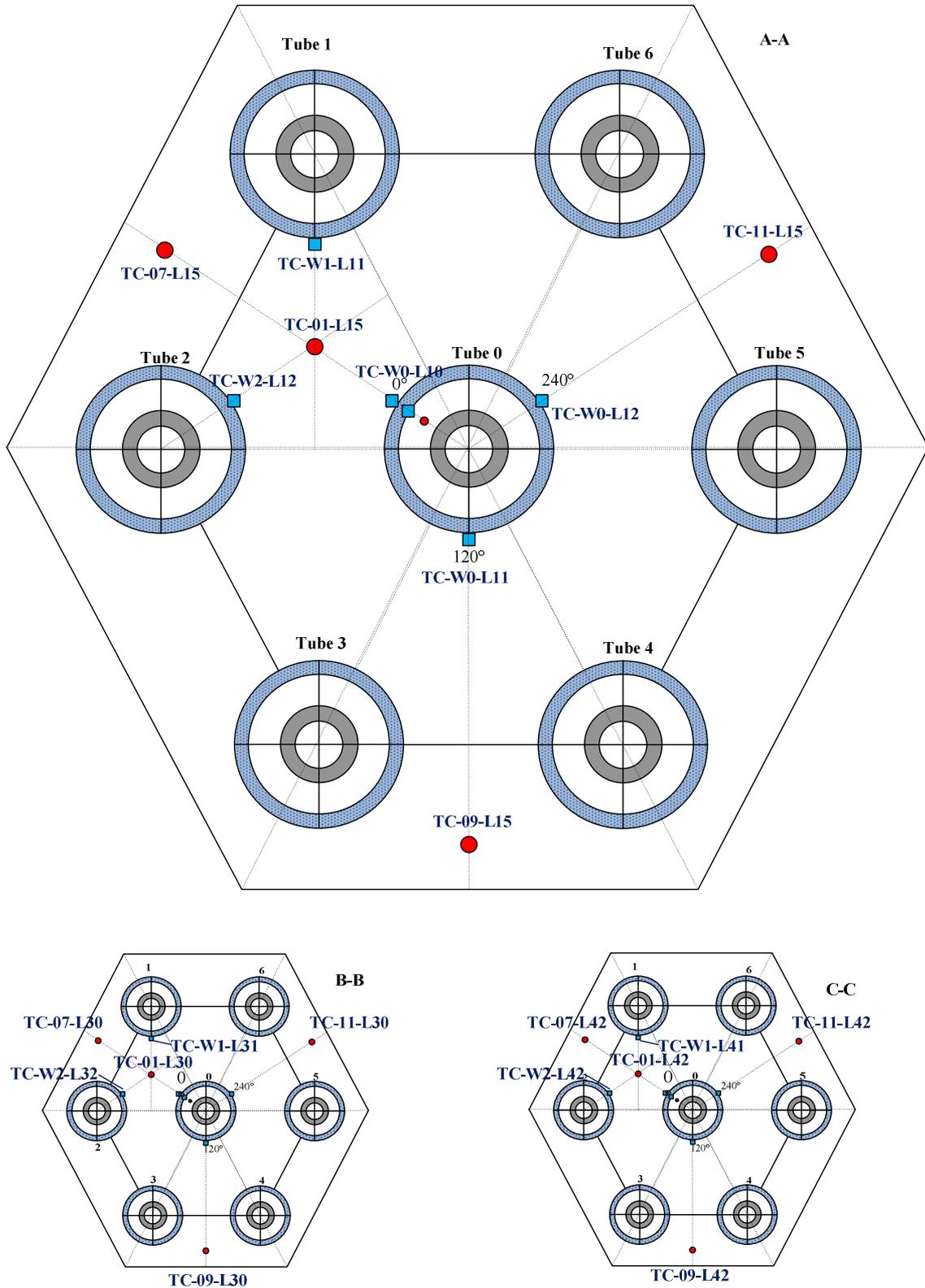


Fig. 5.5 – Sezione di prova: disposizione della strumentazione – termocoppie (3 di 4).

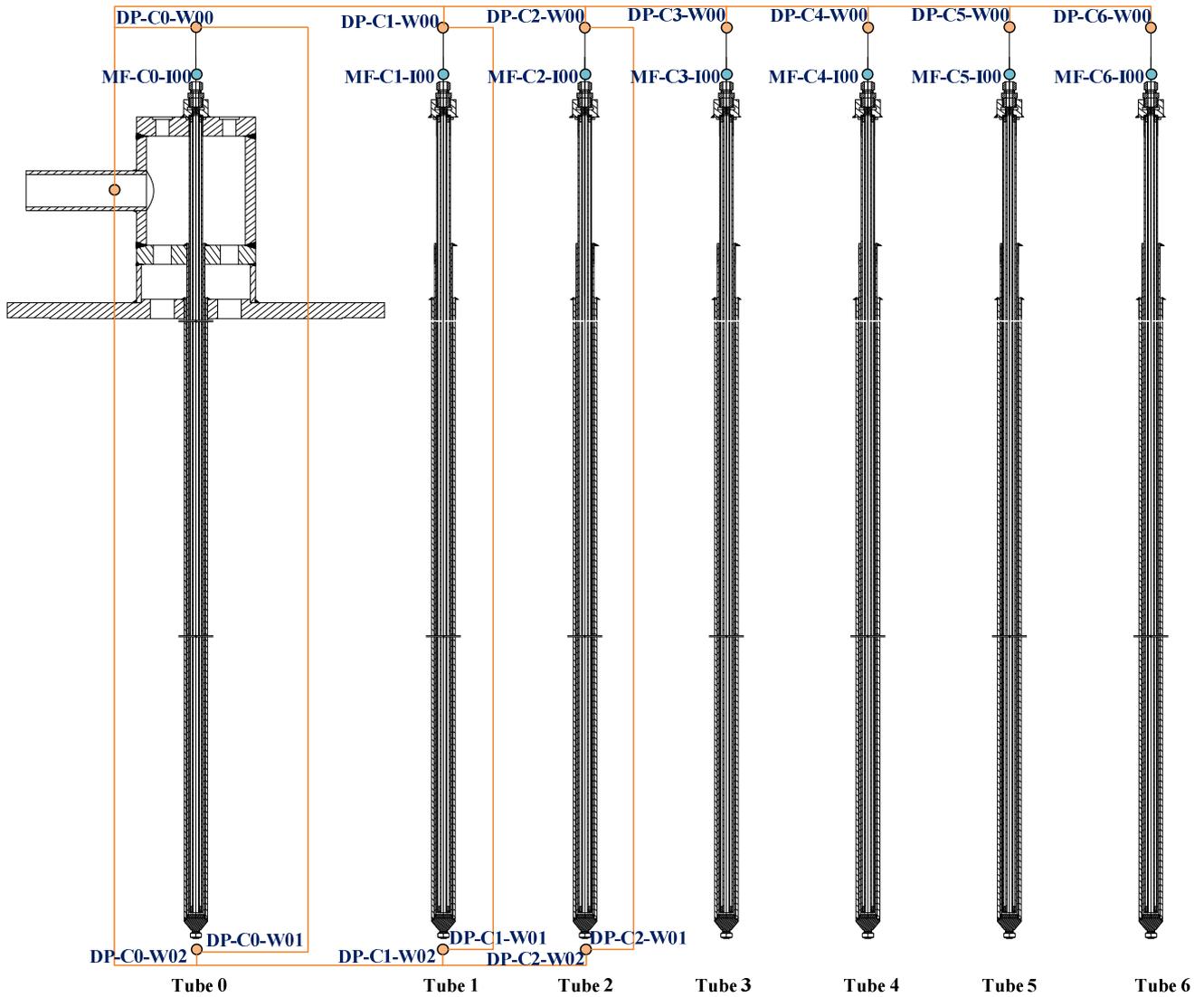


Fig. 5.6 – Sezione di prova: disposizione della strumentazione – portate e perdite di carico (4 di 4).

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	ADPFISS – LP2 – 028	0	L	24	28

## 6 Requisiti della fornitura

La fornitura dovrà essere in accordo alle prescrizioni elencate nei successivi paragrafi.

### 6.1 Fabbricazione

Il Fornitore si dovrà responsabilizzare sulle scelte effettuate dal Cliente nel progetto concettuale proposto. Tuttavia potrà proporre soluzioni diverse qualora ne semplifichino la fabbricazione.

Sulla base delle specifiche del Cliente, il Fornitore dovrà produrre i disegni di dettaglio ritenuti necessari per definire le dimensioni e le tolleranze finalizzate alla realizzazione dei componenti di impianto in officina.

Nell'assemblare i componenti di impianto dovrà essere prestata particolare attenzione al rispetto delle tolleranze dimensionali stabilite dalla norma UNI EN ISO 13920 scegliendo per ogni tipologia la classe di tolleranza migliore.

### 6.2 Materiali

Le parti di impianto, supporti e altri componenti oggetto della fornitura dovranno essere realizzati in acciaio austenitico tipo AISI 304 o 316, a meno che non venga specificatamente indicato un materiale diverso dal Cliente.

L'approvvigionamento e la ricezione dei materiali dovranno essere condotti conformemente alle norme ASTM, UNI e DIN, accompagnati da certificati di origine, comprovanti le caratteristiche chimico-fisiche e i trattamenti subiti relativi al lotto di materiale della fornitura.

Per le parti per le quali non sia applicabile alcuna delle norme indicate, il Fornitore dovrà procedere secondo il proprio standard aziendale, previa autorizzazione del Cliente.

### 6.3 Strumentazione

La strumentazione della sezione di prova è riportata in sezione 5.2. La strumentazione fornita da ENEA e installata nella fornitura si limita alle termocoppie. Il Fornitore dovrà responsabilizzarsi, previo accordo con ENEA, nella scelta del tipo di collegamento, e quant'altro necessario per la identificazione e installazione.

### 6.4 Saldature

Il riferimento normativo per quanto riguarda i giunti saldati è la Direttiva 97/23/CE (PED). Per le saldature dovrà essere prodotto un documento che riporti per ogni giunzione:

- procedimento usato,
- qualifica saldatura,
- tipo di elettrodo e omologazione,

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	ADPFISS – LP2 – 028	0	L	25	28

- qualifica del saldatore,
- controlli non distruttivi previsti.

### **6.5 Prova in pressione**

Il Cliente richiede che venga eseguita una prova in pressione, secondo direttiva 97/23/CE (PED). Questa consisterà in due prove in pressione (idraulica) per collaudo e accettazione del sistema tubi e camera vapore, oltreché tubi camera elio. La prova in pressione sarà effettuata presso il Fornitore.

### **6.6 Pulizia**

Particolare attenzione dovrà essere riservata alla pulizia dei manufatti, sia in fase di fabbricazione che durante il trasporto. Dovrà essere garantito un alto livello di pulizia necessario ad evitare che residui di lavorazioni meccaniche, scorie di saldatura, polvere ecc. possano depositarsi all'interno dei componenti di impianto.

Tutti i componenti di impianto dovranno essere sgrassati e decapati presso le officine del Fornitore.

## **7 Estensione della fornitura**

La fornitura comprende la bulloneria di collegamento, le flange, le guarnizioni di tenuta, salvo quanto escluso in sezione 2.

La fornitura include, il dossier di fine fabbricazione (in formato cartaceo ed elettronico), dove sono raccolti tutti i documenti riguardanti:

- l'approvvigionamento dei materiali e i relativi certificati;
- i disegni di officina necessari per la fabbricazione dei componenti;
- la descrizione delle saldature e i controlli effettuati,
- le prove di tenuta realizzate e la relativa procedura adottata;
- le note di calcolo prodotte per i vari dimensionamenti effettuati;
- i controlli dimensionali effettuati;
- le certificazioni richieste secondo la direttiva 97/23/CE (PED).

### **7.1 Controlli dimensionali e verifiche in officina**

Il Cliente si riserva, in accordo con il Fornitore, di eseguire visite presso l'officina dello stesso durante la fabbricazione al fine di controllarne l'andamento, mediante l'esecuzione di controlli dimensionali e ispezioni visive per verificare la congruità dei componenti con quanto indicato nei disegni concettuali forniti.

### **7.2 Imballo e trasporto**

Gli imballi dovranno essere idonei a garantire la conservazione della pulizia, la protezione delle parti e l'integrità strutturale della fornitura, durante il trasporto fino al sito ENEA del Brasimone.

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	ADPFISS – LP2 – 028	0	L	26	28

### 7.3 Accettazione e garanzia

L'accettazione della fornitura avverrà presso il Centro ENEA del Brasimone a seguito della verifica dell'integrità dei componenti e del buon stato di conservazione dopo l'effettuazione del trasporto e dell'installazione sull'impianto. In caso di esito negativo dell'accettazione, sarà a completo carico del Fornitore apportare tutte le modifiche necessarie per soddisfare i requisiti di prestazioni e funzionalità riportate in Specifica Tecnica.

La garanzia avrà la durata di 24 mesi e inizierà dalla data di accettazione della fornitura.

### 8 Limiti della fornitura, esclusioni, interfacce

E' escluso dalla presente fornitura (vedi disegno **HR-0100-Assieme SGBT**) l'approvvigionamento dei seguenti materiali:

- Item 1 → forgiato (non lavorato) per ottenere la flangia di collegamento di spessore 30mm
- Item 4 → Tubi *second* ( $\phi_e=25.40$  mm,  $s= 1.65$ mm)
- Item 6 → Tubi *inner* ( $\phi_e=19.05$  mm,  $s= 1.65$ mm)
- Item 7 → Tubi *slave* ( $\phi_e=9.53$  mm,  $s= 1.22$ mm)
- Item 17 → Tubo da 2" per sonde O<sub>2</sub>
- Item 18 → Flange da 2" ANSI 300
- Item 19 → Griglie spaziatrici
- Item 21 → Tubi *third* ( $\phi_e=33.40$  mm)
- scatola esagonale esterna;
- polvere SiC per il riempimento della intercapedine;
- strumentazione (49 termocoppie) da installare.

L'approvvigionamento dei materiali sopra sarà a carico di ENEA che li consegnerà al Fornitore in conto lavorazione.

### 9 Durata della fornitura, penali, pagamenti

La presente fornitura dovrà essere ultimata entro il 31 dicembre 2013.

Per ogni giorno solare di ritardo nella consegna della fornitura sarà applicata la penale dello 0,3% (tre per mille) dell'importo totale. L'importo globale della penale applicabile non potrà superare, comunque, il 10% dell'importo totale della fornitura.

Qualora l'ammontare complessivo della penale ecceda il 10% del valore del contratto, il responsabile ENEA può risolvere il contratto e provvedere all'esecuzione in danno.

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	ADPFISS – LP2 – 028	0	L	27	28

I pagamenti saranno effettuati, a fronte di presentazione di regolare fattura posticipata, come di seguito riportato:

- 40% dell'ammontare totale a esito positivo dell'accettazione del progetto di dettaglio e del relativo piano di fabbricazione e controllo;
- 40% dell'ammontare totale a esito positivo della prova in pressione presso le officine del fornitore;
- 20% dell'ammontare totale ad esito positivo dell'accettazione in sito;

I pagamenti saranno effettuati ad esito positivo del DURC (documento unico di regolarità contributiva), previo benestare del Responsabile del Procedimento, entro sessanta giorni dalla data di ricevimento delle fatture emesse.

## **10 Allegati**

Si allega il disegno concettuale della sezione di prova: **HR-0100-Assieme SGBT**.

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	ADPFISS – LP2 – 028	0	L	28	28

## LISTA DEI RIFERIMENTI

- [1] Rozzia D., et al., Activities in Support to the Assessment of Steam Generator Bayonet Tubes for GEN-IV Applications, AdP PAR-2011, ENEA NNFISS - LP3 – 054, 18/09/2012.
- [2] Rozzia D., A. Toti, M. Tarantino, *Double-wall Bayonet Tube Steam Generator for LFR Application. Preliminary Characterization*, NNFISS – LP3 – 032, September 2011.
- [3] Rozzia D., A. Toti, M. Tarantino, *Experimental Investigation on Powders Thermal Performance to Support the Design of Innovative SG for LFR*, DR\_/PhD/01(11)-IIR-Rev1a, Brasimone, May 2011.
- [4] Tarantino M., Scaddozzo G., *Test specifications of the Integral Circulation Experiments*, Report ENEA ET-F-S-001, D. 4.15, DM4 DEMETRA, IP-EUROTRANS, 2006.
- [5] <http://webtv.sede.enea.it/nucleare.html>
- [6] [www.leader-fp7.eu](http://www.leader-fp7.eu), LEADER Project website.
- [7] Rozzia D., M. Tarantino N. Forgione, *State of Development of LFR and ADS Technologies and R&D Needs*, HELIMNET Project WP-5 DEL 5.1, February 2012.
- [8] Leader 2nd Project Coordination Committee meeting, Genova, May 12th 2011.
- [9] Toti A., *Preliminary Characterization of a Double-Wall Bayonet Tube Steam Generator for LFR Application*, Master thesis on nuclear engineering, University of Roma Sapienza, 28-10-2011.
- [10] Rozzia D., M. Agostini, A. Ventura, G Venturi, M. Tarantino, *Experimental Assessment of Powders Compaction When Subjected to Thermal Loads*, DR\_/PhD/01(12)-IIR-Rev0a, Brasimone, February 2012.