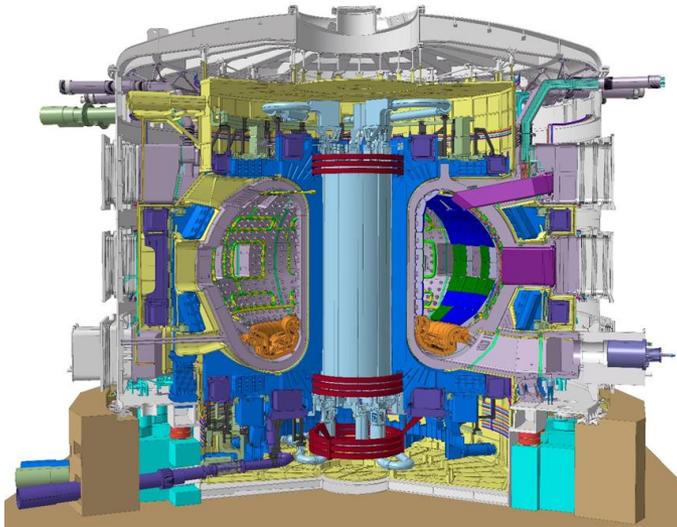
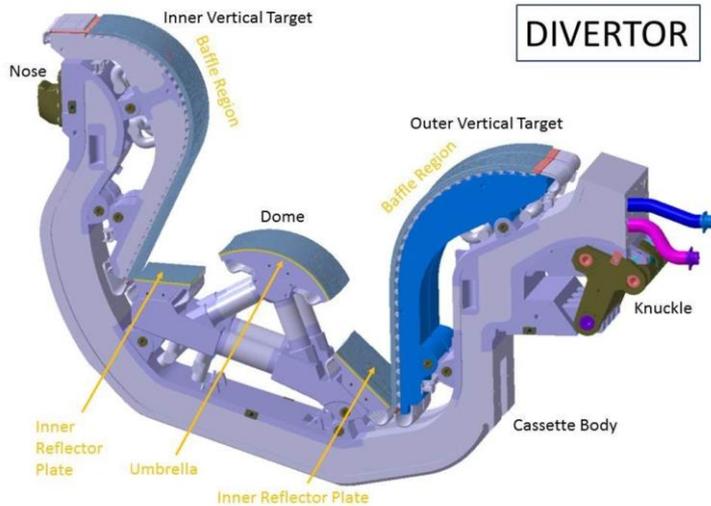


# Fusione nucleare: strutture resistenti al calore



- I componenti del divertore nel tokamak direttamente affacciati al plasma si chiamano Plasma Facing Units (PFU)
- Essi sono costituiti da tubi di rame in cui scorre l'acqua di raffreddamento, rivestiti con materiale detto di "armour", armatura (tungsteno in ITER, il reattore a fusione internazionale in costruzione in Francia)



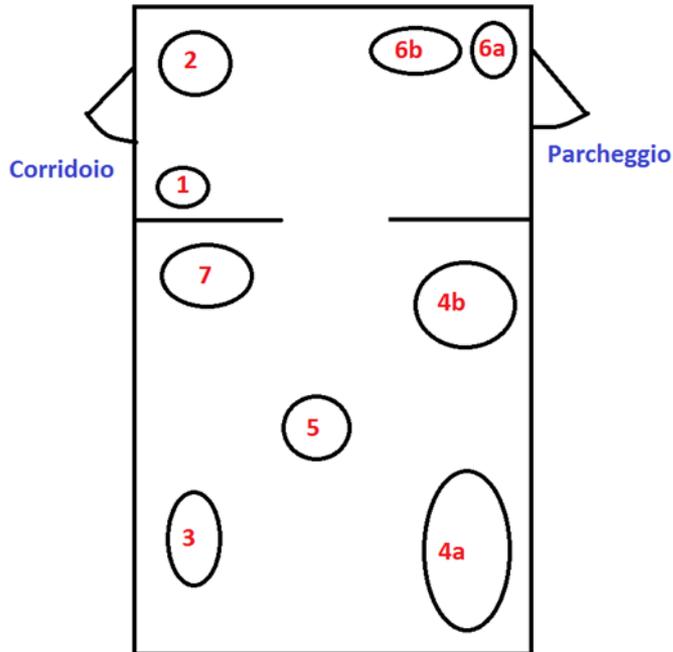
- La giunzione fra i materiali di armour e i tubi di rame a causa delle forti differenze di dilatazione termiche dei materiali richiede tecniche speciali di cui c'è vasta esperienza nel Centro di ricerche ENEA a Frascati
- Qui vengono condotte importanti attività di ricerca e sviluppo di tecnologie e standard industriali per la giunzione tra questi materiali e la verifica della qualità dei componenti realizzati

# Tecnologie per il divertore in ENEA a Frascati



- Nel laboratorio HRP dell'ENEA a Frascati, è stato sviluppato il processo HRP (Hot Radial Pressing) di saldatura per diffusione a bassa temperatura tra monoblocchi in tungsteno e tubi in lega di rame che costituiscono l'elemento base dei PFU del divertore di ITER
- Nel laboratorio vengono effettuate buona parte delle operazioni di sviluppo del processo HRP e di costruzione dei prototipi dei PFU del divertore
- Sono presentati prototipi in scala 1:1 dei PFU del divertore di ITER, in particolare dell'Inner Vertical Target. Ognuno di questi PFU ad alto flusso termico è composto da 138 monoblocchi di tungsteno ( $30 \times 30 \times 12 \text{ mm}^3$ ) montati su un tubo lungo 1.8 m in CuCrZr, per un peso complessivo di circa 30 kg. In ITER vi saranno 54 settori del divertore, con 16 PFU ognuno

# Laboratorio HRP

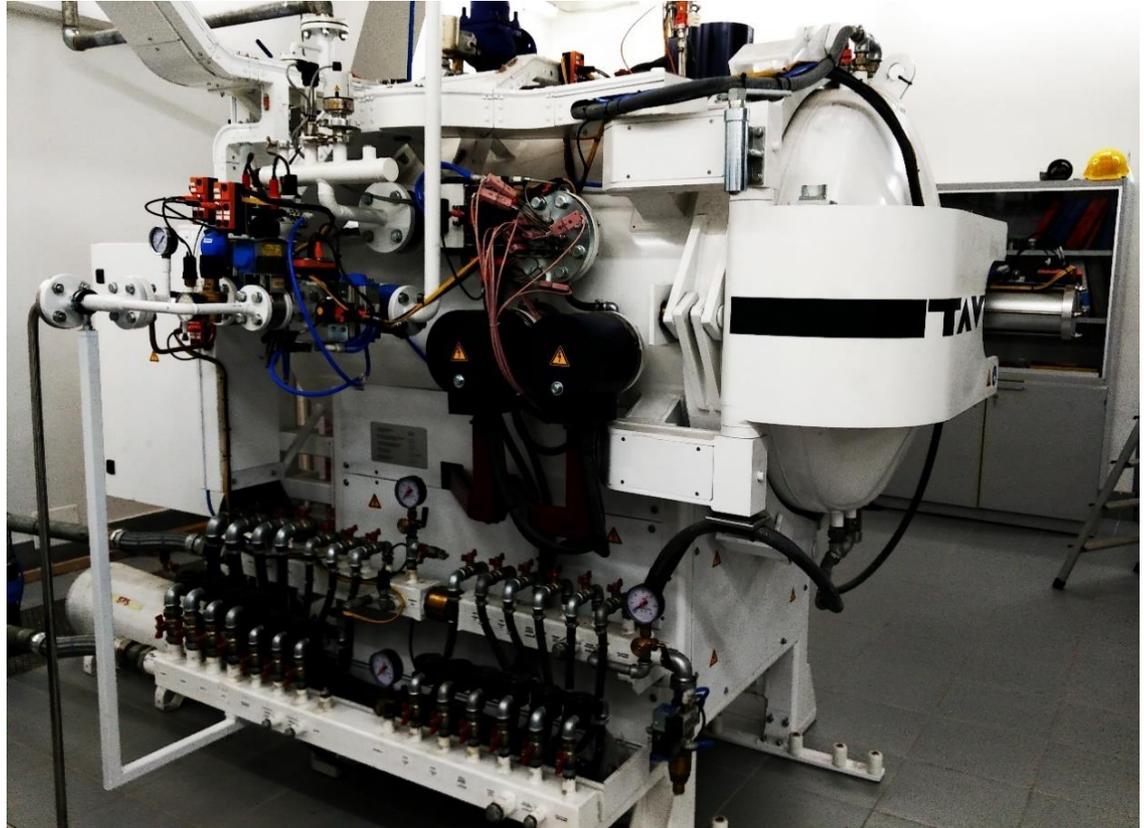


1. Preparazione e controllo dei monoblocchi
2. Forno per il casting (fusione dell'interlayer di rame nei fori) dei monoblocchi
3. Assemblaggio delle Plasma Facing Units PFU (monoblocchi e contenimento attorno ai tubi in lega di rame)
4. Forni per HRP (saldatura per diffusione) dei PFU di ITER (a) e di prototipi lineari per lo sviluppo del processo (b)
5. Rivelatore di fughe ad elio per la verifica della tenuta del vuoto (leak test) dei PFU dopo la giunzione HRP
6. Sistemi ad ultrasuoni per il controllo non distruttivo dei difetti di saldatura sui monoblocchi (a) e PFU (b)
7. Prima verifica dimensionale dei prototipi



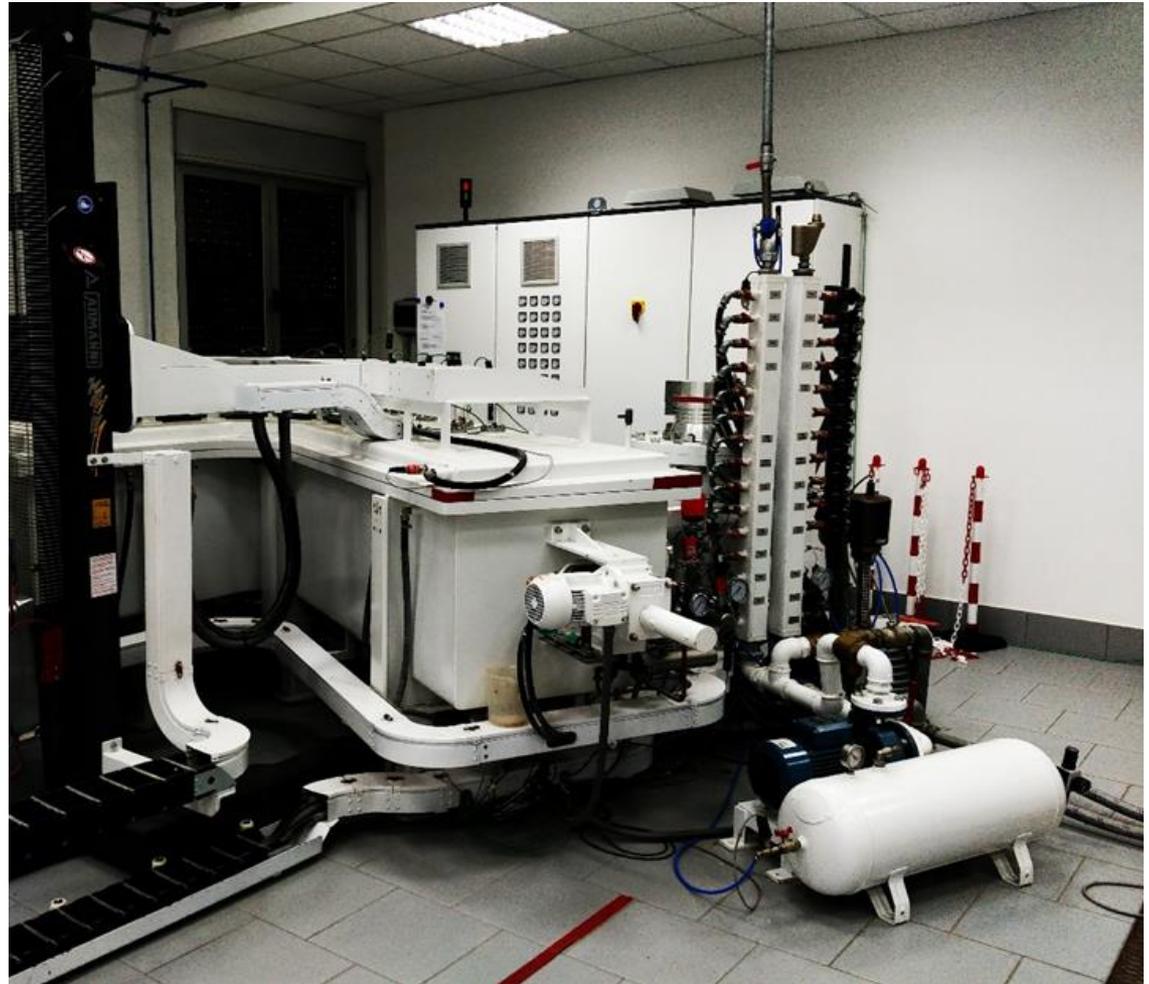
# Forno per casting di monoblocchi

- Forno in grafite
- Riscaldamento elettrico, temperatura max 1400 °C
- Operazione possibile in ultra vuoto  $5 \cdot 10^{-6}$  mbar o in atmosfera di argon, 12 bar max
- Pompa rotativa + turbomolecolare o meccanica per alti volumi
- Utilizzato per il casting (fusione dell'interlayer di rame nei fori dei monoblocchi di tungsteno)



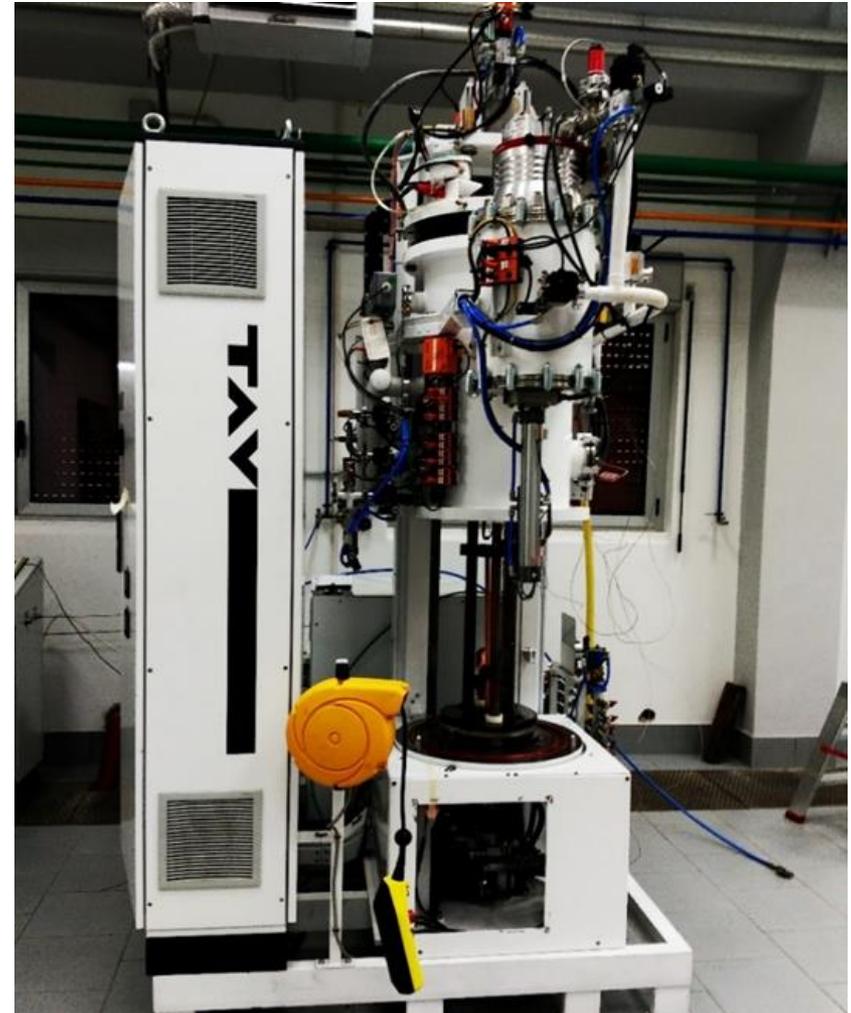
# Forno per HRP del IVT

- Forno in metallo
- Riscaldamento elettrico tramite resistenze, controllato in 16 zone, temperatura  $> 600\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Operazione in ultra vuoto  $5 \cdot 10^{-6}$  mbar
- Pompa rotativa + turbomolecolare
- Pressurizzazione del tubo in rame con Argon a 600 bar, tramite moltiplicatore ad aria
- Geometria ottimizzata per le Plasma Facing Units del target interno del divertore di ITER



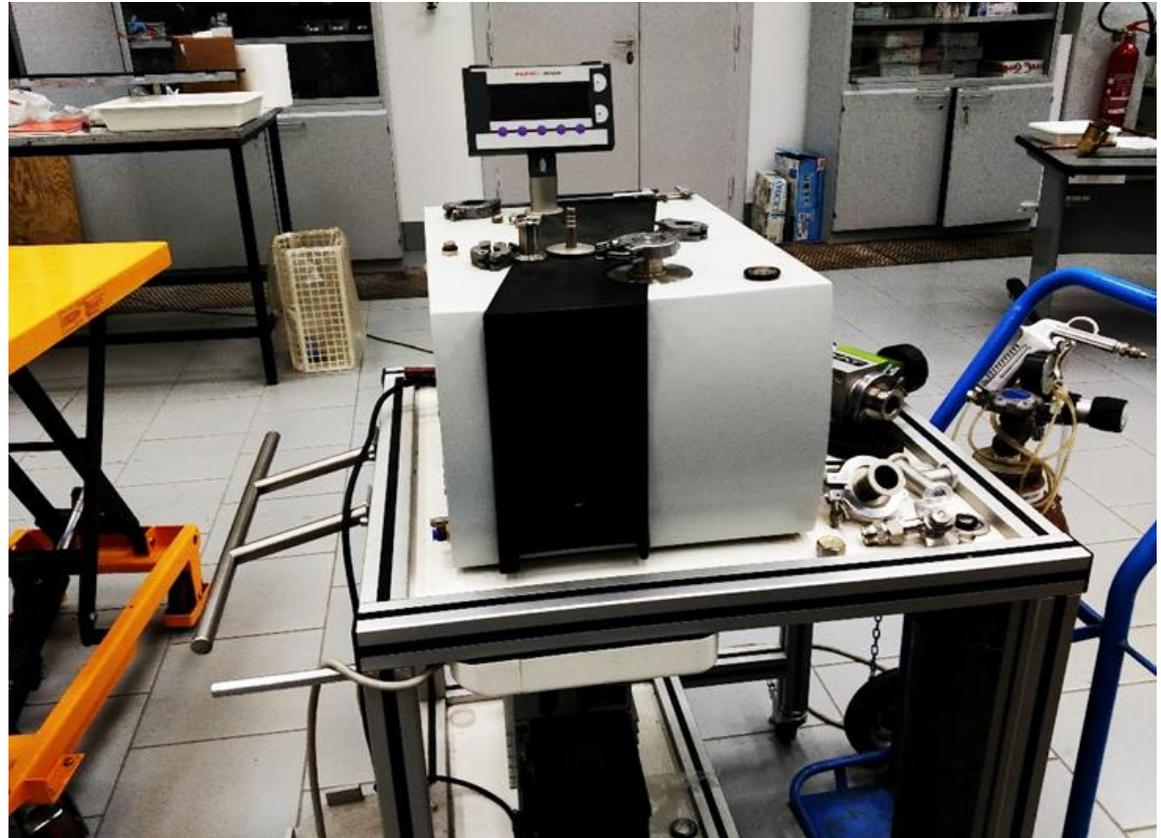
# Forno per HRP effetto Joule

- Forno in metallo
- Riscaldamento elettrico diretto per effetto Joule del tubo in rame, controllato in 7 zone, temperatura > 600 °C
- Operazione in ultra vuoto  $5 \cdot 10^{-6}$  mbar
- Pompa rotativa + turbomolecolare
- Pressurizzazione del tubo in rame con Argon a 600 bar, tramite moltiplicatore ad aria
- Utilizzato per la messa a punto del processo con prototipi lineari



# Rivelatore per leak test

- Rivelatore di fughe ad Elio con quadrupolo per verificare l'ingresso di Elio nei campioni
- Pompa rotativa + pompa turbomolecolare in ultra vuoto  $< 10^{-6}$  mbar
- Utilizzato per la ricerca di microfratture e la verifica della tenuta del vuoto (leak test) dei tubi dopo la giunzione HRP



# Sistema di test ad ultrasuoni

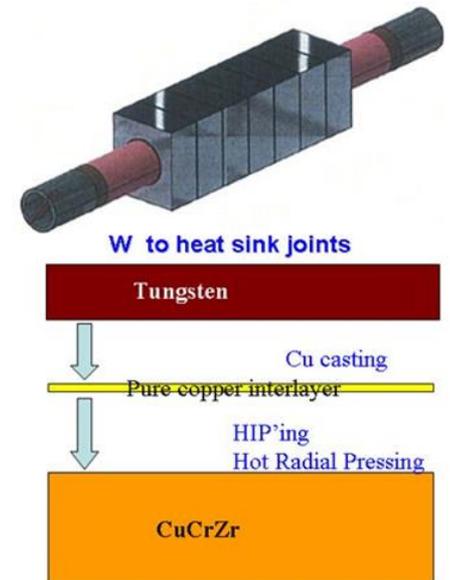
- Controllo non distruttivo ad ultrasuoni in acqua della presenza di difetti nei materiali e nelle saldature per diffusione
- Ecografi con sonde pulse echo (emissione e misura ultrasuoni dalla stessa sonda) a 15 MHz
- Sensibilità a difetti di diametro inferiore a 0.5 mm
- Un sistema a 4 assi (x, y, z e rotazione) ad immersione per la verifica del casting dei monoblocchi
- Un sistema a movimento elicoidale per il controllo dei PFU (scansione completa di un PFU in 7 ore)



# Saldatura per diffusione HRP

- La saldatura per diffusione HRP (Hot Radial Pressing), sviluppata nel centro ENEA di Frascati, è un processo di giunzione dei monoblocchi forati al tubo in lega di rame
- Impiega la pressione dovuta all'espansione radiale del tubo prodotta da un gas inerte per promuovere la saldatura per diffusione a temperature relativamente basse (600 °C) evitando così le deformazioni e le transizioni di fase nella lega
- Viene utilizzata per unire monoblocchi forati in vari materiali (tungsteno, compositi con fibre di carbonio CFC), di varie dimensioni (attualmente 30x30x12 mm<sup>3</sup>) con tubi in leghe di rame (CuCrZr o Glidcop a basso contenuto di ossigeno).

Monoblock design concept



- Per ridurre gli stress residui della giunzione si interpone tra monoblocco e tubo un interlayer in rame
- Gli elementi così prodotti costituiscono le Plasma Facing Unit del divertore, ossia i componenti capaci di sostenere l'elevato flusso termico proveniente dal plasma

# Preparazione dei materiali per HRP

1. Preparazione e pulizia dei monoblocchi forati, in cui viene inserito un piccolo cilindro di rame per mezzo di un'apposita attrezzatura in grafite (su cui il rame fuso non si attacca); questo strato "morbido" di rame puro all'interno del foro è indispensabile sia per il funzionamento del componente che per la riuscita della giunzione, permettendo di attenuare gli sforzi fra "armour" e tubo
2. Fusione del rame (casting) nei monoblocchi così preparati con l'apposito forno a 1100 °C in atmosfera inerte di Argon a 3 bar, per ottenere un rivestimento di rame all'interno del foro del monoblocco
3. Lavorazione (in ditte esterne) a 13 mm del foro interno dei monoblocchi
4. Controllo con il sistema ad ultrasuoni dei difetti di saldatura nel rame e qualificazione dei monoblocchi
5. Ulteriore lavorazione del foro interno fino alle dimensioni finali per il montaggio sul tubo (15.08mm)
6. Pulizia (nel laboratorio di chimica) dei monoblocchi con acido citrico e passaggio in vasche ad ultrasuoni
7. Montaggio dei monoblocchi sui tubo in lega di rame CuCrZr che costituiranno le condotte di raffreddamento dei PFU; le parti di tubo che non sono coperte dai monoblocchi vengono rivestite con appositi gusci di contenimento che forniscono la resistenza alla pressione del gas durante il processo HRP

# Processo di giunzione HRP

8. Inserimento dei prototipi in un forno HRP a seconda della loro geometria e della tecnica di riscaldamento
9. Il processo HRP vero e proprio prevede (con un ciclo completamente gestito da un computer che controlla il riscaldamento ed acquisisce i segnali delle termocoppie (per la misura delle temperature in vari punti del forno e del prototipo), dei misuratori di pressione, delle celle di carico meccaniche (per la misura delle forze) e dei sensori di posizione (per la misura degli spostamenti):
  1. Una salita controllata in temperatura fino a 350 °C con una pausa di 12 ore per permettere il degassamento, ossia l'espulsione di impurezze intrappolate nei materiali
  2. Una nuova salita controllata fino a 600 °C
  3. Durante le salite in temperatura i prototipi sono liberi di espandersi nel forno per evitare stress dovuti all'espansione termica, dopodiché vengono bloccati con appositi pistoni in maniera controllata da sensori di posizione e celle di carico
  4. L'applicazione di una pressione di 600 bar con argon nel tubo per 110 minuti per promuovere la diffusione del rame
  5. Un raffreddamento controllato dei prototipi
10. Controllo della tenuta al vuoto dei tubi dopo la saldatura con il cerca fughe ad elio
11. Controllo ecografico della presenza di difetti e della qualità della saldatura per diffusione
12. Test dimensionali, di planarità e di allineamento con laser tracker (nel laboratorio di meccanica)