

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria dell'Energia

Progetto termo-idraulico e specifica per la costruzione delle bobine in-vessel di DTT

Tutor universitario: Prof. Margoni Martino

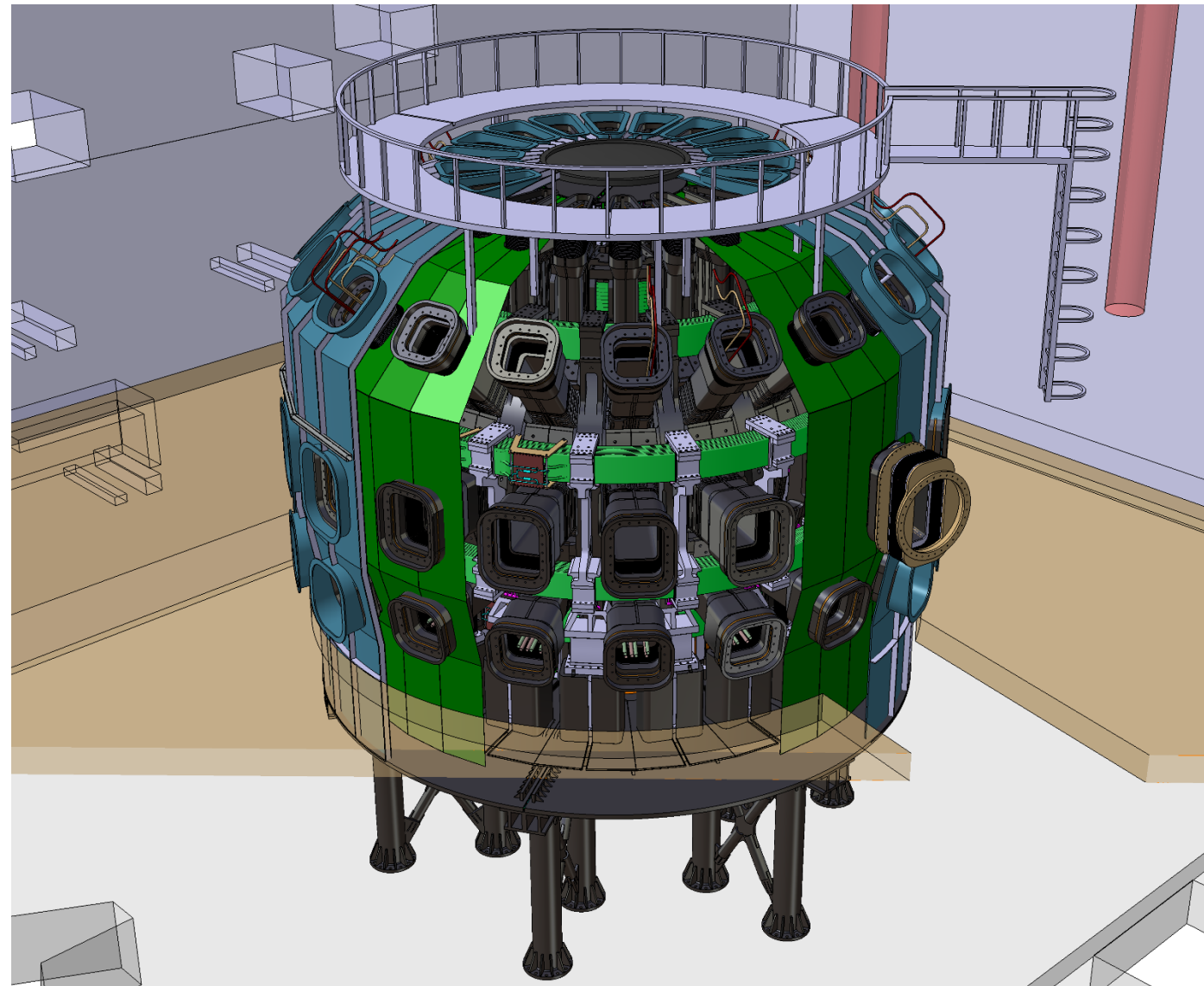
Co-tutor: PhD Ing. Dalla Palma Mauro

Laureando: *Dai Prà Kevin*

Padova, 20/09/2023

Campagne sperimentali vengono condotte in tutto il mondo con macchine prototipali a fusione termonucleare per dimostrare la possibilità di produrre energia da una nuova fonte sostenibile e inesauribile.

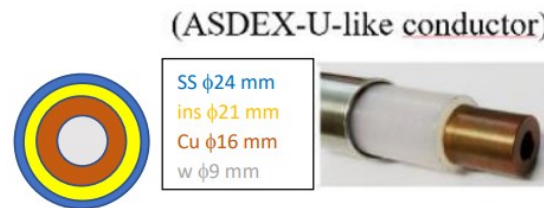
Nuovi esperimenti sono attualmente in costruzione, tra questi DTT a Frascati con l'obiettivo di realizzare un programma su soluzioni alternative per il divertore che è il sistema designato all'estrazione del calore generato dalle reazioni di fusione.



Vista CAD di Divertor Tokamak Test (DTT) facility

In DTT verrà realizzato un sistema di bobine in-vessel che include:

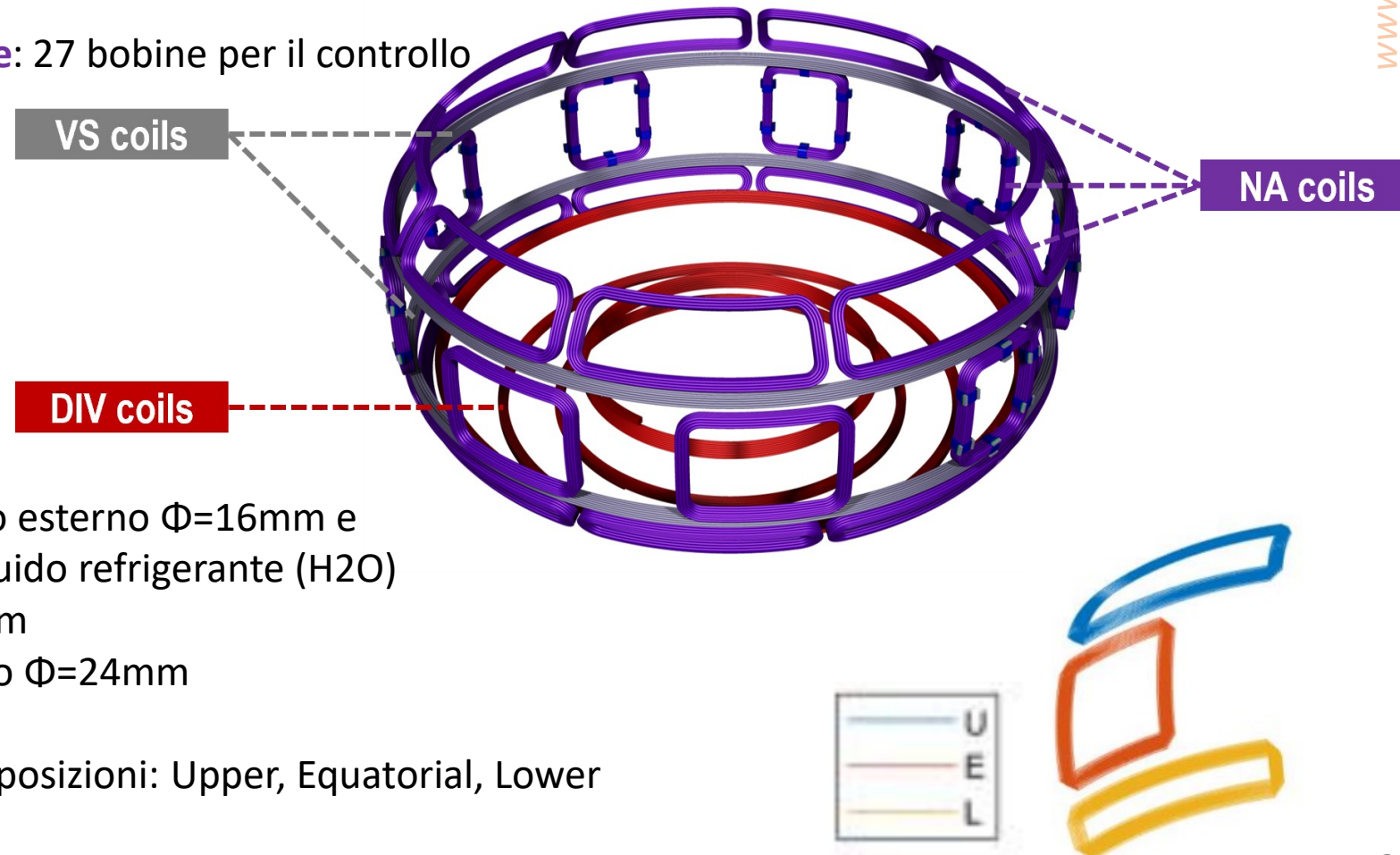
- **bobine di stabilità verticale:** 2 bobine per la stabilizzazione verticale del plasma
- **bobine del divertore:** 4 bobine per il controllo attivo della diffusione del calore sul divertore e per modificare le configurazioni di plasma
- **bobine a sella o non-assialsimmetriche:** 27 bobine per il controllo attivo delle instabilità a bordo plasma



Per la realizzazione delle bobine verrà usato un conduttore cavo formato da diversi strati:

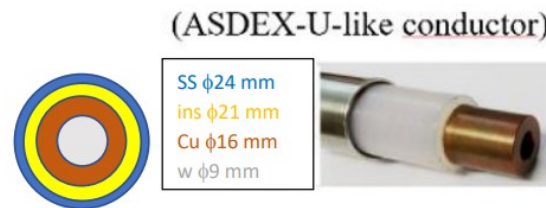
- Conduttore di rame cavo con diametro esterno $\Phi=16\text{mm}$ e interno $\Phi=9\text{mm}$ per il passaggio del fluido refrigerante (H_2O)
- Strato elettricamente isolante $\Phi=21\text{mm}$
- Armatura esterna di acciaio austenitico $\Phi=24\text{mm}$

Le bobine a sella verranno disposte in tre posizioni: Upper, Equatorial, Lower



In DTT verrà realizzato un sistema di bobine in-vessel che include:

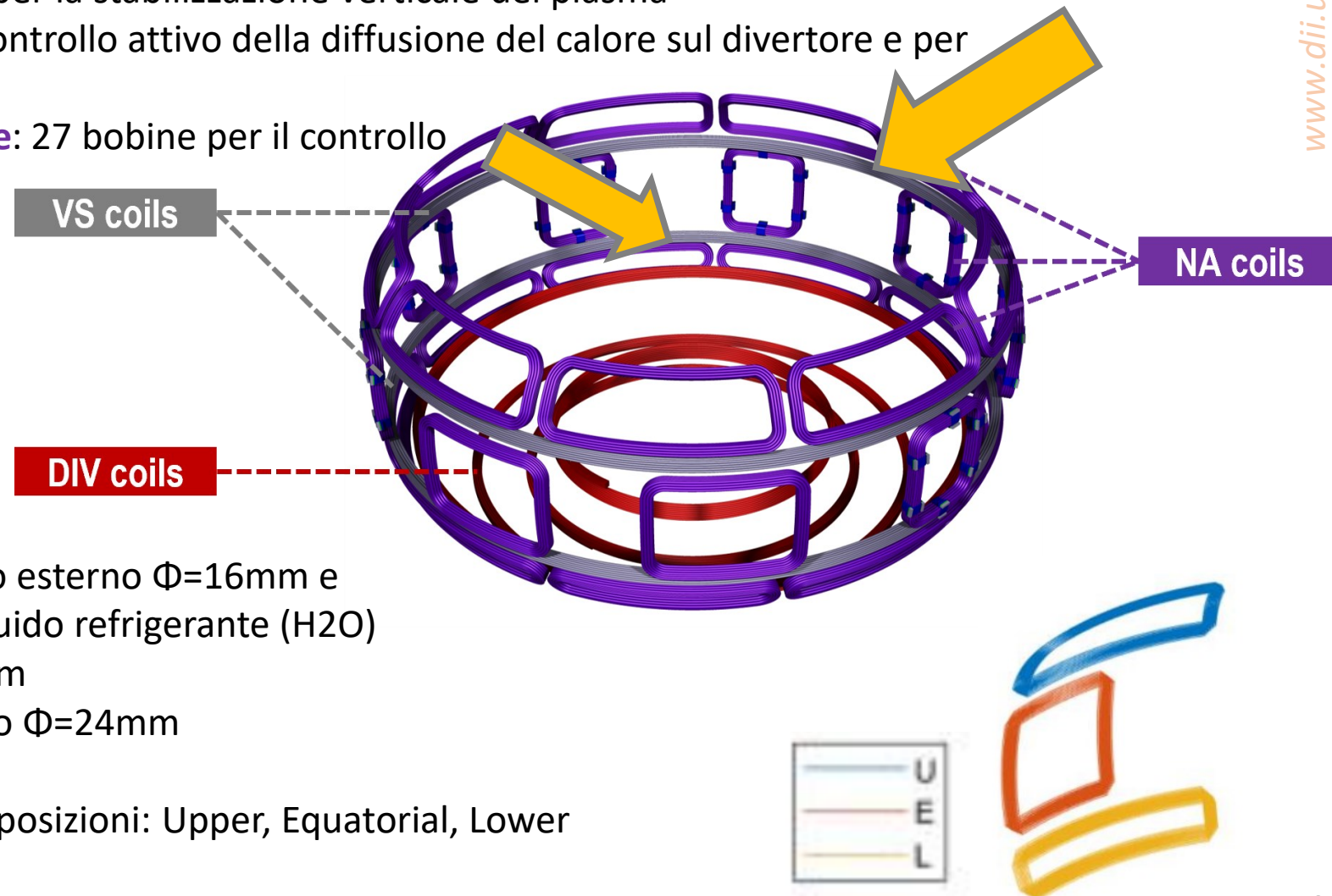
- **bobine di stabilità verticale:** 2 bobine per la stabilizzazione verticale del plasma
- **bobine del divertore:** 4 bobine per il controllo attivo della diffusione del calore sul divertore e per modificare le configurazioni di plasma
- **bobine a sella o non-assialsimmetriche:** 27 bobine per il controllo attivo delle instabilità a bordo plasma



Per la realizzazione delle bobine verrà usato un conduttore cavo formato da diversi strati:

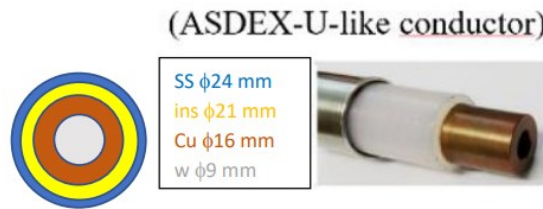
- Conduttore di rame cavo con diametro esterno $\Phi=16\text{mm}$ e interno $\Phi=9\text{mm}$ per il passaggio del fluido refrigerante (H_2O)
- Strato elettricamente isolante $\Phi=21\text{mm}$
- Armatura esterna di acciaio austenitico $\Phi=24\text{mm}$

Le bobine a sella verranno disposte in tre posizioni: Upper, Equatorial, Lower



In DTT verrà realizzato un sistema di bobine in-vessel che include:

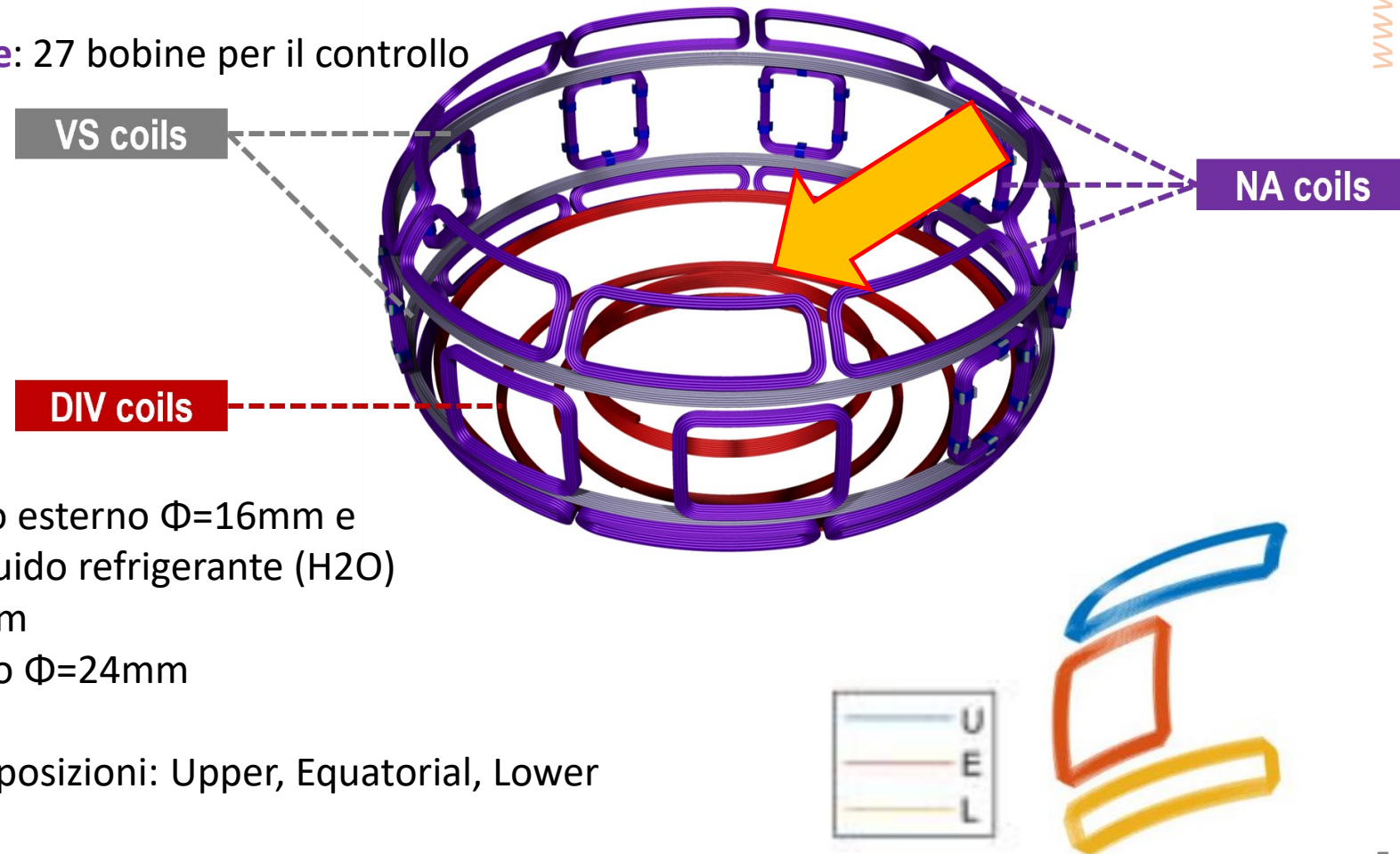
- **bobine di stabilità verticale:** 2 bobine per la stabilizzazione verticale del plasma
- **bobine del divertore:** 4 bobine per il controllo attivo della diffusione del calore sul divertore e per modificare le configurazioni di plasma
- **bobine a sella o non-assialsimmetriche:** 27 bobine per il controllo attivo delle instabilità a bordo plasma



Per la realizzazione delle bobine verrà usato un conduttore cavo formato da diversi strati:

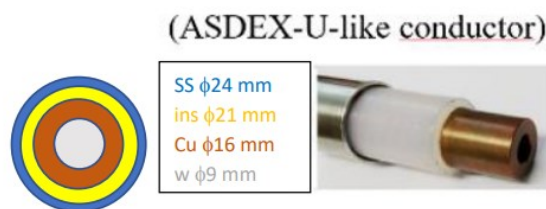
- Conduttore di rame cavo con diametro esterno $\Phi=16\text{mm}$ e interno $\Phi=9\text{mm}$ per il passaggio del fluido refrigerante (H₂O)
- Strato elettricamente isolante $\Phi=21\text{mm}$
- Armatura esterna di acciaio austenitico $\Phi=24\text{mm}$

Le bobine a sella verranno disposte in tre posizioni: Upper, Equatorial, Lower



In DTT verrà realizzato un sistema di bobine in-vessel che include:

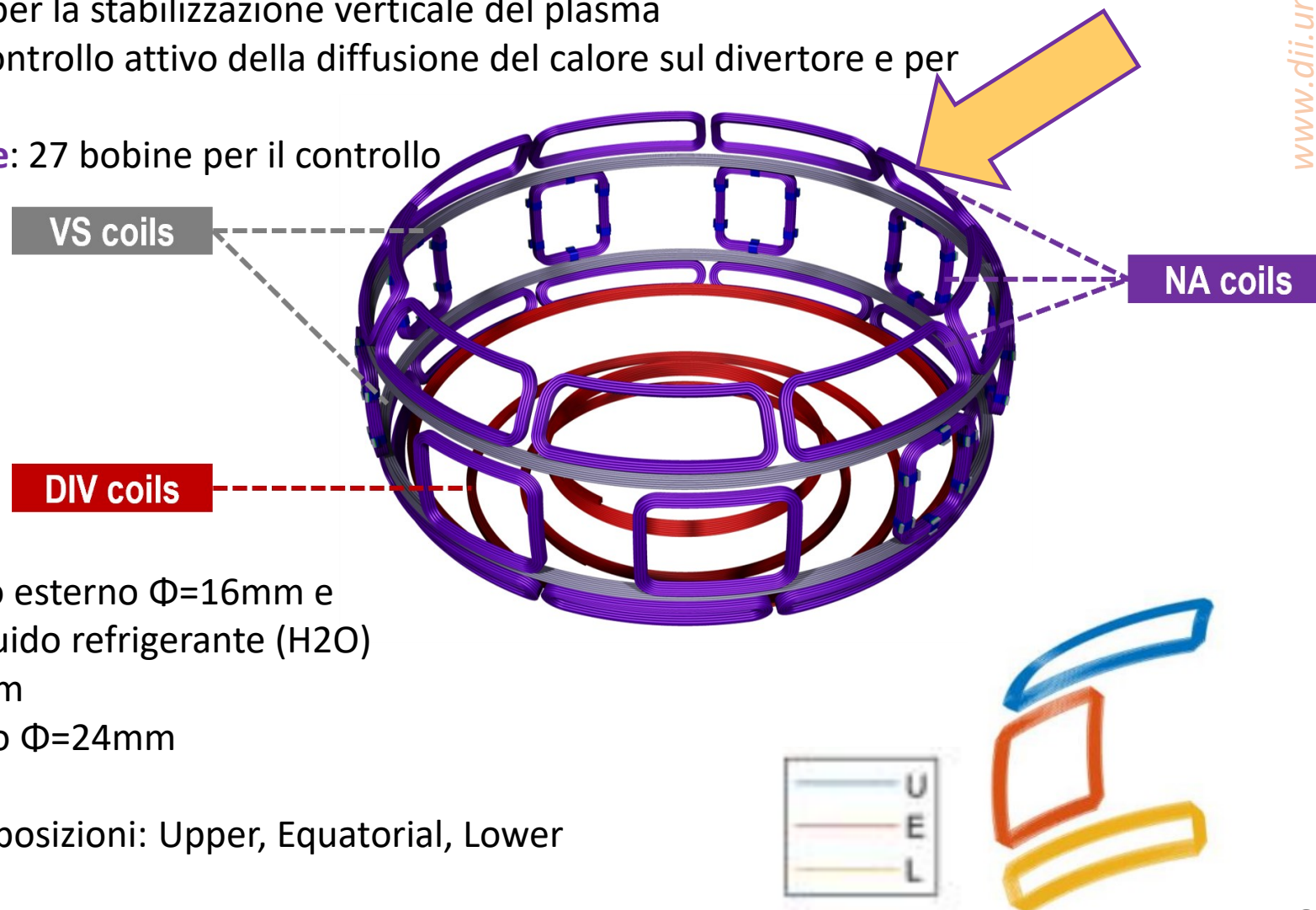
- **bobine di stabilità verticale:** 2 bobine per la stabilizzazione verticale del plasma
- **bobine del divertore:** 4 bobine per il controllo attivo della diffusione del calore sul divertore e per modificare le configurazioni di plasma
- **bobine a sella o non-assialsimmetriche:** 27 bobine per il controllo attivo delle instabilità a bordo plasma



Per la realizzazione delle bobine verrà usato un conduttore cavo formato da diversi strati:

- Conduttore di rame cavo con diametro esterno $\Phi=16\text{mm}$ e interno $\Phi=9\text{mm}$ per il passaggio del fluido refrigerante (H_2O)
- Strato elettricamente isolante $\Phi=21\text{mm}$
- Armatura esterna di acciaio austenitico $\Phi=24\text{mm}$

Le bobine a sella verranno disposte in tre posizioni: Upper, Equatorial, Lower

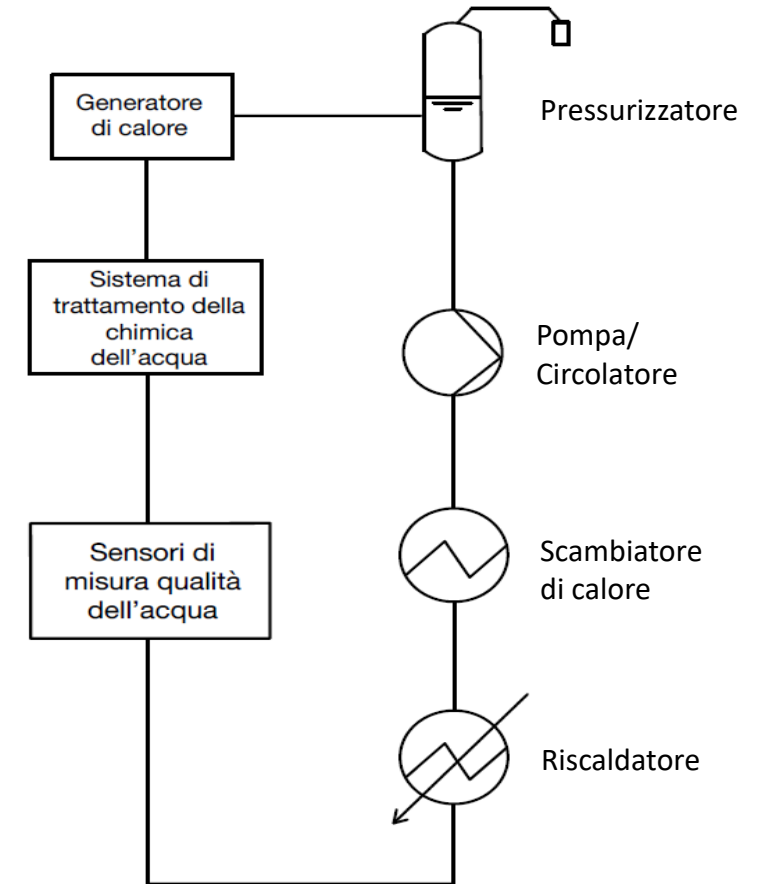


Lista dei componenti:

- Bobina (generatore di calore)
- Pressurizzatore (a valle della bobina)
- Pompa
- Scambiatore di calore
- Riscaldatore
- Sensori di misura della qualità dell'acqua
- Sistema di trattamento della chimica dell'acqua (acqua deionizzata grade 2 come da specifica ISO 3696)

Parameter	Grade 2
pH value at 25 °C inclusive range	Not applicable (see note 1)
Electrical conductivity mS/m at 25 °C, max.	0,1 (see note 2)
Oxidizable matter Oxygen (O) content mg/l, max	0,08
Absorbance at 254 nm and 1 cm optical path length, absorbance units, max.	0,01
Residue after evaporation on heating at 110 °C mg/kg, max.	1
Silica (SiO ₂) content mg/l, max.	0,02

Contenuto di ossigeno massimo 80ppb



All' interno del vessel gli elevati valori di radiazione possono causare la degradazione dei polimeri, tramite la rottura delle catene di reticolazione, e la rapida perdita delle proprietà.

I candidati sono: PTFE, ETFE, FEP, PEEK

PEEK:

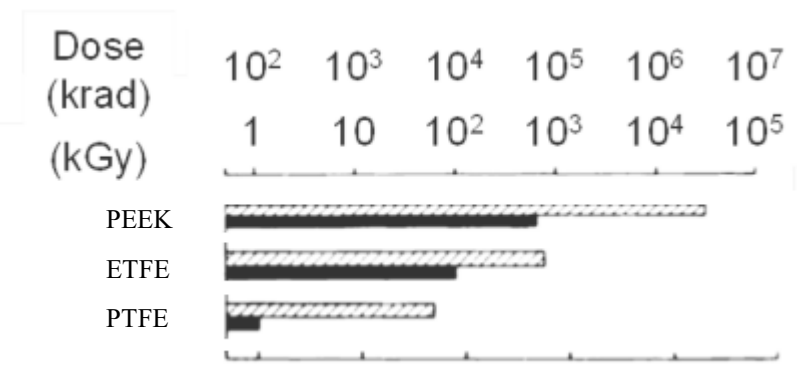
- Ottima resistenza a radiazioni (10^8 rad)
- Può lavorare alla temperatura di baking
- A basse dosi di radiazioni gamma, riduzione proprietà dielettriche
- Difficile da processare per estrarre il conduttore

ETFE (Tefzel):

- Buona resistenza alle radiazioni (10^7 rad)
- Facile da lavorare
- Temperatura di fusione 160°C , incompatibile con la fase di baking

PTFE e FEP (Teflon) presentano una resistenza alle radiazioni comparabile (10^5 rad). Il FEP è preferibile in quanto a differenza del PTFE può essere più facilmente processato per fusione semplificando quindi il processo di fabbricazione del conduttore

	PTFE	ETFE	FEP	PEEK
Density [g/cc]	2,17	1,73	2,13 - 2,15	1.26 - 1.61
Electrical resistivity [ohm-cm]	9E+17	10E+16	10E+17	1.06E+16
Specific heat [J/g°C]	1,054	0,9	1,113	1,51
Thermal conductivity [W/m-K]	0,292	0,238	0,2 ± 0,04	0.295
Melting point [°C]	330	160	260	340
Max allowable temperature [°C]	260		200	
Glass transient temperature [°C]	130.5	80	80	340
Elongation at break [%]	336	394	300	35

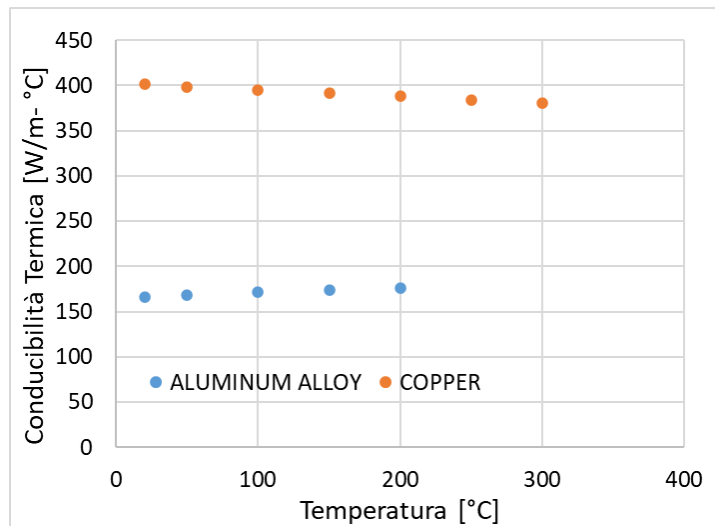


Dose di radiazioni sopportata: in bianco ambiente non ossidato, in nero ambiente ossidato

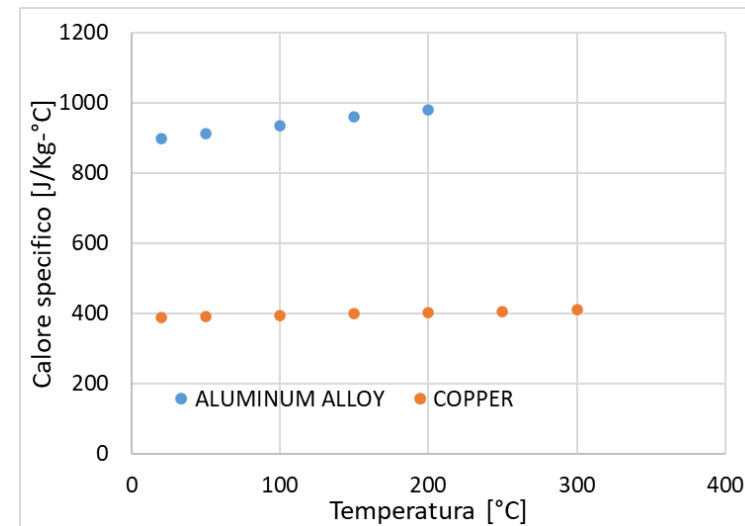
L'ambiente di lavoro è di tipo ossidante, perciò il rame bagnato dall'acqua si corroderà immettendo inoltre residui all'interno dell'acqua refrigerante. Si rende quindi necessaria l'anodizzazione del conduttore oppure lo si può sostituire con l'alluminio in particolare è stata scelta la lega 6061-T6.

L'alluminio presenta una resistività elettrica, alla temperatura di 20°C, più elevata:

$4 \cdot 10^{-8}$ [ohm*m] contro $1,68 \cdot 10^{-8}$ [ohm*m] del rame, il che comporta una maggiore potenza da dissipare.



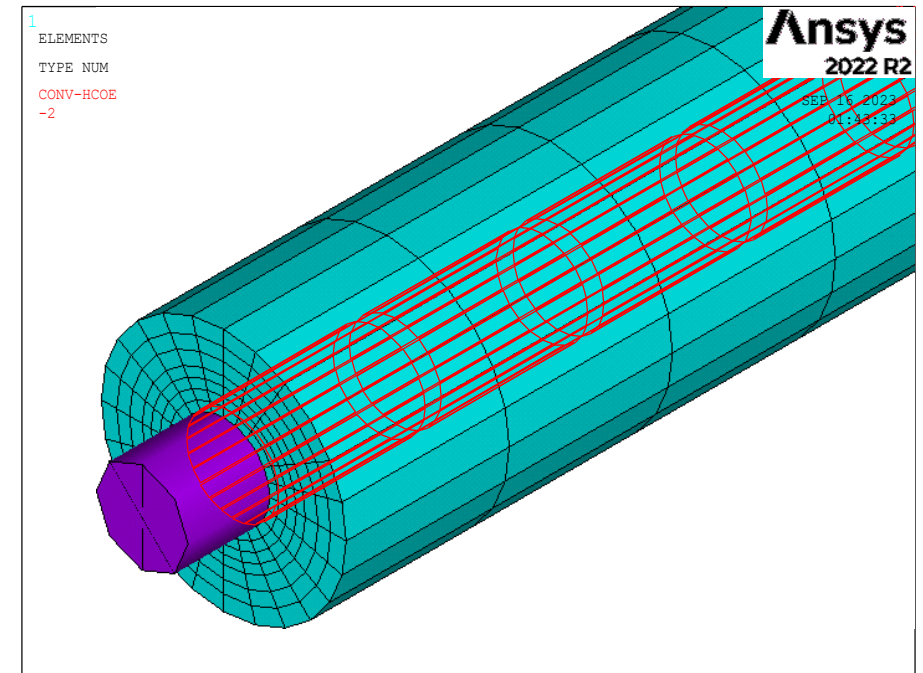
Valori a confronto della conducibilità termica in funzione della temperatura



Valori a confronto del calore specifico in funzione della temperatura

Identificazione delle leggi costitutive per la simulazione 3D non lineare e tempovariante delle bobine in-vessel di DTT con elementi:

- **SOLID225** per il cavo:
 - Elemento 3D
 - Gradi di libertà in temperatura e tensione
 - Resistività elettrica dipendente dalla temperatura locale e dalla diffusività termica
- **FLUID116** per la vena fluida:
 - Elemento 3D
 - Gradi di libertà:
 - Temperatura; simula le proprietà termofisiche (non lineari), trasferisce il flusso termico convettivo alla superficie bagnata
 - Pressione; calcolando il coefficiente di attrito in funzione della temperatura e del numero di Reynolds locali
- **SURF152** per la superficie bagnata dal fluido:
 - Elemento 2D
 - Grado di libertà: temperatura (tramite tra fluido e elementi 3D)



Modello in ANSYS Parametric Design Language (APDL):

- possibilità di assegnare nuovi valori a parametri per simulare diverse bobine e diverse condizioni di funzionamento, incluse diverse geometrie e diversi materiali

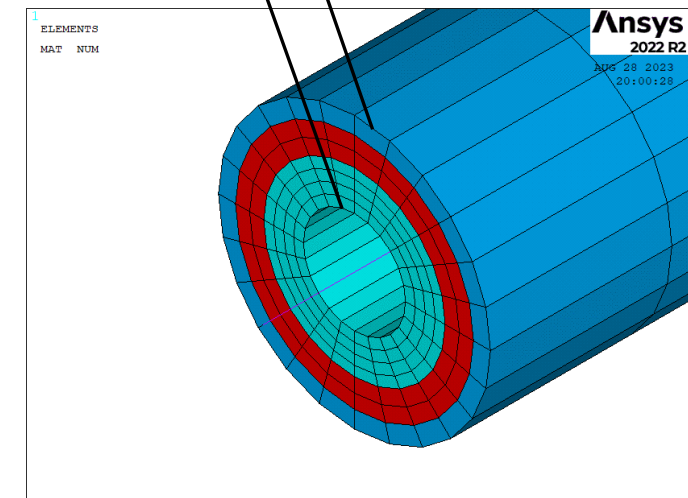
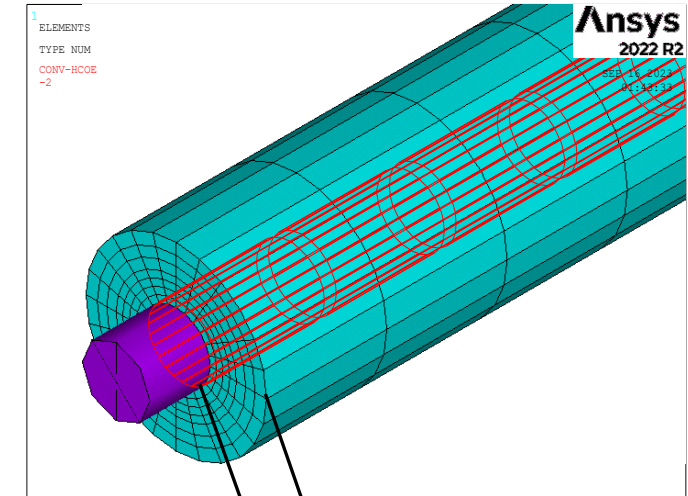
Modellazione *bottom-up* estrudendo le entità elementari:

- la sezione trasversale, l'asse del conduttore e quindi il volume sono stati tutti divisi per determinare la dimensione degli elementi

Il cavo è costituito da tre materiali differenti, ciascuno con un adeguato numero di elementi lungo lo spessore:

- **Il conduttore:**
 - Rame puro o alluminio
 - Quattro elementi (0,875mm per elemento)
- **L'isolante:**
 - FEP
 - Due elementi (1,25mm per elemento)
- **L'armatura:**
 - Lega d'acciaio AISI 316 LN
 - Un unico elemento (1,5mm)
 - Scambio termico verso l'esterno è assunto nullo

Il numero di elementi nella lunghezza è stato scelto per rispettare i limiti di rapporto di forma degli elementi finiti (16 mm per elemento, 5250 elementi in totale per la bobina top lunga 84 m)



Le condizioni al contorno sono applicate in due passi temporali (load steps) con gestione automatica dei sottopassi di soluzione delle non linearità in intervalli (substeps) predeterminati dall'esperienza e dalla complessità del problema per permettere al programma di convergere con i criteri di soluzione

Load step 1 (da $t = 0$ s a $t = 30$ s) con applicazione a gradino delle grandezze:

- Temperatura uniforme iniziale del conduttore di 25°C
- Temperatura dell'acqua all'ingresso del conduttore di 25°C
- Portata del fluido refrigerante (acqua) di $0,2$ kg/s (≈ 3 m/s)
- Applicazione dello scambio termico convettivo alla superficie interna del conduttore
- Pressione dell'acqua all'uscita del conduttore di $2.0\text{E}5$ Pa = 2.0 bar
- Potenziale elettrico del conduttore alla corazza e alla sezione d'ingresso del fluido di 0 V
- Potenziale elettrico alla sezione d'uscita di 30 V

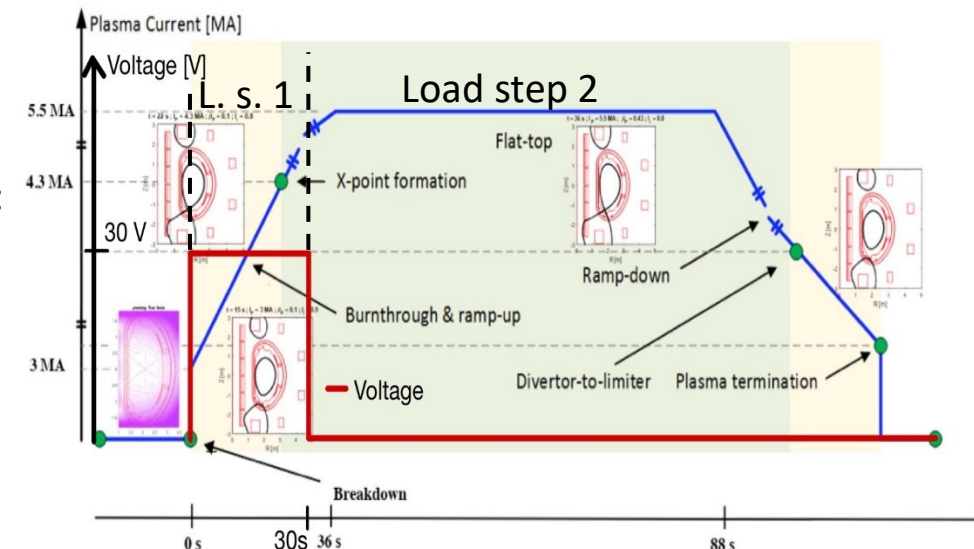
Load step 2 (da $t = 30$ s a $t = 1800$ s) con applicazione a gradino delle grandezze:

- Mantenimento delle precedenti condizioni al contorno
- Differenza di tensione elettrica nulla ai capi del conduttore includendo gli istanti:
 - $t = 90$ s durata dell'impulso di plasma in DTT [Greenbook DTT]
 - $t = 1800$ s per verifica la capacità del sistema tornare alle condizioni termiche iniziali (temperatura uniforme del conduttore di 25°C)

```
! PLASMA CONTROL ON
DELTIM,3.0,3.0,6.0,ON
! OFF - Use DTIME as time step at start of each load step.
! ON - Use final time step from previous load step as
! the starting time step (if automatic time stepping is used).
TIME,30.0 ! Time at the end of the load step
LSWRITE,1 ! 50 ms ramped loads from 0 A to full current

! PLASMA CONTROL OFF
! Application of zero electric potential
NSLE,S,ALL
NSEL,R,LOC,Z,-0.001,+0.001
! NSEL,R,LOC,X,Ri-0.0001,Re+0.0001
D,ALL,VOLT,0.0
ALLSEL

KBC,1
DELTIM,3.0,3.0,300.0,ON
TIME,1800.0 ! Time at the end of the load step
LSWRITE,2 ! 30 s permanent load at maximum current
```

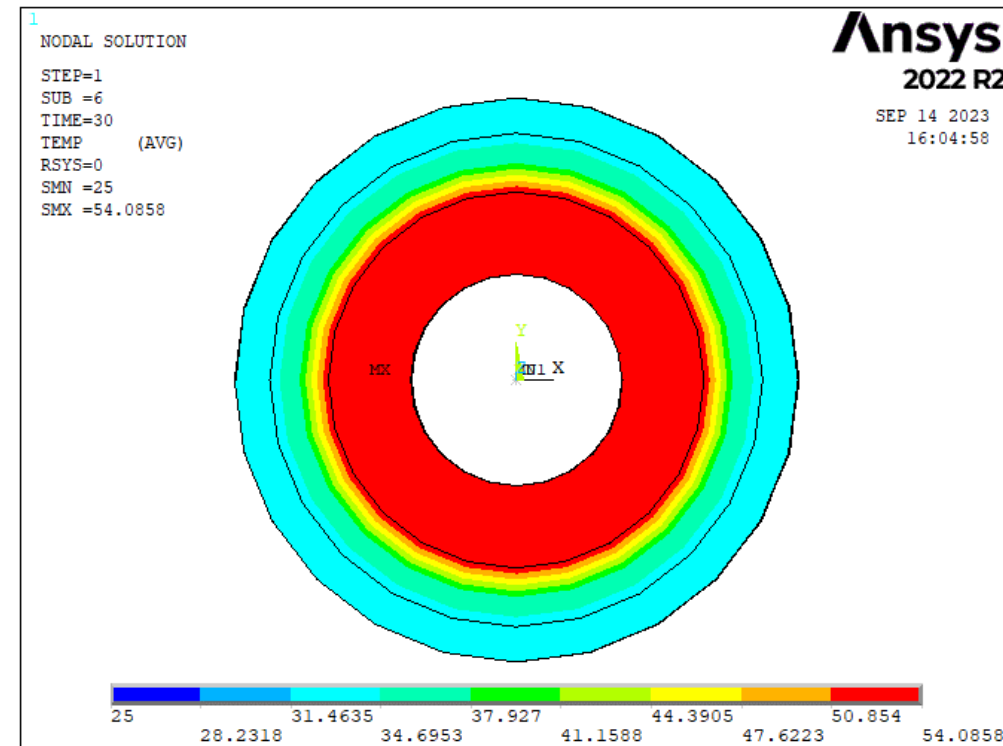


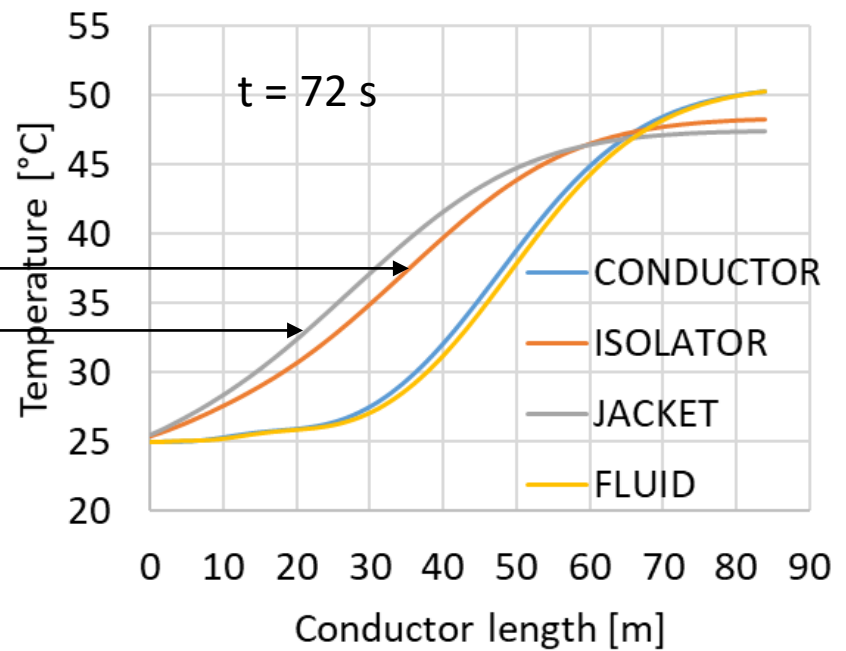
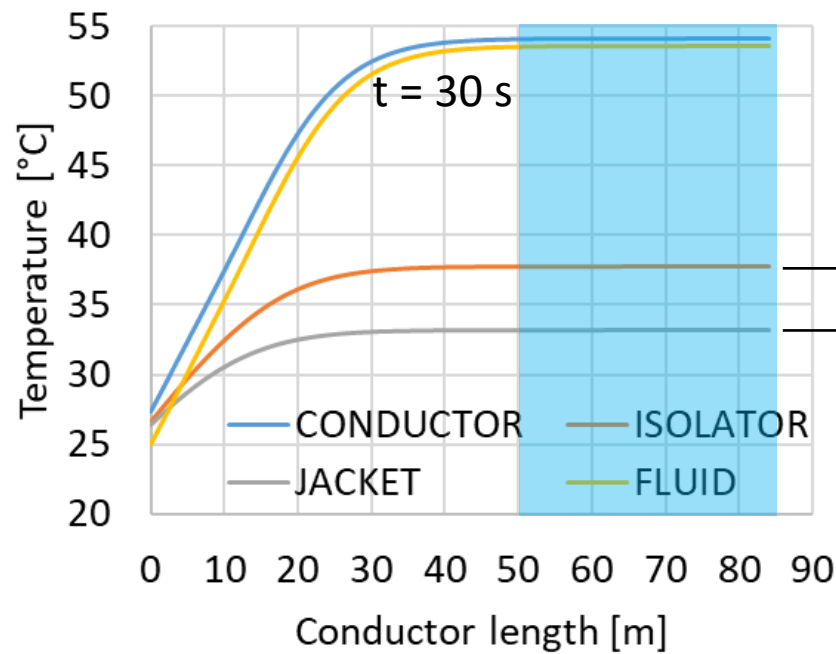
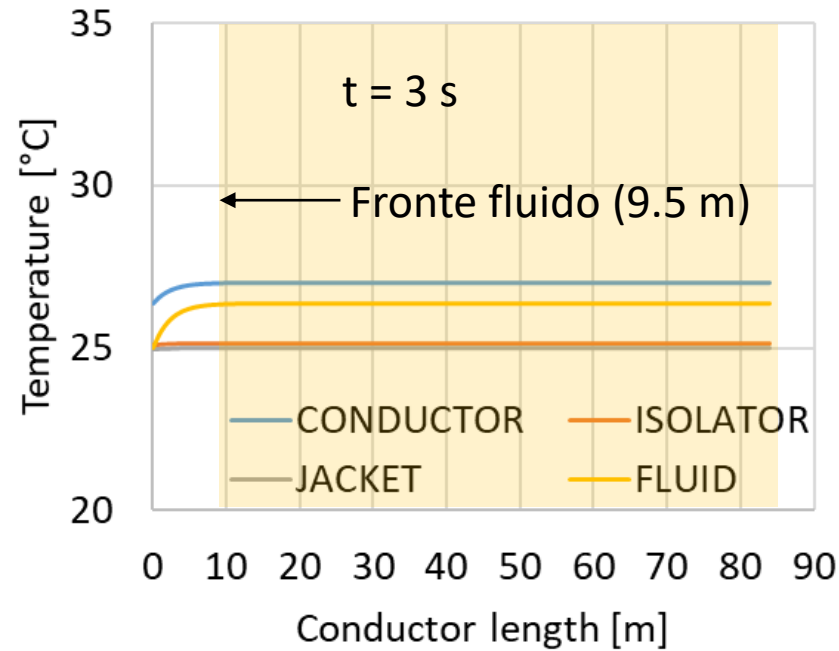
Nella fase di post-processing si vanno ad analizzare i risultati ottenuti durante la fase di soluzione. E' possibile visualizzarli all' interno del software oppure ottenere una stampa esportabile in Excel.

Si è scelto di riportare i risultati ottenuti nei **seguenti** istanti temporali:

- **Set 1,1; t = 3s**
- Set 1,2; t = 6s
- Set 1,3; t = 12s
- Set 1,4; t = 18s
- Set 1,5; t = 24s
- **Set 1,6; t = 30s**
- Set 2,1; t = 33s
- Set 2,2; t = 36s
- Set 2,3; t = 45s
- Set 2,4; t = 54s
- Set 2,5; t = 63s
- **Set 2,6; t = 72s**
- Set 2,7; t = 81s
- Set 2,8; t = 90s

```
! print conductor results
NSEL,S,LOC,Z,-0.001,+0.001
*DO,ii,1,Nplot
  NSEL,A,LOC,Z,ii*Lstep-0.001,ii*Lstep+0.001
*ENDDO
Rcond=Ri+(Re-Ri)/2 ! average radius of the conductor
! consistent with even (divisible by two) number
! of total divisions along the conductor thickness
NSEL,R,LOC,X,Rcond-0.0001,Rcond+0.0001
NSEL,R,LOC,Y,-0.0001,0.0001
PRNSOL,TEMP
ALLSEL
```



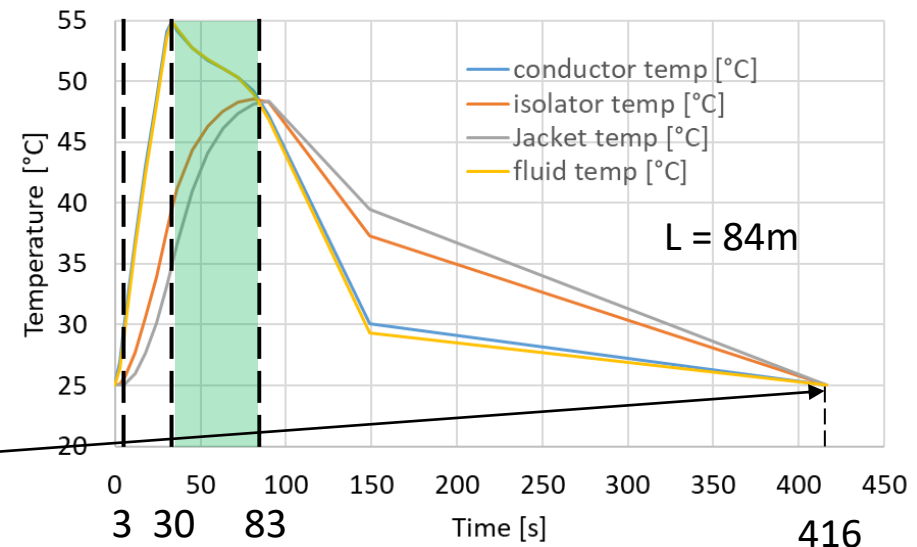


Il fluido percorre il conduttore interamente in $t \approx 27$ s

Quasi equilibrio termico tra generazione interna di calore al conduttore per effetto Joule e lo scambio convettivo al fluido

Riscaldamento dell'isolante e della corzza dopo lo spegnimento corrente con raggiungimento $T_{max} = 49^\circ\text{C}$ @ $t = 83$ s

Verifica della capacità di tornare alle condizioni termiche iniziali (temperatura uniforme del conduttore di 25°C): 416 s



Risultati del modello parametrico che potrà in futuro essere modificato in modo da ampliare lo studio ad altre bobine e materiali:

- Pressione dell'acqua all'ingresso: 15.2 bar $\rightarrow \Delta p_{\text{pompa}} \approx 16$ bar, ritenuta compatibile con un circuito di pompaggio
 - Confronto con temperature massime ammissibili:
 - Controllo di plasma (30 s su 90 s di plasma operation):
 - Conduttore (rame): $54 \leq 220 \text{ }^\circ\text{C} = T_{\text{max Cu}}$
(su limite snervamento)
 - Isolante (FEP): $49 \leq 200 \text{ }^\circ\text{C} = T_{\text{max FEP}}$
 - Armatura (SS): $49 \leq 500 \text{ }^\circ\text{C} = T_{\text{max SS}}$
 - Acqua: $54 \leq 110 \text{ }^\circ\text{C} = T_{\text{max H}_2\text{O}}$ (temp. di saturazione a 1.5 bar)
 - Baking (con azoto invece di acqua):
 - Temperatura uniforme di $200 \text{ }^\circ\text{C}$ (eq. termico). Viene controllata e quindi ritenuta compatibile con $T_{\text{max FEP}}$
- Riduzione portata d'acqua \rightarrow riduzione Δp_{pompa}
 Cambio materiale conduttore (alluminio)*

Conclusioni:

- I materiali raggiungono temperature massime con grandi margini rispetto alle temperature ammissibili e quindi viene dimostrata la possibilità di utilizzarli per costruire le bobine ICN top \rightarrow
 \rightarrow soluzione per la specifica tecnica di fornitura: FEP per l'isolamento tra conduttore e corazza
- Analoghe verifiche dovranno essere eseguite per le altre bobine in-vessel al fine di uniformare il tipo di cavo in DTT
- Nonostante i materiali siano stati identificati, si può analizzare il comportamento dell'alluminio al fine di ridurre la corrosione con la vena fluida