

Termofluidodinamica computazionale applicata allo studio di magneti superconduttori per la fusione nucleare

L.Savoldi e R.Zanino

Dipartimento di Energetica, Politecnico di Torino

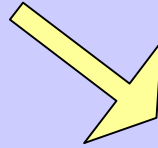
Laura SAVOLDI



- Nata nel 1974
- Laurea in ing. nucleare (polito) nel 1997
- Dottorato in energetica (polito) nel 2001
- Soggiorni presso FZ (D) e JAERI (J)
- Attualmente assegnista di ricerca presso Dipartimento di Energetica, polito
- Co-autrice di circa 20 lavori su riviste internazionali e/o presentati a conferenze internazionali

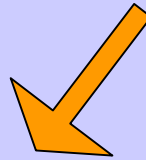
SOMMARIO

- Introduzione e motivazioni



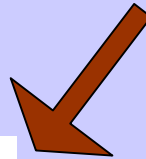
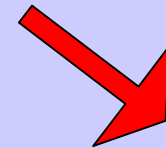
- Proprieta' termofisiche dei materiali in condizioni criogeniche

- Descrizione dei modelli

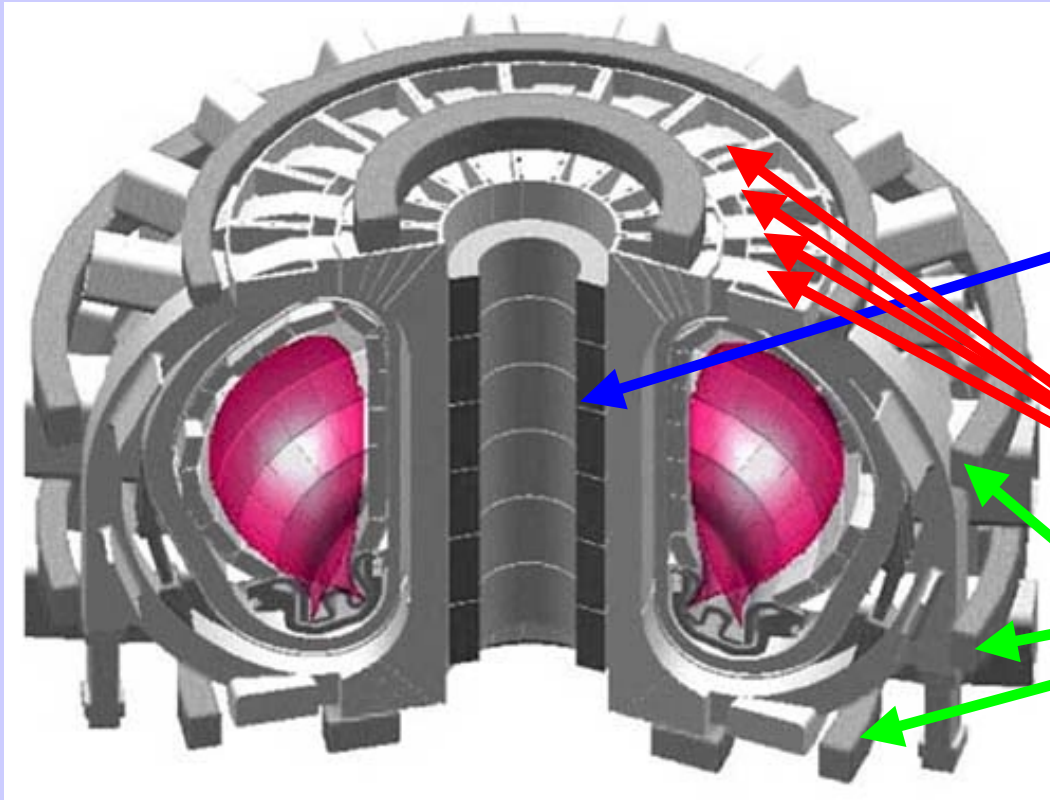


- Validazione e applicazione dei modelli

- Qualche problema aperto



INTRODUZIONE (I)



Sistema magneti per il confinamento del plasma in un tokamak:

Solenoido centrale (CS)

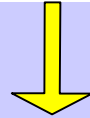
Magneti del campo toroidale (TF)

Magneti del campo poloidale (PF)

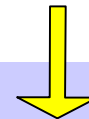
International Thermonuclear Experimental Reactor

INTRODUZIONE (II)

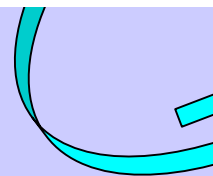
I magneti SC per applicazioni fusionistiche (e.g., ITER) portano alte correnti ($\sim 40\text{-}80\text{ kA}$) per generare alti campi magnetici ($\sim 5\text{-}12\text{ T}$)



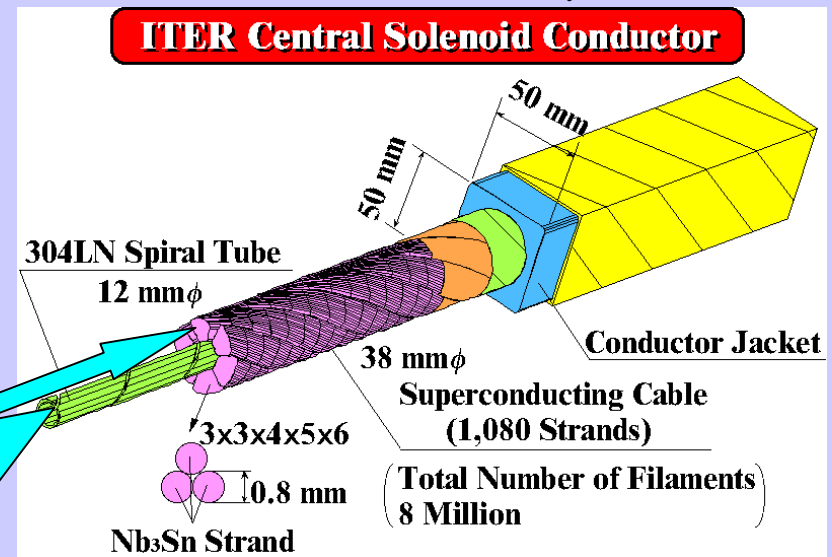
Utilizzo di SC a bassa temperatura critica (e.g., Nb_3Sn o NbTi) in conduttori tipo **cable-in-conduit** (CICC)



La termofluidodinamica dei CICC e' un problema centrale nel progetto e nell'operazione di magneti SC



He supercritico



INTRODUZIONE (III)

- I **magneti** sono costruiti avvolgendo **singoli conduttori** secondo opportune topologie (e.g., layer-wound vs. pancake-wound, one-in-hand vs. two-in-hand, etc.) e collegandoli elettricamente agli estremi con dei **giunti**
- In un magnete i singoli conduttori sono
 - In **serie elettrica**
 - In **parallelo idraulico**

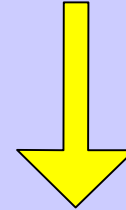
PROGRAMMI INTERNAZIONALI DI R&D

1 fase dei test: **singoli conduttori sub-size** (QUELL, @ PSI Villigen, CH 1996)

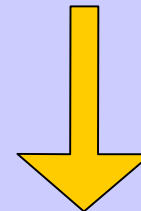
2 fase dei test: **giunti** (USP, @ MIT, USA 1998; FSJS, @ PSI Villigen, CH, 1999)

3 fase dei test: **magneti, e.g., ITER model coil** (CSMC @ JAERI Naka, J, 2000; TFMC @ FZ Karlsruhe, D, 2001-2002) e **singoli conduttori full-size = insert coil** (CSIC, 2000; TFCI, 2001; Nb3Al, 2002; PFCI, 2003)

Modello per singolo conduttore



Necessita' di una corrispondente evoluzione degli strumenti per l'analisi termoidraulica

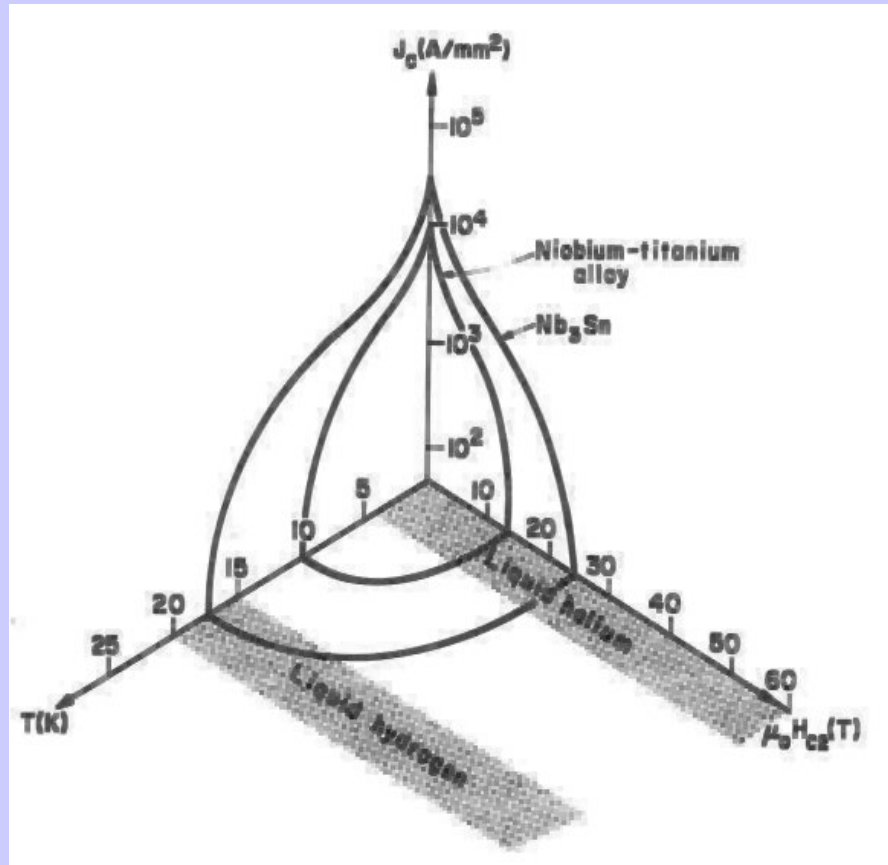


Modello multi-conduttore

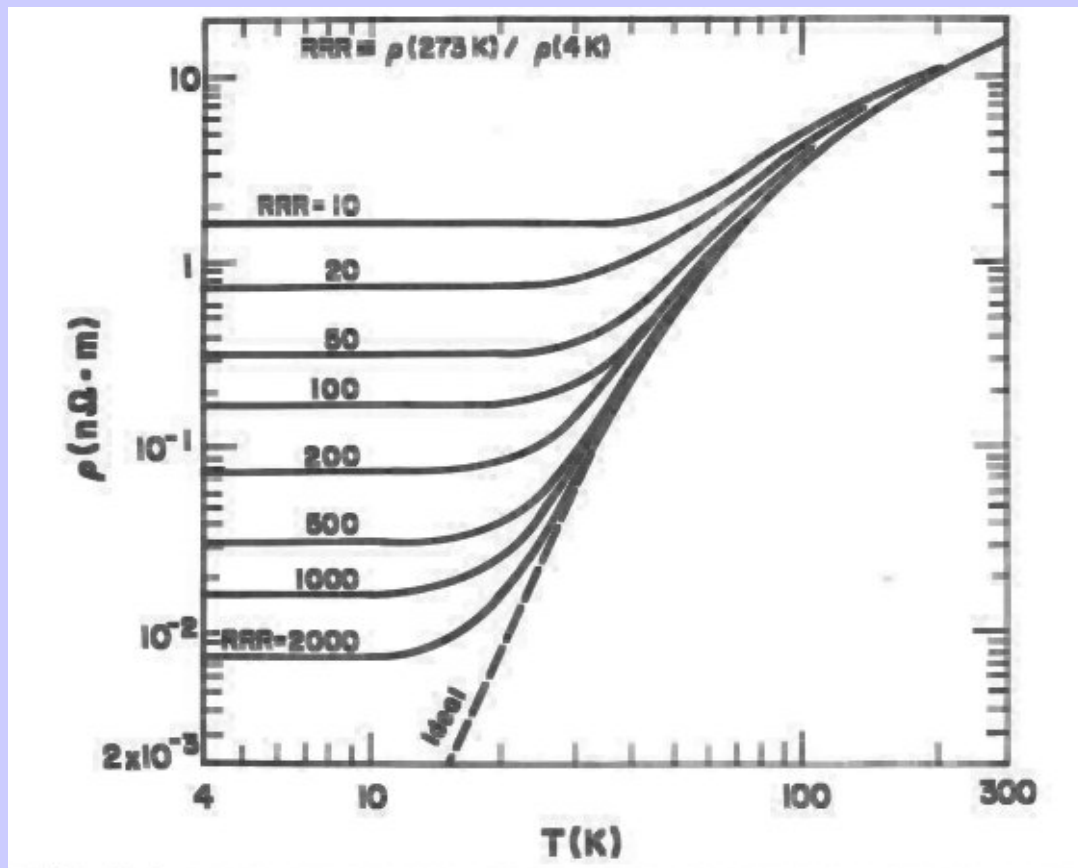
PROPRIETA' TERMOFISICHE DEI MATERIALI IN CONDIZIONI CRIOGENICHE

- Solidi
 - Superconduttori (ad es., Nb₃Sn, NbTi)
 - Conduttori (Cu)
 - Strutturali (SS, Incoloy, Ti)
- Fluidi
 - He
 - (N₂)
- **L'aspetto cruciale e' la forte dipendenza dalla temperatura !**

Condizioni per la superconduttività



Resistività elettrica del rame



Calore specifico dei solidi

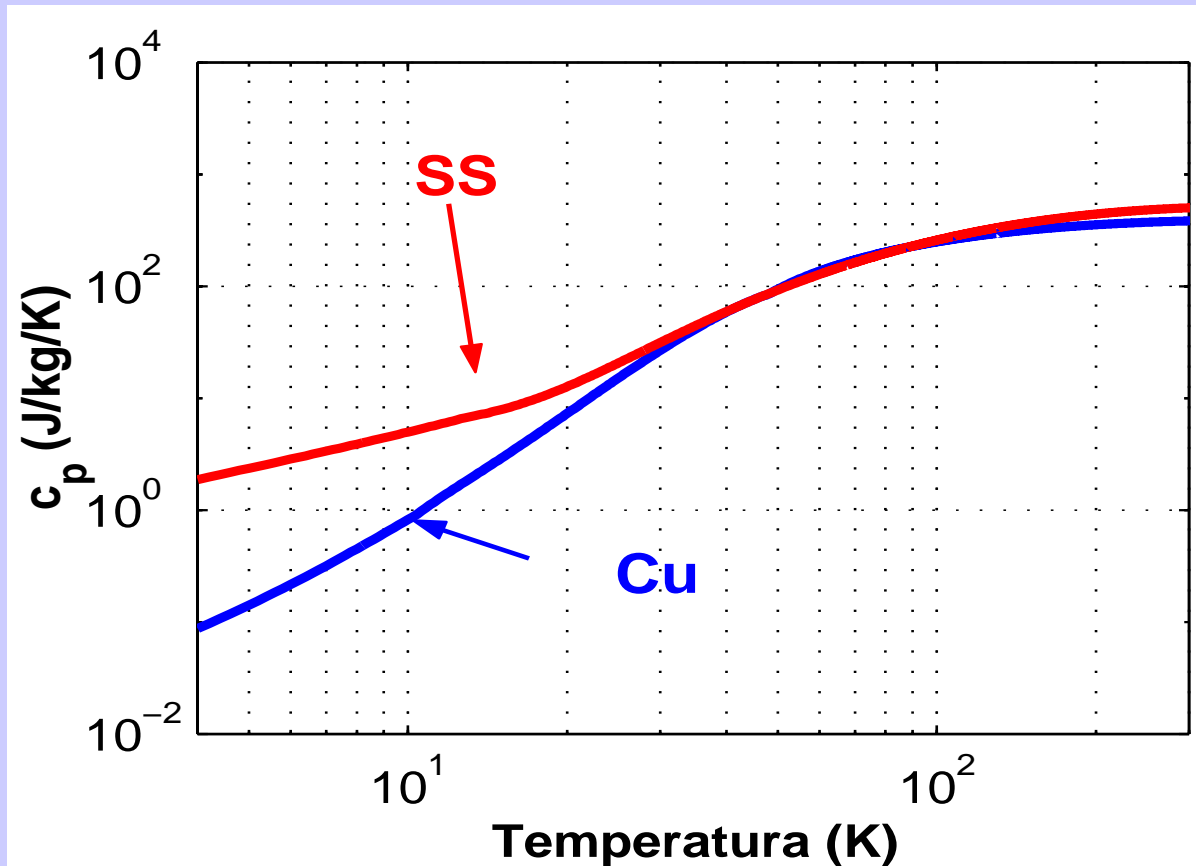
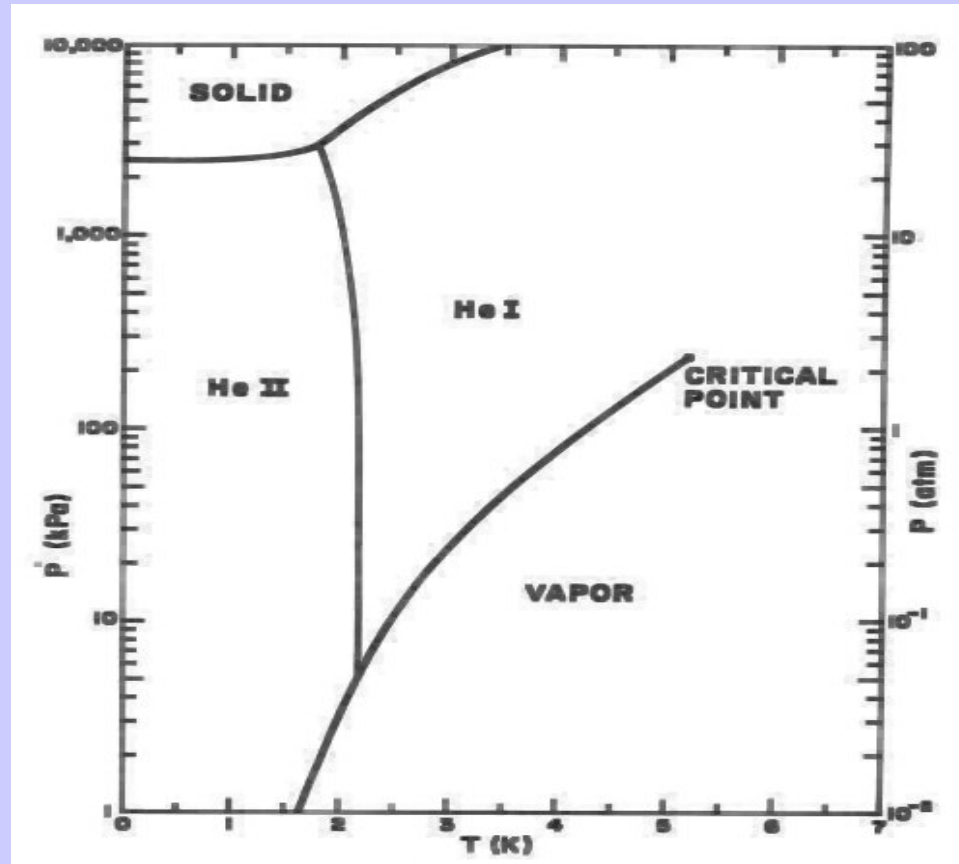
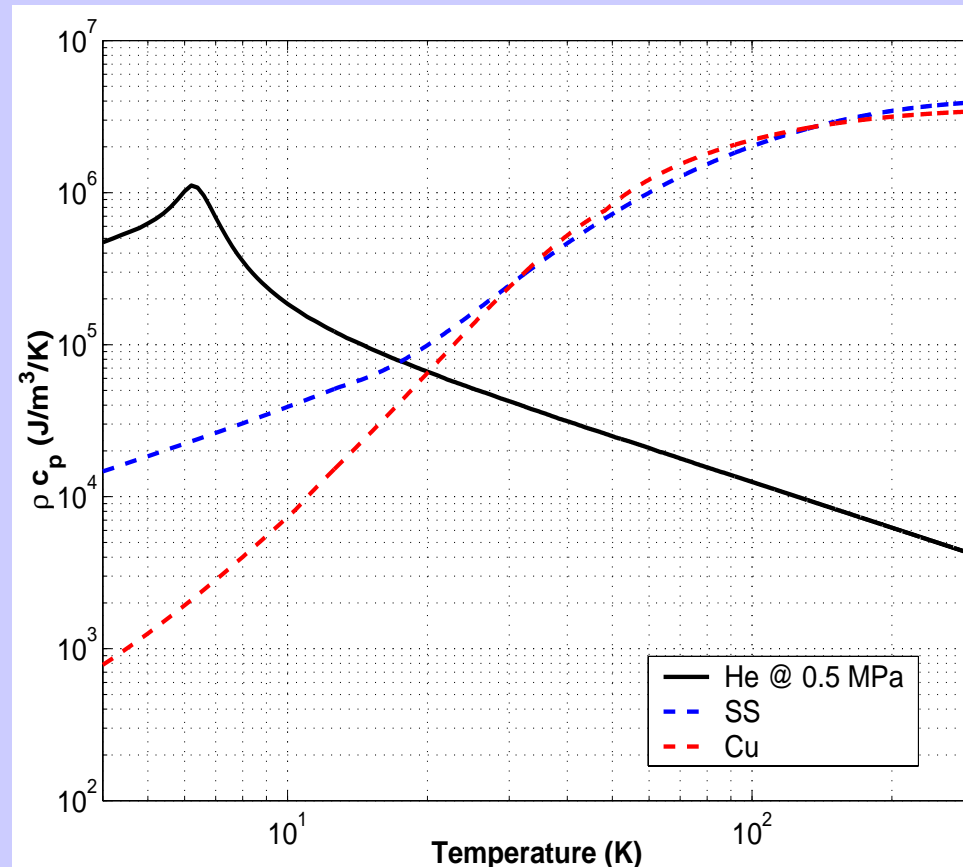


Diagramma di stato dell'elio

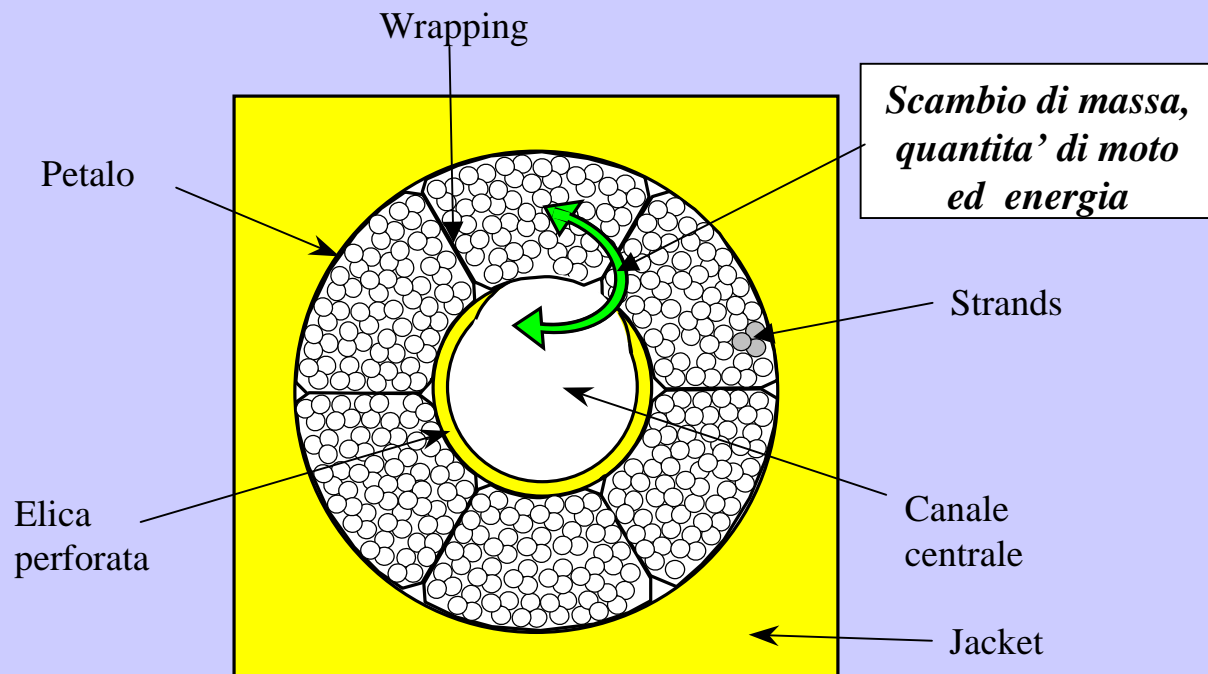
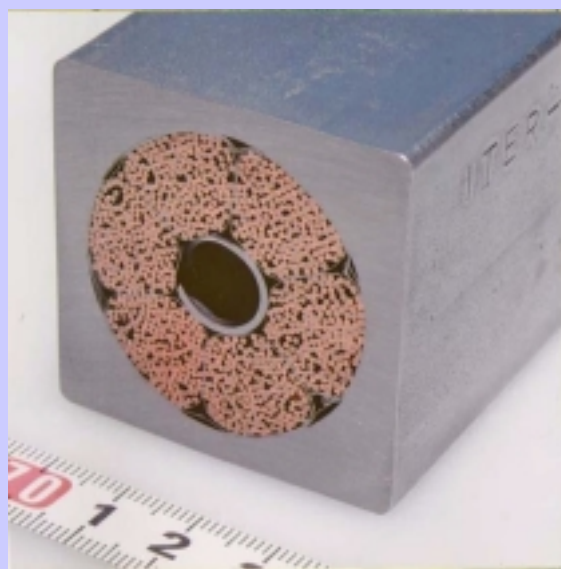


Confronto fra capacita' termiche solidi vs. elio



MODELLO 1D PER SINGOLO CONDUTTORE (I)

- Lunghezza $O(10-10^2 \text{ m}) \gg$ Diametro $O(10^{-1}-10^{-2} \text{ m}) \rightarrow$ **Modello 1D!**
- Due regioni con He in condizioni termodinamiche diverse
- Due solidi:
 - Strand conduttori (Cu + SC)
 - Jacket strutturale (SS, Incoloy, Ti, ...) + Isolante (GE, Kapton, ...)



Sezione di un CICC per magneti di ITER

MODELLO 1D PER SINGOLO CONDUTTORE (II)

Equazioni nel codice Mithrandir

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{1}{\rho} [\Lambda_v - v \Lambda_\rho] \\ \frac{\partial p}{\partial t} + \rho c^2 \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial p}{\partial x} + \rho c^2 \frac{v}{A} \frac{\partial A}{\partial x} = \phi \left[\Lambda_e - v \Lambda_v - \left(w - \frac{v^2}{2} - \frac{c^2}{\phi} \right) \Lambda_\rho \right] \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \phi T \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial x} + \phi T \frac{v}{A} \frac{\partial A}{\partial x} = \frac{1}{\rho c_v} \left[\Lambda_e - v \Lambda_v - \left(w - \frac{v^2}{2} - \phi c_v T \right) \Lambda_\rho \right] \end{array} \right.$$

Separatamente per l'He nel
Bundle e l'He nell'Hole

+

*Equazioni di conduzione del calore in transitorio
per strand e jacket separatamente ($T_{st} \neq T_{jk}$).*

+

*Accoppiamento con il codice Flower (v. oltre),
che modella il circuito idraulico esterno*

MODELLO 1D PER SINGOLO CONDUTTORE (III)

Caratteristiche del codice Mithrandir

- **Elementi per la scelta delle variabili dipendenti per l'He:**
 - Conservative vs. primitive
 - Variazione dei coefficienti vicino alla pseudo-critica
 - Trattazione dei driver in implicito (stiffness)

 - Comprimibilità vs. incomprimibilità
- **Elementi finiti lineari in spazio + upwind →** stabilità per termini dominati dalla convezione
- **Adattività della mesh →** Risoluzione spaziale dei fronti di quench
- Schema (adattivo) implicito in tempo (“ θ -method”)
- Linearizzazione con coefficienti congelati

MODELLO 1D PER SINGOLO CONDUTTORE (IV)

Estensione all'elio superfluido -- He II

- L'He II e' caratterizzato (e per questo interessante) da **viscosita' trascurabile** ma elevatissima conducibilita'
- Modelli euristici (London, Landau) del tipo **two-fluid** (= fase superfluida e fase normale) descrivono adeguatamente la fenomenologia di questi sistemi
- Nel caso nostro si puo' dimostrare che e' sufficiente l'aggiunta di un termine alla sorgente di energia nelle equazioni precedenti. Il termine e' legato al **flusso termico di** conduzione cosiddetto di **Gorter-Mellink** (dovuto all'attrito tra la fase supefluida e la fase normale)

$$q_{GM} = - [f(p,T) * (\partial T / \partial x)]^{1/3}$$

MODELLO PER IL CIRCUITO CRIOGENICO

(codice Flower)

- E' essenziale per una **simulazione autoconsistente**:
 - In studi *predittivi* e/o di progetto e' necessario simulare l'intero circuito, mentre
 - In studi *interpretativi* le condizioni al contorno agli estremi di un conduttore possono venire da misure
- **Il circuito si suppone costituito da un insieme di componenti standard** (0D, quali manifolds, pompe, valvole, tubi incomprimibili, ..., oppure 1D, quali tubi comprimibili)
- **Ognuno dei componenti e' descritto dai corrispondenti bilanci di massa ed energia.** Ad es., l'evoluzione della pressione e della temperatura in un manifold e' data da:

$$\begin{cases} V \frac{dp}{dt} + \sum \dot{m}_i \left[c^2 + \phi \left(w_i + \frac{v^2}{2} - w \right) \right] = \phi \dot{q} \\ V \rho c_v \frac{dT}{dt} + \sum \dot{m}_i \left[\phi c_v T + w_i + \frac{v^2}{2} - w \right] = \dot{q} \end{cases}$$

MODELLO QUASI-3D MULTI-CONDUTTORE

(Multi-conductor Mithrandir = codice M&M)

La separazione delle scale di tempo in direzione longitudinale e trasversale permette di risolvere il problema 3D come tanti problemi 1D accoppiati.

Per ogni conduttore viene utilizzato il modello di Mithrandir

L' accoppiamento trasversale tra conduttori adiacenti viene calcolato in esplicito

L' accoppiamento longitudinale tra conduttori idraulicamente in serie o parallelo e' descritto con il codice Flower

Questa strategia permette di simulare topologie di magneti molto generali!

SINTESI DEI RISULTATI

Il singolo conduttore

- *Validazione di MI THRANDIR su dati di propagazione di quench e heat slug in QUELL (test @ Villigen PSI, CH, 1996)*
- *Validazione di MI THRANDIR per Hel I (esperimenti di Srinivasan&Hoffmann)*

Dal singolo conduttore ai magneti → Giunti

- *Validazione di M&M per l'analisi di transitori termoidraulici nei giunti (test dei Full Size Joint Samples @ Villigen PSI, CH, 1998, 1999)*

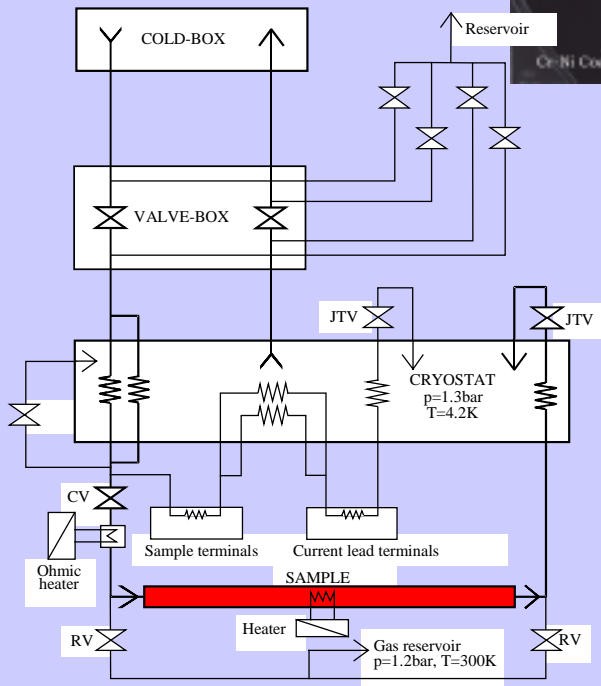
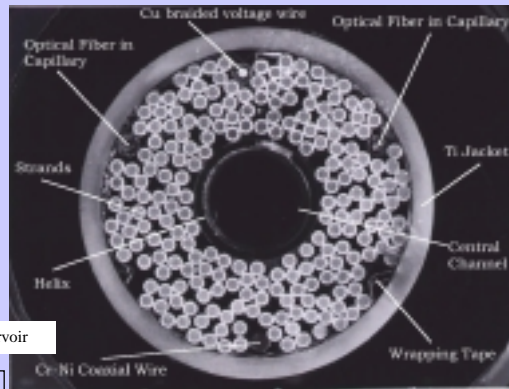
Magnet: Central Solenoid Model Coil (CSMC) e Toroidal Field Model Coil (TFMC)

- *Analisi interpretativa del CSMC e del CSIC (test @ JAERI Naka, J, 2000)*
- *Analisi predittiva del TFMC (test @ FZ Karlsruhe, D, 2001)*

SINGOLO CONDUTTORE SUB-SIZE (I)

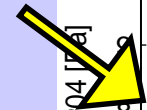
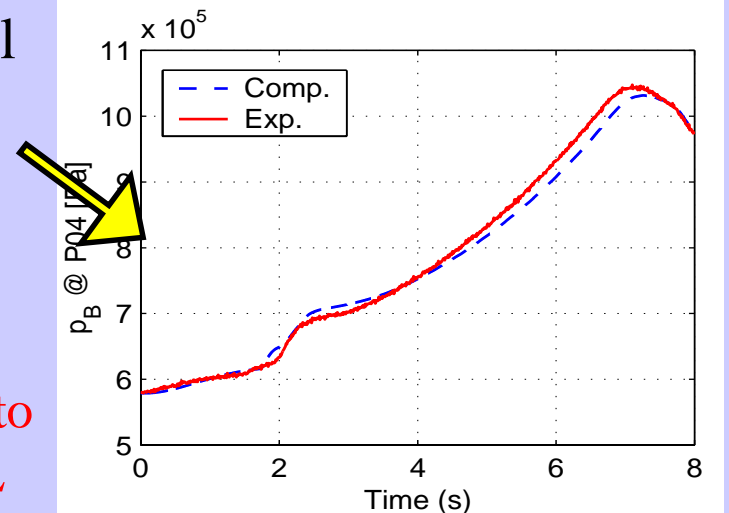
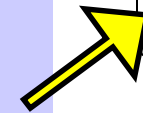
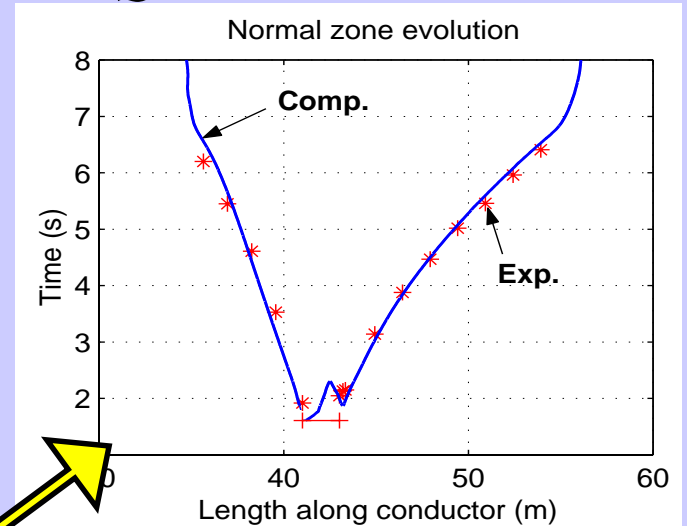
PROPAGAZIONE DEL QUENCH IN QUELL

Conduttore di
QUELL



Propagazione del
quench

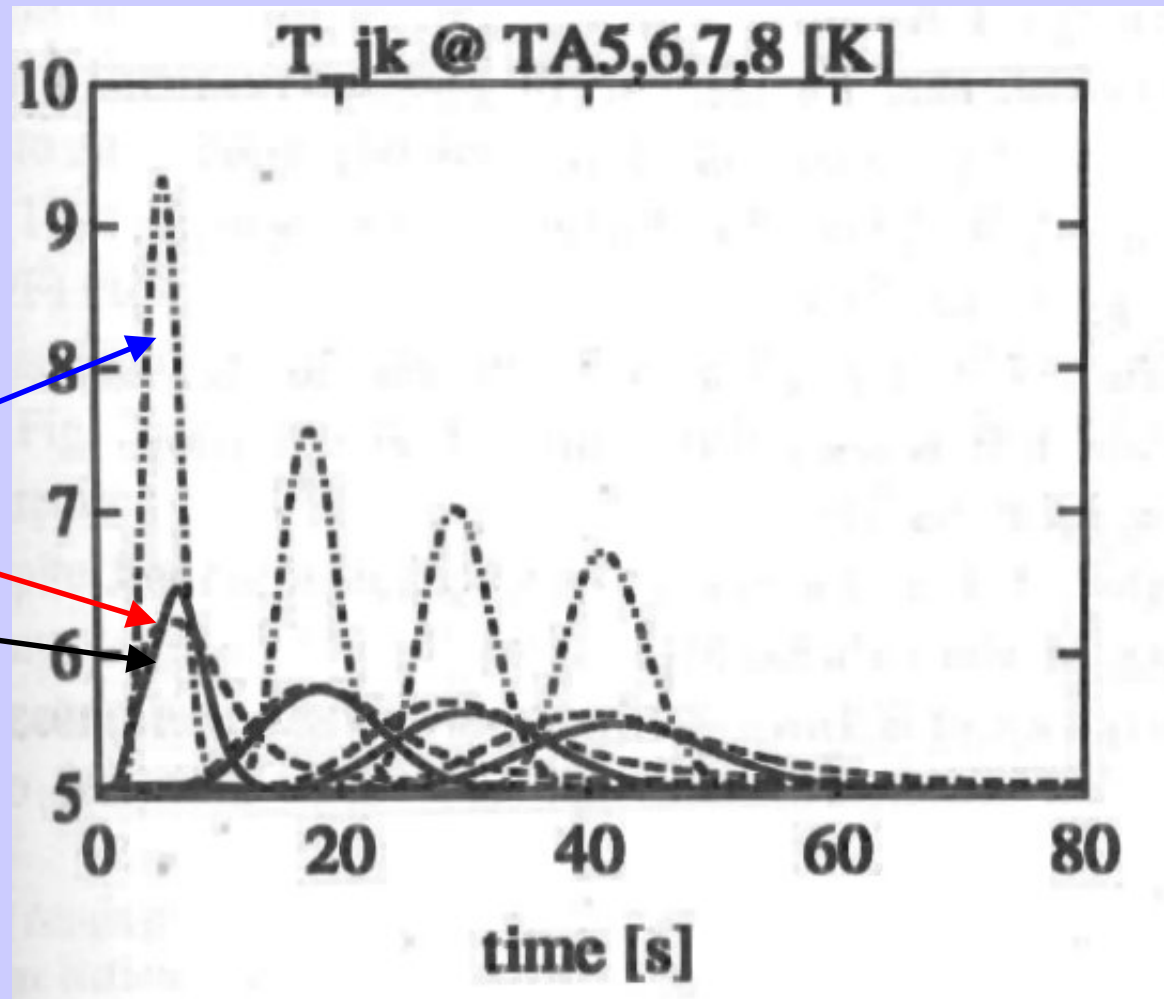
Schema del circuito
di test del QUELL



SINGOLO CONDUTTORE SUB-SIZE (II)

PROPAGAZIONE DI HEAT SLUG IN QUELL

(“Taylor-Aris dispersion”)

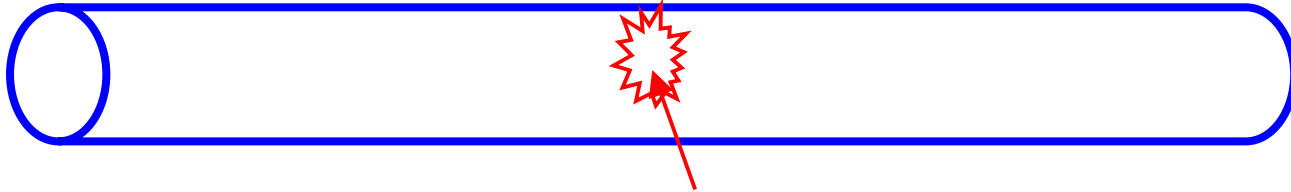


Confronto modelli
a 1-fluido ($T_H = T_B$)
e 2-fluidi ($T_H \neq T_B$)
con esperimento

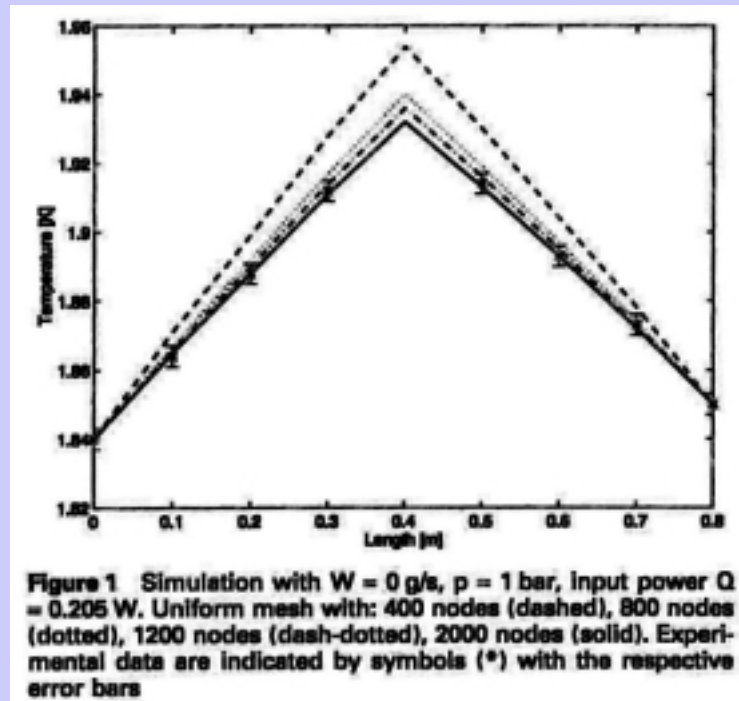
APPLICAZIONE ALL'ELIO SUPERFLUIDO (I)

(Esperimenti di Srinivasan e Hoffmann)

Tubo con HeII stagnante



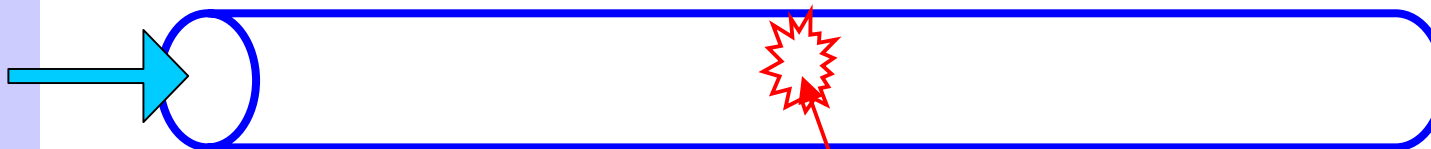
Riscaldamento al centro



APPLICAZIONE ALL'ELIO SUPERFLUIDO (II)

(Esperimenti di Srinivasan e Hoffmann)

Tubo con HeII in convezione forzata



Riscaldamento al centro

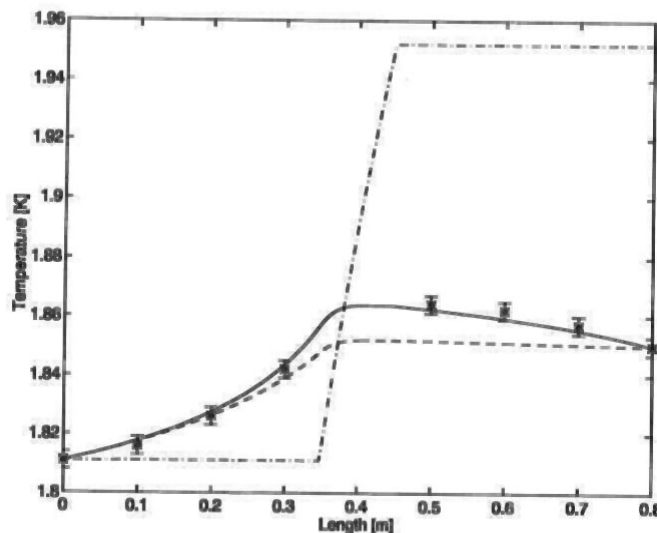
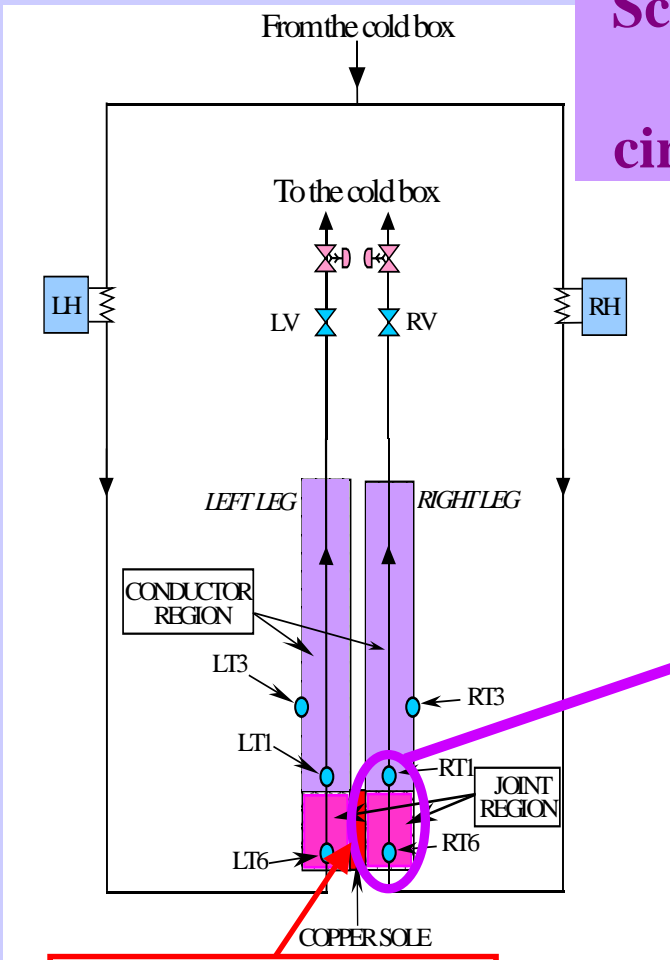


Figure 2 Simulation with $W = 0.319$ g/s, $p = 2.5$ bar, input power $Q = 0.169$ W. Exponent $m = 3$ in the G-M term (solid), exponent $m = 3.4$ in the G-M term (dashed), vanishing G-M term (dash-dotted). Experimental data are indicated by symbols (*) with the respective error bars

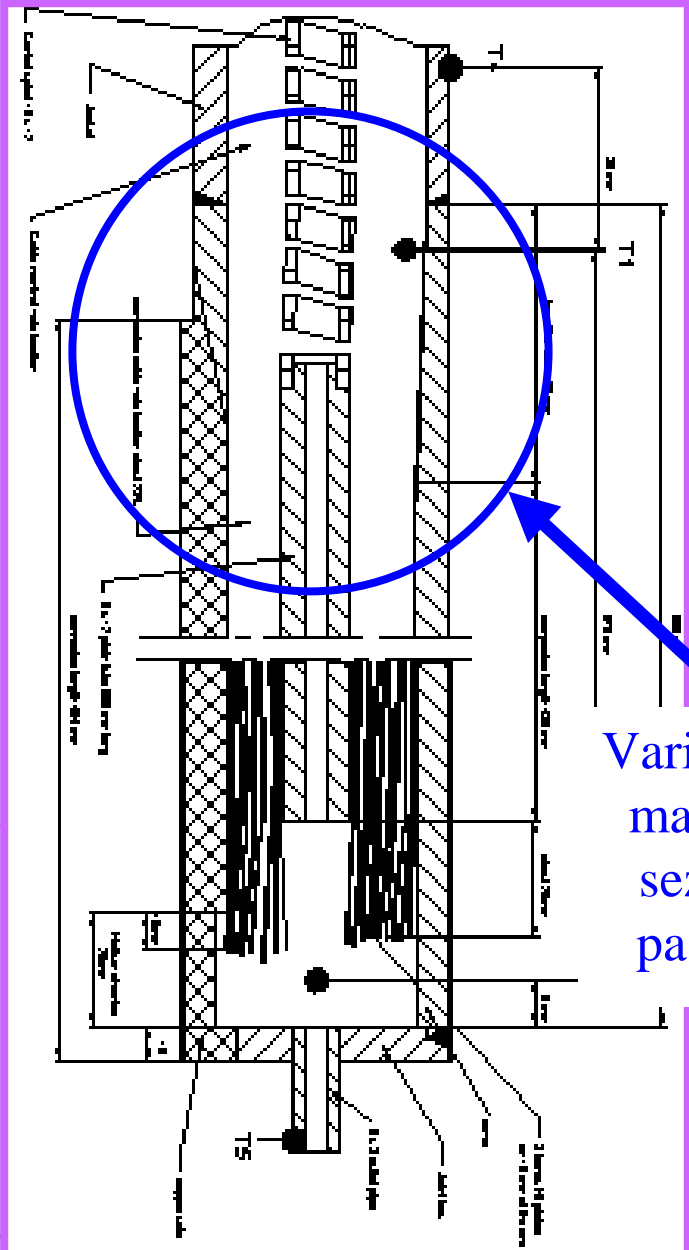
DAL SINGOLO CONDUTTORE AI MAGNETI: I GIUNTI

**SS Full Size Joint Sample
per il TFMC (CEA Cadarache)**

**Schema
del
circuito**



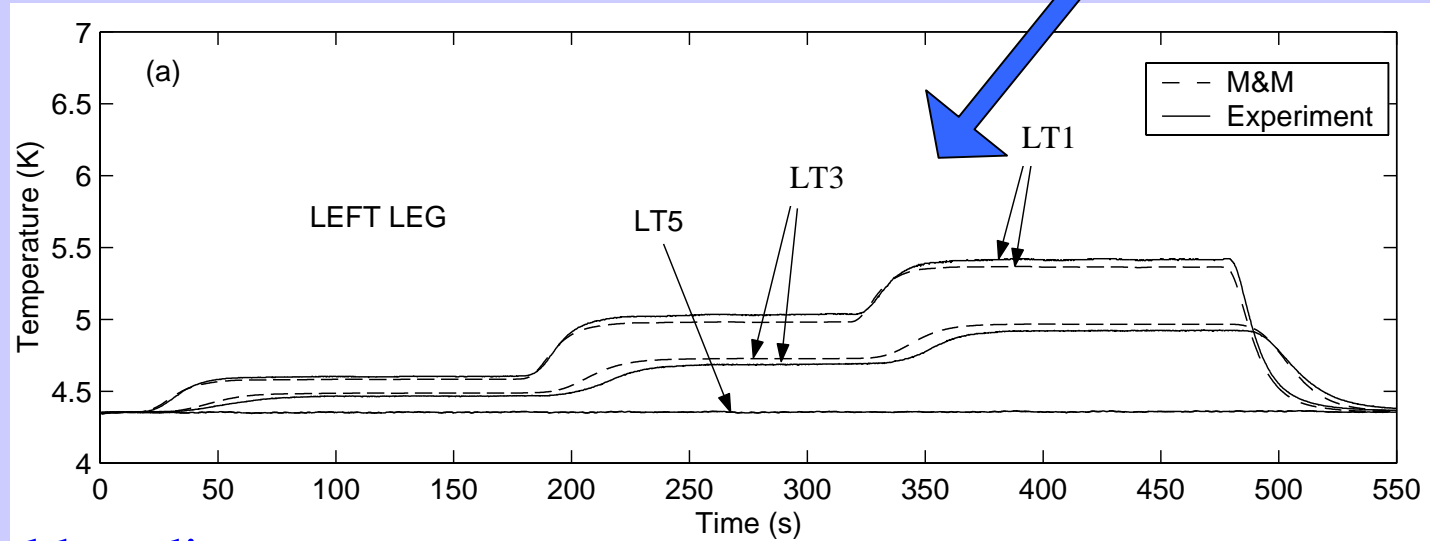
Scambio termico



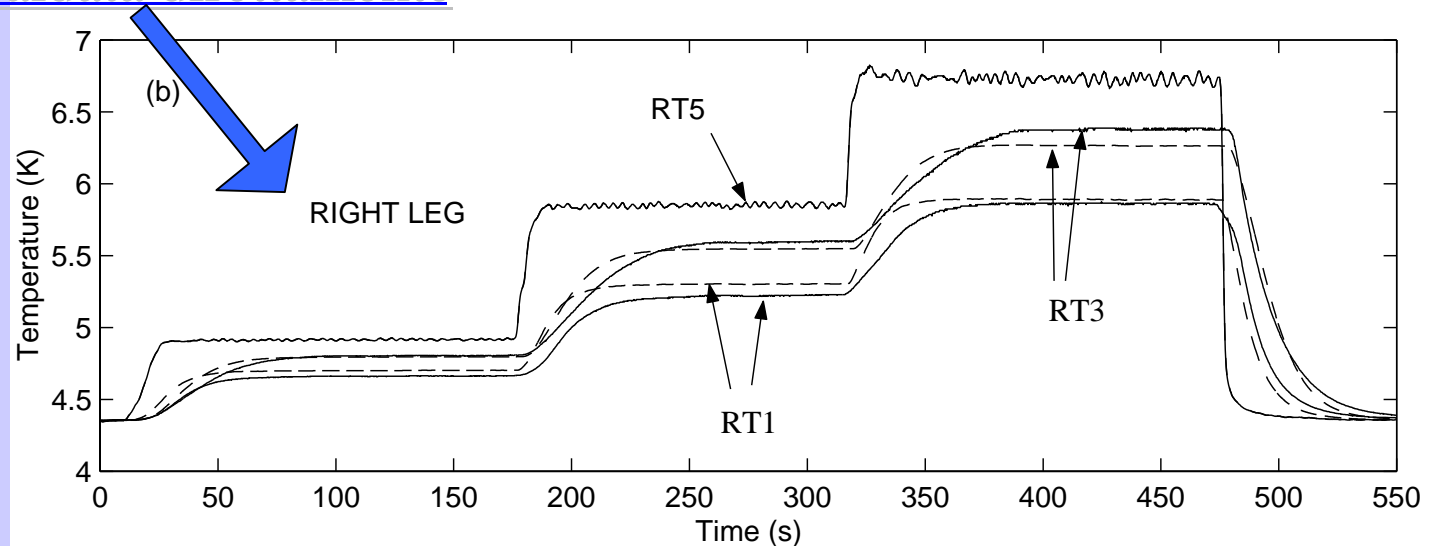
**Variazioni di
materiali e
sezioni di
passaggio**

Validazione di M&M su test termoidraulici del Full Size Joint Sample

Effetto dello scambio termico
nel giunto sulla gamba non
direttamente riscaldata

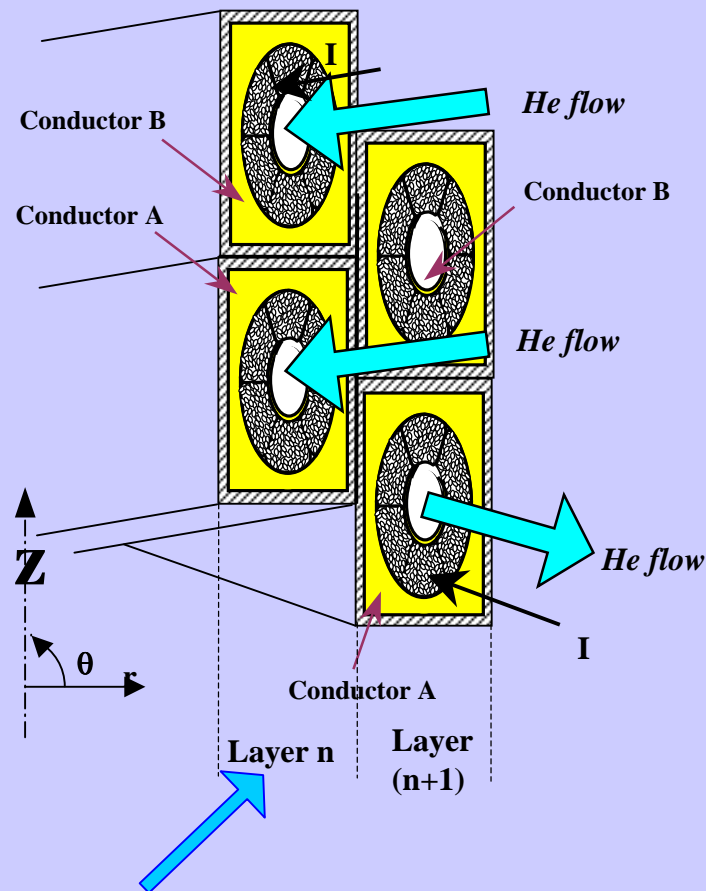
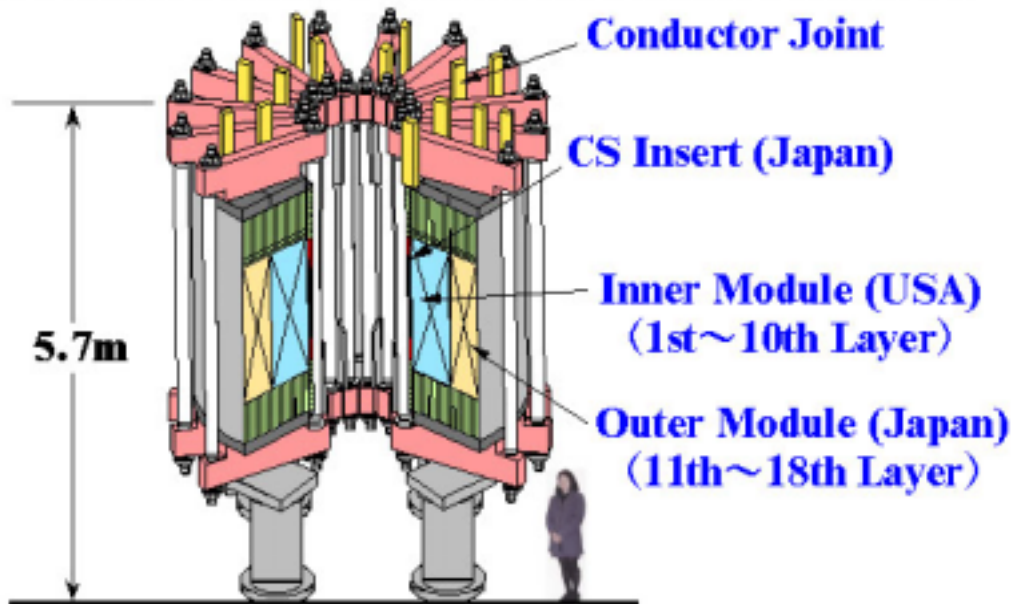


Gamba riscaldata direttamente



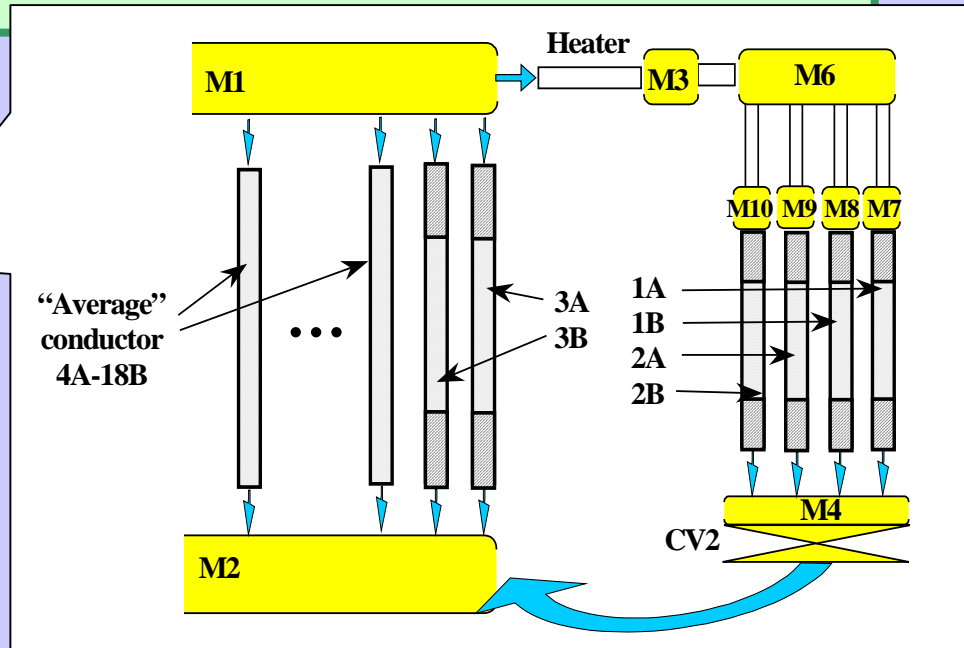
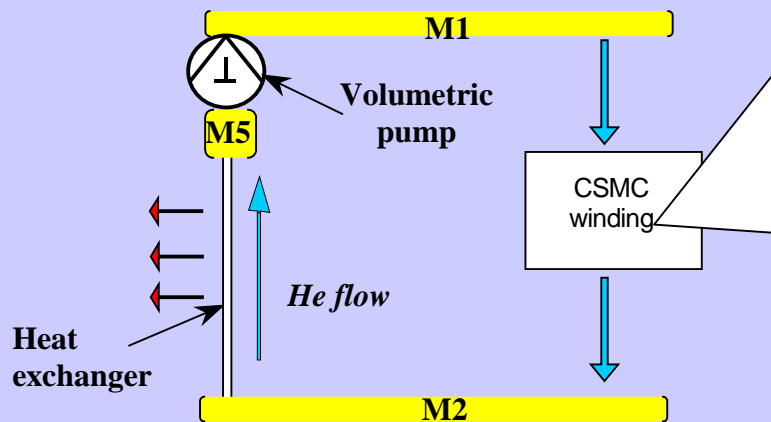
CENTRAL SOLENOID MODEL COIL (JAERI Naka)

Central Solenoid (CS) Model Coil

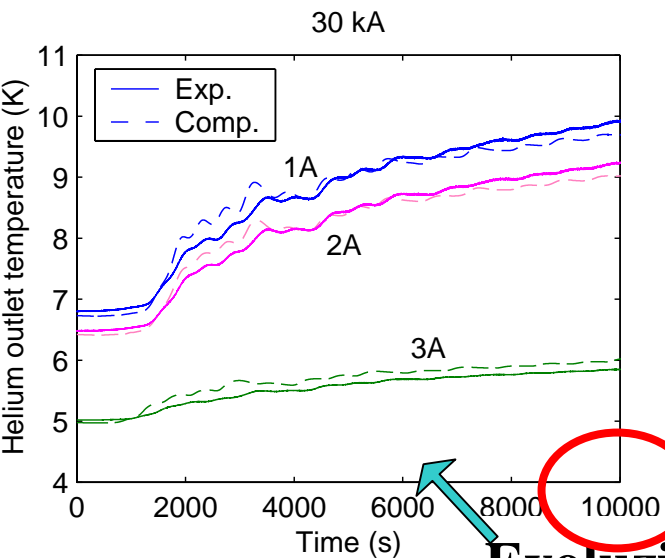


Topologia di due layer adiacenti

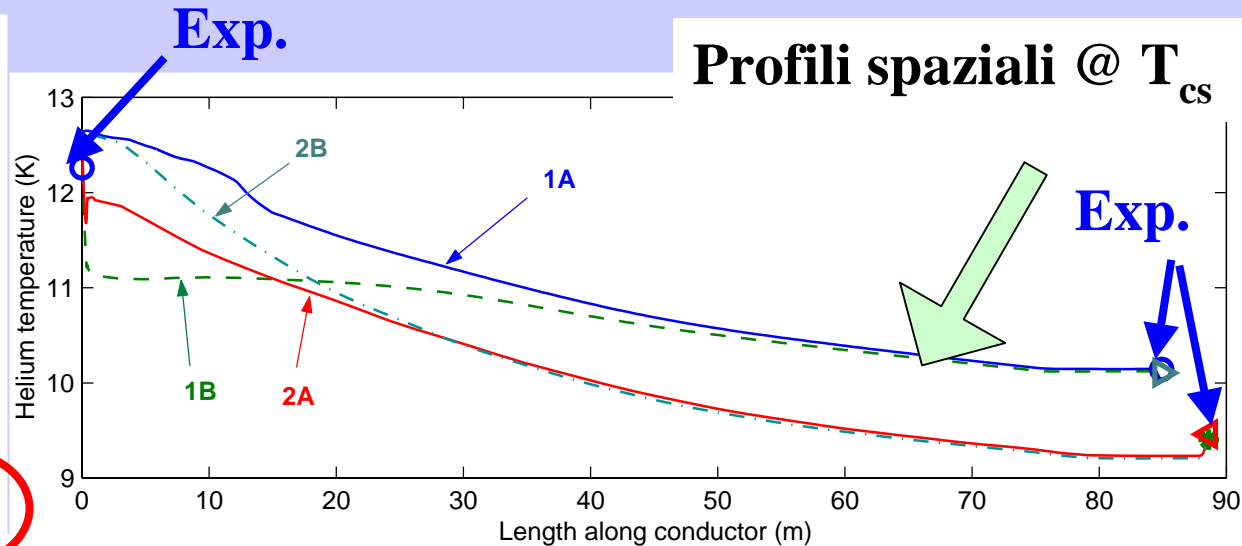
Modello del circuito usato nelle simulazioni con M&M



M&M vs. espe
(T_{cs} @ 30 kA)

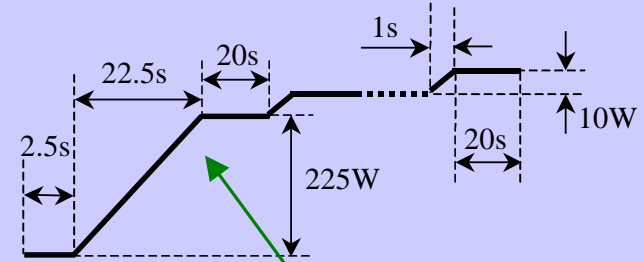
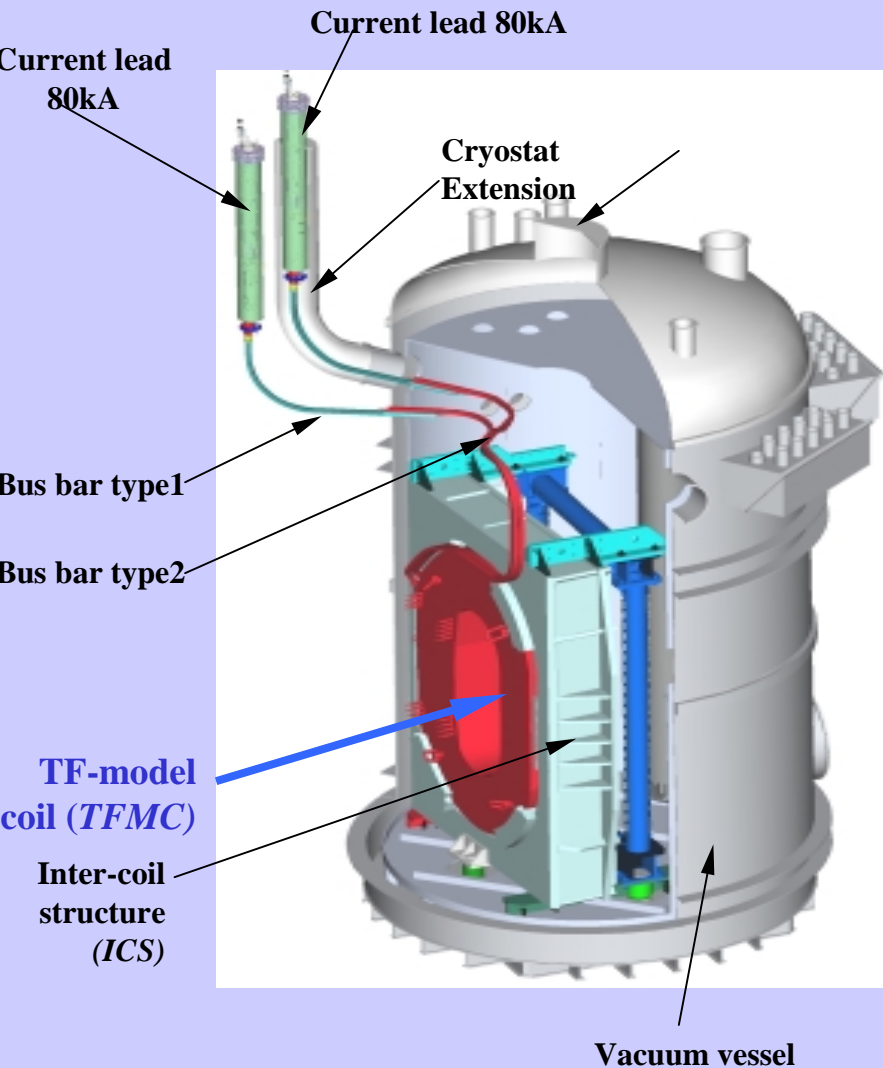


Evoluzione nel tempo

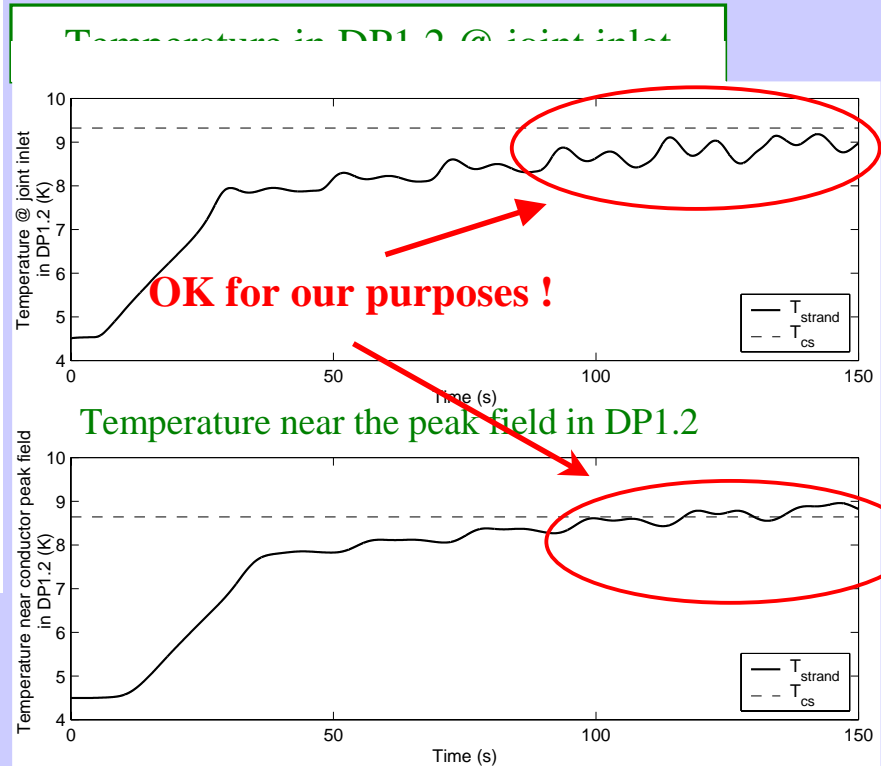


Scuola UIT, 2-8 Settembre 2001

TOROIDAL FIELD MODEL COIL (FZ, Karlsruhe)



Time shape of the power in both heaters



QUALCHE PROBLEMA APERTO

Molte incertezze sono presenti nei fattori d'attrito e, specialmente, nei coefficienti di scambio termico in un CICC



Un approccio teorico/computazionale/sperimentale piu' sistematico (ad es., tipo mezzo poroso) e' in corso di studio.

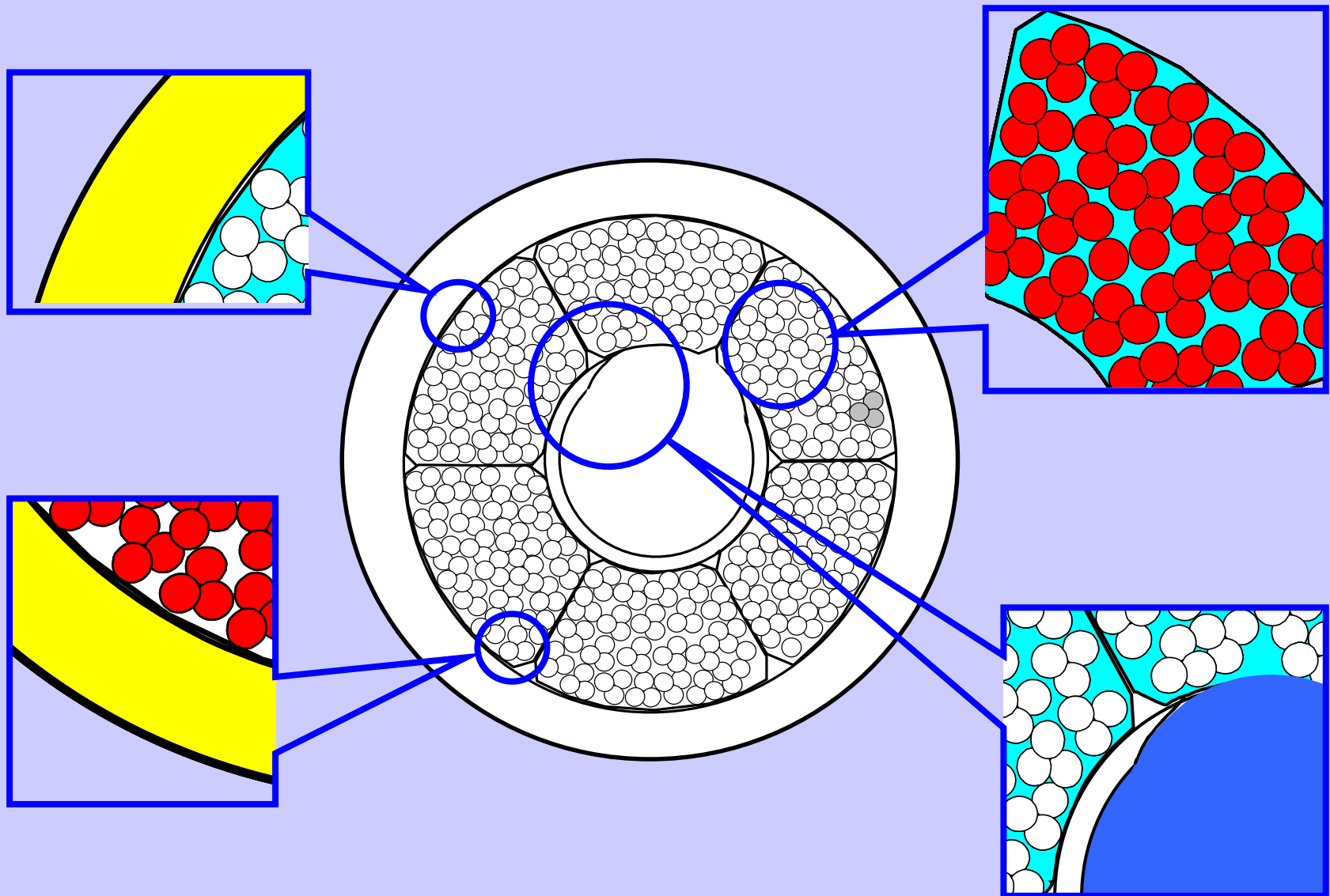
La distribuzione di corrente fra gli strand non e' necessariamente uniforme come ipotizzato in Mithrandir



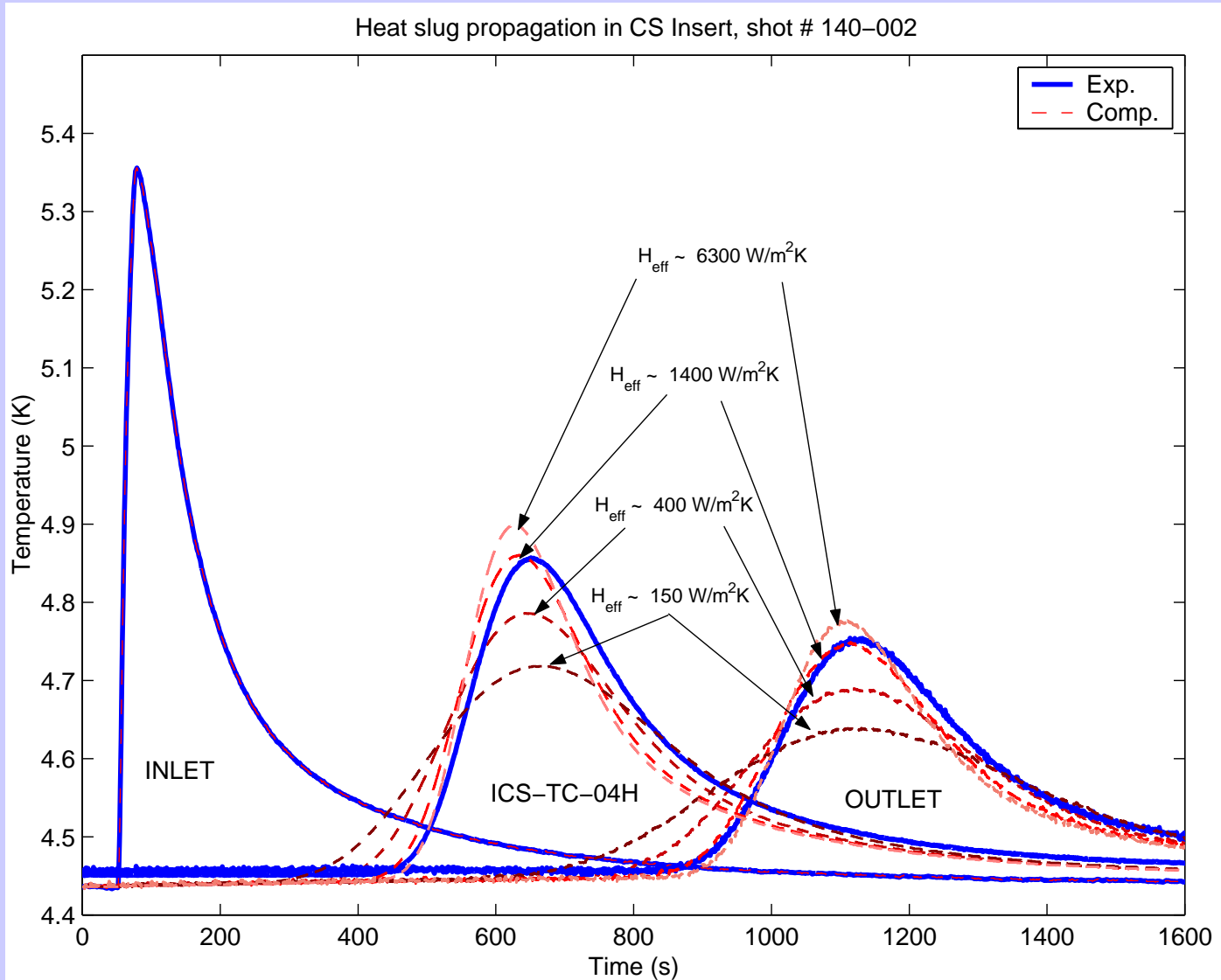
Un modello ibrido con accoppiamento termoidraulico-elettromagnetico sta venendo sviluppato (v. studio dei sottocanali)

Le stesse metodologie di analisi stanno venendo applicate a cavi SC ad alta temperatura critica per il trasporto di energia.

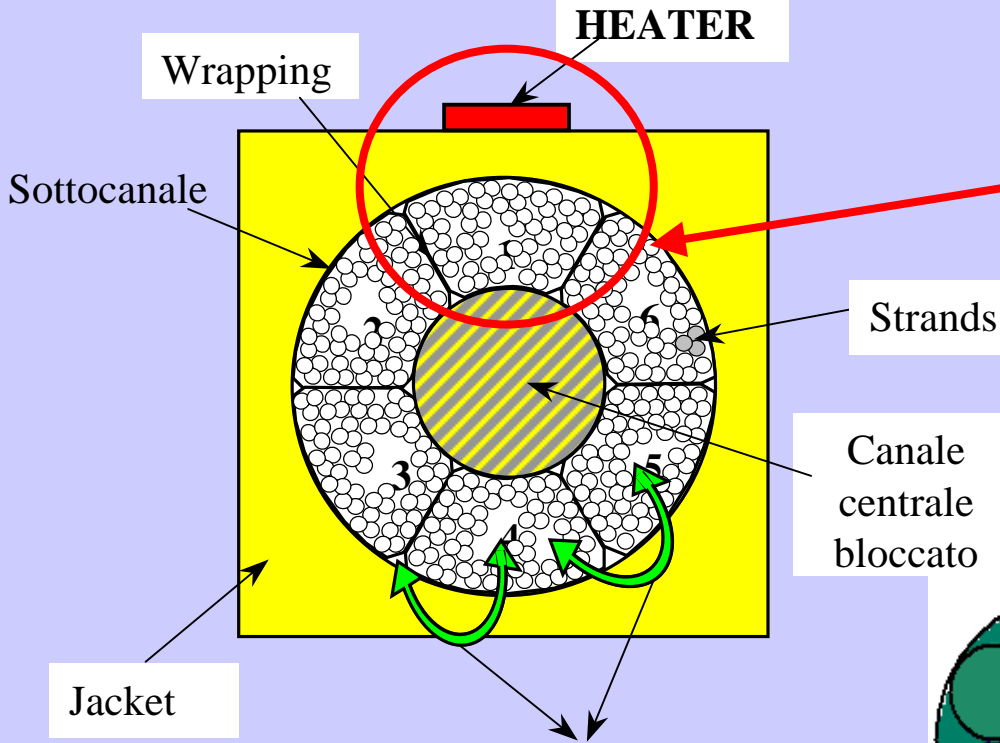
COEFFICIENTI DI SCAMBIO TERMICO (I)



COEFFICIENTI DI SCAMBIO TERMICO (II)



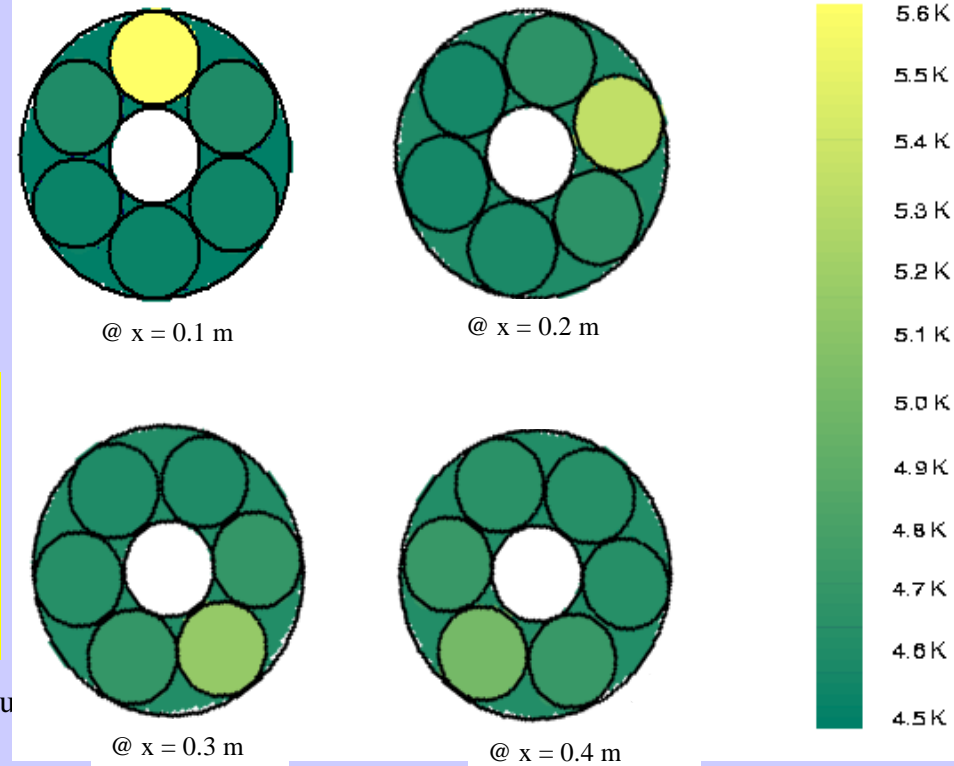
STUDIO MULTI-CONDUTTORE DEI SOTTOCANALI



Solo un sottocanale e' riscaldato "direttamente"!

Il risultato e' in accordo qualitativo con i dati sperimentali

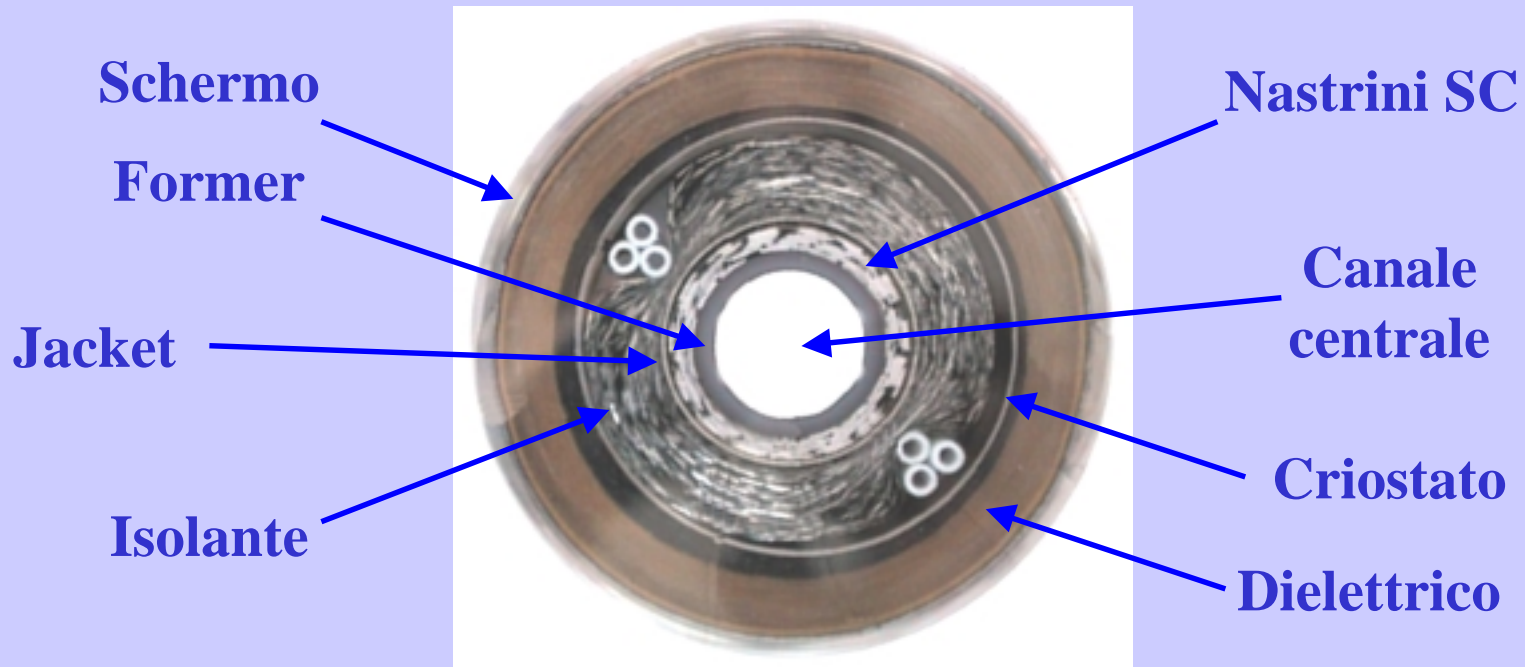
Scambio di massa, quantita' di moto ed energia



Analisi quasi 3-D
con M&M
(tratta ogni sottocanale come un conduttore)

CAVI SUPERCONDUTTORI AD ALTA T_c PER IL TRASPORTO DI ENERGIA

- Collaborazione con Pirelli Cavi&Sistemi
- Superconduttore BSSCO 2223 ($T_c \sim 107$ K) → Refrigerazione con azoto liquido. **In installazione alla power utility di Detroit, USA**



Sezione di un conduttore monofase del tipo warm-dielectric

Libri di testo di riferimento

- M.N. Wilson,
“Superconducting magnets”,
(UP, Oxford, 1983).
- S.W. Van Sciver,
“Helium Cryogenics”,
(Plenum, NY, 1986).

PUBBLICAZIONI DEGLI AUTORI

- [J11] R.Zanino, S.DePalo and L.Bottura,
"A Two-Fluid Code for the Thermohydraulic Transient Analysis of CICC Superconducting Magnets",
J. Fus. Energy **14** (1995) 25-40.
- [J12] S.DePalo, L.Bottura and R.Zanino,
"Computer Analysis of the Thermohydraulic Measurements on CEA Dummy Cables Performed at CEN-Grenoble",
J. Fus. Energy **14** (1995) 49-58.
- [J17] R.Zanino, L.Bottura and C.Marinucci,
"A Comparison between 1- and 2-Fluid Simulations of the QUELL Conductor",
IEEE Trans. Appl. Supercond. **7** (1997) 493-496.
- [J19] S.DePalo, C.Marinucci and R.Zanino,
"Stability Estimate for CICC with Cooling Channel Using One- and Two-Fluid Codes",
Adv. Cryo. Eng. **43** (1998) 333-339.
- [J20] R.Zanino, L.Bottura and C.Marinucci,
"Computer Simulation of Quench Propagation in QUELL",
Adv. Cryo. Eng. **43** (1998) 181-188.
- [J21] R.Zanino, L.Bottura, L.Savoldi and C.Rosso,
"Mithrandir+: a Two-Channel Model for Thermal-Hydraulic Analysis of Cable-in-Conduit Super-Conductors cooled with Helium I or II",
Cryogenics **38** (1998) 525-531.
- [J22] C.Marinucci, L.Bottura, G.Vecsey and R.Zanino,
"The QUELL Experiment as a Validation Tool for the Numerical Code Gandalf",
Cryogenics **38** (1998) 467-477.
- [J27] R.Zanino, L.Savoldi, F.Tessarini and L.Bottura,
"Effects of Bundle/Hole Coupling Parameters in the Two-Fluid Thermal-Hydraulic Analysis of Quench Propagation in Two-Channel Cable-In-Conduit Conductors",
IEEE Trans. Appl. Supercond. **9** (1999) 608-611.
- [J28] C.Marinucci, L.Savoldi and R.Zanino,
"Stability Analysis of the ITER TF and CS Conductors using the Code Gandalf",
IEEE Trans. Appl. Supercond. **9** (1999) 612-615.
- [J29] R.Zanino and C.Marinucci,
"Heat Slug Propagation in QUELL. Part I: Experimental Setup and 1-Fluid GANDALF Analysis",
Cryogenics **39** (1999) 585-593.

PUBBLICAZIONI (cntnd)

- [J30] R.Zanino and C.Marinucci,
"Heat Slug Propagation in QUELL. Part II: 2-Fluid MITHRANDIR Analysis",
Cryogenics **39** (1999) 595-608.
- [J31] L. Savoldi, L. Bottura and R. Zanino,
"Simulation of Thermal-Hydraulic Transients in Two-Channel CICC with Self-Consistent Boundary Conditions",
Adv. Cryo. Eng. **45** (2000) 697-704.
- [J32] R. Zanino, P. Santagati, L. Savoldi and C. Marinucci,
"Joint + conductor thermal-hydraulic experiment and analysis on the Full Size Joint Sample using MITHRANDIR 2.1",
IEEE Trans. Appl. Supercond. **10** (2000) 1110-1113.
- [J33] R. Zanino, P.Santagati, L. Savoldi, A.Martinez and S.Nicollet,
"Friction factor correlation with application to the central cooling channel of cable-in-conduit super-conductors for fusion magnets",
IEEE Trans. Appl. Supercond. **10** (2000) 1066-1069.
- [J34] L.Savoldi and R.Zanino,
"M&M: Multi-Conductor Mithrandir Code for the Simulation of Thermal-Hydraulic Transients in Superconducting Magnets",
Cryogenics **40** (2000) 179-189.
- [J36] L.Savoldi, P.Michael and R.Zanino,
"Tests and Simulation of Thermal-Hydraulic Transients in the US Prototype Joint Sample",
Int. J. Mod. Phys. B **14** (2000) 3183.
- [J37] L.Savoldi and R.Zanino,
"Analysis of Tcs Measurement in Conductor 1A of the ITER Central Solenoid Model Coil using the M&M Code",
Cryogenics **40** (2000) 593-604.
- [J38] L.Savoldi and R.Zanino,
"Predictive Study of Current Sharing Temperature Test in the Toroidal Field Model Coil without LCT Coil using the M&M Code",
Cryogenics **40** (2000) 539-548.
- [J39] H.Tsuji, K.Okuno, R.Thome, E.Salpietro, S.Egorov, N.Martovetsky, M.Ricci, R.Zanino, alii, L.Savoldi, W.Herz, A.Ninomiya,
"Progress of the ITER Central Solenoid Model Coil Program",
Nucl. Fusion **41** (2001) 645-651.

PUBBLICAZIONI (cntnd)

- [J40] R.Zanino, C.Y.Gung, K.Hamada and L.Savoldi,
"Pressure drop analysis in the CS Insert Coil",
to appear in *Adv. Cryo. Eng.* **47** (2002).
- [J41] R.Zanino, E.Carpaneto, A.Portone, E.Salpietro and L.Savoldi,
"Inductively driven transients in the CS Insert Coil (I): heater calibration and conductor stability tests and analysis",
to appear in *Adv. Cryo. Eng.* **47** (2002).
- [J42] L.Savoldi, E.Salpietro and R.Zanino,
"Inductively driven transients in the CS Insert Coil (II): quench tests and analysis",
to appear in *Adv. Cryo. Eng.* **47** (2002).
- [J43] K.Hamada, alii, R.Zanino and L.Savoldi,
"Experimental results of pressure drop measurement in the ITER CS Model Coil tests",
to appear in *Adv. Cryo. Eng.* **47** (2002).
- [C16] R.Zanino, C.Marinucci and L.Savoldi,
"Two-Fluid Analysis of the Thermal-Hydraulic Stability of ITER CS and TF Super-Conductors",
Proceedings of the 17-th International Cryogenic Engineering Conference (ICEC17), pp. 361-364, Bournemouth, UK, 14-17 July, 1998.
- [C21] R.Zanino, N.Martovetsky and L.Savoldi,
"Pretest Analysis of Tcs Measurements in the Central Solenoid Model Coil",
Proceedings of the 18-th International Cryogenic Engineering Conference (ICEC18), pp. 195-198, Mumbai, India, 21-25 February, 2000.
- [C22] R.Zanino and L.Savoldi,
"Tests and Modeling of Heat Generation and Heat Exchange in the Full Size Joint Sample",
Proceedings of the 18-th International Cryogenic Engineering Conference (ICEC18), pp. 363-366, Mumbai, India, 21-25 February, 2000.
- [C23] J.L.Duchateau, alii, L.Savoldi, A.Ulbricht, F.Wuechner, G.Zahn and R.Zanino,
"Test program preparations of the ITER toroidal field model coil (TFMC)",
presented at the 21st Symposium on Fusion Technology, 11 - 15 September 2000, Madrid, Spain.
Submitted to *Fus. Eng. Des.* (2000).
- [C24] T.Kato, alii, R.Zanino, L.Savoldi, G.Zahn, A.Martinez, R.Maix,
"First Test Results for the ITER Central Solenoid Model Coil"
presented at the 21st Symposium on Fusion Technology, 11 - 15 September 2000, Madrid, Spain.
Submitted to *Fus. Eng. Des.* (2000).

PUBBLICAZIONI (cntnd)

- [C25] R.Zanino and L.Savoldi,
"Status and perspectives of thermal-hydraulic analysis of superconducting magnets for nuclear fusion applications",
presented at the *18th IAEA Fusion Energy Conference*, Sorrento, Italy, October 4-10, 2000.
- [C27] H.Fillunger, alii, R.Zanino and L.Savoldi,
"Assembly in the test facility, acceptance and first test results of the ITER TF Model Coil",
to be presented at the *17-th International Conference on Magnet Technology (MT-17)*, Geneva, Switzerland, 24-28 September 2001.
- [C28] N.Martovetsky, alii, L.Savoldi and R.Zanino,
"Test of the ITER Central Solenoid Model Coil, CS Insert and TF Insert",
to be presented at the *17-th International Conference on Magnet Technology (MT-17)*, Geneva, Switzerland, 24-28 September 2001.
- [C29] L.Savoldi, R.Zanino, V.Marchese, et al.,
"First measurement of the current sharing temperature at 80 kA in the ITER Toroidal Field Model Coil (TFMC)",
to be presented at the *17-th International Conference on Magnet Technology (MT-17)*, Geneva, Switzerland, 24-28 September 2001.
- [L8] "ITER Toroidal Field Model Coil (TFMC) test and analysis summary report Chapter 1: specific analysis results needed for testing",
compiled by P. Libeyre with contributions from: J.L. Duchateau, alii, L. Savoldi, G. Zahn, R.Zanino,
CEA/DRFC Report AIM/NTT-2001.005 (May 2001).
- [L9] "ITER Toroidal Field Model Coil test program (I): TFMC test without LCT coil",
compiled by E.S.Bobrov, with contributions from A.Ulbricht, alii, R.Zanino,
Forschungszentrum Karlsruhe Report FE.5130.0016.0012/Z (June 2001).
- [R2] Y.Takahashi, alii, R.Zanino, L.Savoldi and A. Martinez,
"Test Results of ITER Model Coil - 13 T-640 MJ Nb₃Sn Pulse Coil",
Japanese Cryogenic Engineering **35** (2000) 357-362. (in Japanese).
- [N3] S.Depalo, L.Savoldi and R.Zanino,
"Numerical Modeling of Thermal-Hydraulic Transients in low T_c Super-Conductors",
Atti del XV Congresso Nazionale sulla Trasmissione del Calore (1997) 733-742.