

COMITATO NAZIONALE PER L'ENERGIA NUCLEARE  
Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-76/5(R)  
30 Gennaio 1976

G. Pasotti e M. Spadoni: SISTEMI DI RAFFREDDAMENTO DI  
MAGNETI SUPERCONDUTTORI PER REATTORI A FUSIONE. -

Servizio Documentazione  
dei Laboratori Nazionali di Frascati del CNEN  
Casella Postale 70 - Frascati (Roma)

LNF-76/5(R)  
30 Gennaio 1976

G. Pasotti, M. Spadoni: SISTEMI DI RAFFREDDAMENTO DI MAGNETI SUPERCONDUTTORI PER REATTORI A FUSIONE. -

I due metodi usati per il raffreddamento di magneti superconduttori sono:

- A) Immersione in elio liquido
- B) Circolazione forzata dello stesso.

La soluzione A) può essere realizzata:

- 1) con elio in equilibrio di fasi e  $T > 2.18 \text{ }^\circ\text{K}$  (elio normale)
- 2) con elio superfluido, cioè con  $T < 2.18 \text{ }^\circ\text{K}$

La soluzione B) può essere realizzata:

- 1) con elio supercritico, cioè a pressione maggiore di quella di vapore saturo.
- 2) con elio in equilibrio di fasi, con  $T$  minore della temperatura critica  $T_c = 5.2^\circ\text{K}$  e pressione corrispondente alla curva di equilibrio.

Esaminiamo separatamente le varie soluzioni.

A1) - IMMERSIONE IN ELIO IN EQUILIBRIO DI FASI A PRESSIONE ATMOSFERICA E  $T = 4.2^\circ\text{K}$ . -

Esistono due regimi di trasferimento di calore dal superconduttore all'elio: il "nucleate boiling" ed il "film boiling".

2.

In nucleate boiling la differenza di temperatura tra parete ed elio è dell'ordine dei decimi di grado; la potenza massima trasferibile è  $W \approx 0.8 \text{ Watt/cm}^2$  dopo di che il regime cambia in film boiling e la differenza di temperatura passa di colpo a decine di gradi, cosa inammissibile per un superconduttore. Per il recupero al regime di nucleate boiling il flusso termico deve essere notevolmente diminuito, cioè fino a  $\sim 0.3 \text{ W/cm}^2$ ; in definitiva questa è la massima potenza di lavoro utilizzabile. Quanto detto vale per pareti verticali perfettamente libere, dove le bolle di gas possono essere rimosse con facilità.

In pratica si ricorre quasi sempre, nel caso di grossi magneti, a canali di raffreddamento più o meno lunghi e sempre piuttosto stretti (dell'ordine del millimetro) dai quali le bolle di elio gassoso formatesi devono uscire. Se i canali sono orizzontali la fuoriuscita delle bolle di gas è molto contrastata ed il massimo flusso termico tra parete ed elio diventa molto minore di quanto precedentemente indicato (in alcuni casi può scendere a valori di qualche %)<sup>(1)</sup>. Nei magneti per reattori a fusione è impossibile evitare gli inconvenienti succitati e quindi riteniamo che un raffreddamento basato su questo metodo non offra sufficienti garanzie.

Va inoltre ricordato che questa soluzione richiede criostati di enormi dimensioni e abbastanza complicati poichè ci sono saldature di notevole lunghezza e flange con guarnizioni che devono garantire la perfetta tenuta all'elio, con pressione ambiente da un lato ed alto vuoto dall'altro. Nel caso in cui non sia prevista l'installazione del criostato in un ambiente evacuato, si rende necessario un secondo criostato che contenga il primo, per accedere alla temperatura ambiente. In questo caso sorgono problemi complessi per la trasmissione degli elevatissimi sforzi elettromagnetici che nascono tra due magneti contigui, soprattutto in caso di transizione di uno di essi.

## A2) - IMMERSIONE IN ELIO SUPERFLUIDO -

E' analoga alla soluzione A1.

Presenta rispetto ad essa i seguenti vantaggi:

- maggior campo magnetico critico del superconduttore.
- maggior capacità di raffreddamento poichè il coefficiente di trasmissione termica è più elevato ( $\sim 0.5 \text{ W/cm}^2$ ).

Questi vantaggi permettono di avere un campo magnetico sul plasma superiore di  $\sim 30\%$  (operando a  $T = 1.8 \text{ }^\circ\text{K}$ ) rispetto all'immersione a  $4.2^\circ\text{K}$  e di ridurre la sezione dei magneti poichè sarà richiesta una minore quantità di rame di stabilizzazione a causa della migliore trasmissione termica parete-elio.

Per contro esistono degli svantaggi notevoli:

- pesante aggravamento dei problemi relativi alla tenuta al vuoto dei criostati, a causa della bassissima viscosità dell'elio superfluido.
- maggior costo dei refrigeratori (di circa 3 volte operando a  $1,8^{\circ}\text{K}$  invece che a  $4,2^{\circ}\text{K}$ ); ciò pone inoltre requisiti più stringenti per gli ingressi termici.

Questo sistema dà garanzie di funzionamento assai migliori del precedente ma richiede un costo nettamente superiore e presenta problemi tecnici di difficile soluzione, data la dimensione dei magneti.

## B) - CIRCOLAZIONE FORZATA DI ELIO -

Prima di esaminare in dettaglio le soluzioni realizzabili mediante circolazione forzata di elio, vogliamo sottolineare un importante vantaggio, comune a tutte e cioè l'eliminazione dei criostati nel caso di installazione dei magneti in un ambiente evacuato. Ciò porta ad una maggiore compattezza strutturale dei magneti e riduce drasticamente i problemi connessi col contenimento degli sforzi elettromagnetici tra magneti contigui; possono infatti essere utilizzati supporti meccanici raffreddati alla temperatura dell'elio liquido, che non introducono ulteriori ingressi termici.

### B1) - CIRCOLAZIONE FORZATA DI ELIO SUPERCRITICO -

Come già detto, si definisce supercritico l'elio che si trova ad una pressione maggiore di quella del vapore saturo; per  $T = 4,5^{\circ}\text{K}$  deve essere  $p > 1,3$  atm assolute.

Non è però consigliabile utilizzare l'elio a pressioni inferiori alle 15 atm poichè esistono in quella regione fenomeni di instabilità (calori specifici, densità etc.) particolarmente pronunciati<sup>(1)</sup>. D'altra parte pressioni così elevate non sono ottenibili dai liquefattori commerciali e si rendono quindi necessarie pompe supplementari che aggravano i costi e abbassano i rendimenti.

Non esistono in linea di principio limitazioni sulla temperatura, ma considerazioni pratiche inducono a non scendere a temperature troppo basse per contenere i costi di refrigerazione ed anche a non utilizzare temperature superiori a quelle di lavoro dei superconduttori. Utilizzando Nb-Ti si trova che una temperatura di  $4 \div 4,5^{\circ}\text{K}$  rappresenta un buon compromesso tra le due opposte esigenze.

Purtroppo in questa regione del piano p.-T l'elio presenta un coefficiente di Joule-Kelvin negativo, cioè espandendosi aumenta la

sua temperatura.

Ciò significa che anche in assenza di ingressi termici esterni la temperatura di uscita dell'elio sarà superiore a quella di ingresso per il solo fatto che la pressione di uscita, è inferiore a quella di ingresso. Ciò pone limitazioni sulla lunghezza del circuito di raffreddamento e sulla portata di elio, poichè la differenza di temperatura tra ingresso e uscita non deve superare qualche decimo di grado.

La limitazione di portata ha come conseguenza un limite nella potenza massima che l'elio è in grado di estrarre dal circuito.

Abbiamo esaminato la possibilità di raffreddare con elio supercritico i magneti toroidali del F.I.N.T.O. R. <sup>(x)</sup>. A titolo esemplificativo riportiamo i calcoli relativi ad uno strato di un magnete il cui circuito idraulico è costituito da 1,5 Km di conduttore Cu + Nb - Ti avente un foro interno del diametro di 1,12 cm per la circolazione dell'elio.

Abbiamo scelto le seguenti condizioni di funzionamento:

$$T_1 = T_{\text{ingresso}} = 4,2 \text{ } ^\circ\text{K};$$

$$T_2 = T_{\text{uscita}} = 4,5 \text{ } ^\circ\text{K}.$$

$$P_{\text{ingresso}} = 20 \text{ atm.}$$

Si può dimostrare che la potenza  $W$  che può essere ceduta all'elio è data da <sup>(2)</sup>

$$(1) \quad W = \dot{m} c_p (T_2 - T_1) + \dot{m}^3 c_p \alpha_H \frac{f v L}{2d^5}$$

dove  $\dot{m} = dm/dt$  = massa di elio che fluisce nell'unità di tempo

$c_p$  = calore specifico a pressione costante

$\alpha_H$  = coefficiente di Joule-Kelvin

$f = 0,184 (\mu d/\dot{m})^{0,2}$

$\mu$  = viscosità

$v$  = volume specifico

$L$  = lunghezza del circuito.

Nella (1) il primo termine al secondo membro rappresenta la potenza termica totale del fluido ed il secondo termine rappresenta la potenza termica dissipata a causa dell'effetto Joule-Kelvin (ricordiamo che  $\alpha_H < 0$ ).

Derivando la (1) rispetto a  $\dot{m}$  e uguagliando a zero, si ottiene il valore ottimale di  $\dot{m}$  che consente la massima potenza utile per il

---

(x) - Questo acrostico indica il progetto concettuale di un reattore sperimentale a fusione, che sarà oggetto di una prossima pubblicazione.

circuito in esame. Si ottiene in definitiva:

$$(2) \quad \dot{m}_{\text{ott}} = \left[ - \frac{(T_2 - T_1) d^{4.8}}{0.258 \alpha_H v L \mu^{0.2}} \right]^{1/1.8}$$

Dalla (2) si ricava per  $L = 1,5 \text{ Km}$  e  $d = 1,12 \text{ cm}$ .  $\dot{m}_{\text{ott}} = 10 \text{ gr/sec}$ , che corrisponde ad una velocità di scorrimento  $u = 52 \text{ cm/sec}$ . Sostituendo il valore di  $\dot{m}_{\text{ott}}$  nella (1) si ottiene  $W = 4,7 \text{ watt}$ .

La caduta di pressione si calcola dalla formula<sup>(2)</sup>:

$$(3) \quad \Delta p = \frac{0.092 \mu^{0.2} v L m^{1.8}}{d^{4.8}}$$

Dalla (3) si ottiene  $\Delta p = 0.44 \text{ atm}$ .

Dalle (2) e (3) si vede che ad  $\dot{m}_{\text{ott}}$   $\Delta p$  è indipendente dalla lunghezza  $L$  del circuito.

Dalla formula della stabilizzazione criogenica

$$(4) \quad RI^2 = W$$

si può ricavare la massima lunghezza  $l_c$  di conduttore che può transire senza provocare la successiva transizione di tutto il circuito. Si ottiene in definitiva

$$l_c = \frac{W S_{\text{cu}}}{\rho_{\text{cu}} I^2} \approx 12 \text{ cm}$$

Questa lunghezza critica è del tutto insufficiente per garantire un buon funzionamento del magnete; bisogna inoltre sottolineare che non sono stati tenuti in conto tutti gli altri ingressi termici ( eddy currents, hysteresis loss, nuclear heat deposition etc. ).

Il coefficiente di trasmissione termica elio-parete è definito da:

$$(4) \quad h = \text{Nu} \frac{K}{d}$$

dove  $\text{Nu}$  = numero di Nusselt e  $K$  = conducibilità termica dell'elio. In questo caso si ottiene  $h = 0.084 \text{ W/cm}^2 \text{ }^\circ\text{K}$ , valore assai basso e nettamente inferiore a quello imposto nel calcolo della sezione dei magneti, basato su  $h = 0.2 \text{ W/cm}^2 \text{ }^\circ\text{K}$ .

6.

Un sostanziale miglioramento può essere ottenuto suddividendo il circuito in 10 sezioni connesse idraulicamente in parallelo. In tal caso si ha:

$$\dot{m}_{\text{ott}} = 36 \text{ gr/sec}, \quad W_{1 \text{ circuito}} = 17 \text{ watt}$$

$W_{\text{totale}} = 17 \times 10 = 170 \text{ watt}$ , cui corrisponde una lunghezza critica to tale  $l_c = 4,3 \text{ m}$  e  $h = 0,23 \text{ W/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{K}$ .

## B2) - CIRCOLAZIONE FORZATA DI ELIO IN EQUILIBRIO DI FASI -

Un'altra maniera di raffreddare un conduttore cavo è di utilizzare il calore latente di evaporazione dell'elio.

Ciò significa far fluire elio in equilibrio di fasi (liquido + vapore).

In questo caso l'effetto Joule-Kelvin è positivo e il fluido espandendosi si raffredda, indipendentemente dal fatto che gli venga fornito calore dall'esterno. Il calore che l'elio riceve, sia da sorgenti esterne che per gli attriti interni di scorrimento, fa evaporare il liquido e quindi fa aumentare la qualità cioè il rapporto tra vapore e liquido.

Una limitazione di questo metodo è che la pressione critica dello elio è  $p_c = 1,28 \text{ atm}$  (relative a  $5,2^\circ\text{K}$ ), che rappresenta la massima caduta di pressione possibile nel circuito. Se si vuole, come nel caso precedente, lavorare alla temperatura massima di  $4,5^\circ\text{K}$ , la caduta di pressione corrispondente è  $\Delta p = 0,3 \text{ atm}$ .

Analogamente al caso supercritico esiste una formula che fornisce la portata ottimale di elio ma, tranne nei casi in cui  $L$  è di pochi metri, la caduta di pressione è superiore alle  $0,3 \text{ atm}$  già citate.

Occorre quindi imporre  $\Delta p_{\text{max}}$  e calcolare la portata che ne consegue, con la formula<sup>(2)</sup>

$$(5) \quad \dot{m} = \left[ \frac{\Delta p d^{4.8}}{0.092 \psi_1 L V_L (\bar{\mu})^{0.2}} \right]^{1/1.8}$$

dove i suscritti  $L$  e  $V$  si riferiscono rispettivamente al liquido e al vapore,

$$\psi_1 = 1 + \beta x_1 + \frac{\beta}{2} (x_2 - x_1), \quad \beta = \left( \frac{V_v}{V_L} - 1 \right)$$

$$\frac{1}{\bar{\mu}} = \frac{x}{\mu_V} + \frac{1-x}{\mu_L}$$

Come si vede la viscosità media  $\bar{\mu}$  è la funzione della qualità  $x$ , variabile lungo il circuito; tuttavia poichè nella (5)  $\bar{\mu}$  è elevato alla potenza 0,11, una sufficiente approssimazione si ha prendendo:

$$\bar{\mu} = \frac{\bar{\mu}_{\text{ingresso}} + \bar{\mu}_{\text{uscita}}}{2}$$

Per il circuito con  $L = 1,5$  Km si ottiene:

$$\dot{m} = 4,04 \text{ gr/sec}$$

La potenza termica  $W$  si ottiene dalla formula:

$$(6) \quad W = r \dot{m} (x_2 - x_1) - 0.092 \frac{(\bar{\mu})^{0.2} v_L^2 L \psi_2 (\dot{m})^{2.8}}{d^{4.8}}$$

$r$  = cal. latente di evaporazione dell'elio e

$$\psi_2 = 1 + \beta(x_2 + x_1) + \frac{\beta^2}{3} (x_1^2 + x_1 x_2 + x_2^2).$$

Nell'ipotesi che entri tutto liquido (qualità  $x_1 = 0$ ) ed esca tutto vapore ( $x_2 = 1$ ) si ottiene una potenza termica utile  $W = 77$  watt.

La potenza di 77 W va paragonata con i 4,7 watt nel caso supercritico in condizioni analoghe. Ne risulta evidente il notevole vantaggio.

Nonostante ciò, il coefficiente di trasmissione termica

$$(7) \quad h_{TP} = 0.023 \frac{K_L}{d} \left( \frac{\dot{m}}{d \bar{\mu}} \right)^{0.8} \left( \frac{C_p \mu}{K} \right)_L^{1/3}$$

risulta  $h < 0.2$  W/cm<sup>2</sup> °K e quindi non ancora accettabile. Abbiamo quindi tracciato una curva  $h(L)$  dalla quale si deduce che  $h = 0.2$  W/cm<sup>2</sup> °K se  $L = 150$  m. Si torna quindi alla necessità di dover suddividere il circuito in 10 sezioni. In tal caso si ottiene però  $W = 260$  W/sez; cioè  $W_{\text{tot}} = 2600$  W da paragonare ai 170 W ottenuti nell'analogo caso con elio supercritico. Le formule precedenti sono basate sull'as-



sunzione che la qualità varii linearmente tra inizio e fine del circuito, cosa ovviamente non vera se transisce un tratto di conduttore. In tal caso, per poter calcolare la  $l_c$  rispettando le ipotesi suddette, bisogna applicare le formule separatamente al tratto che precede la zona transita, alla regione di transizione e al tratto che la segue. Il caso peggiore è quello di una transizione nel tratto iniziale del circuito, quello più favorevole si ha per transizione del tratto finale. Ciò è dovuto al fatto che se la transizione avviene nel tratto iniziale la qualità diventa molto vicina a 1. Poichè  $(V_V/V_L) = 5$  la velocità del fluido che percorre il resto del circuito è 5 volte superiore; ne consegue una forte dissipazione aggiuntiva per attriti interni, avendo la viscosità del liquido e del vapore valori molto simili.

Abbiamo quindi eseguito i calcoli in questi due casi estremi per vederne l'influenza sulla lunghezza critica. Si è trovato che  $l_c = 6$  m per transizione del tratto iniziale e  $l_c = 6.7$  m per transizione nel tratto finale. Come si può vedere la posizione della zona transita influenza poco la  $l_c$ .

#### CONCLUSIONI -

La soluzione A1, immersione in elio a 4.2°K non viene considerata sufficientemente sicura per magneti di queste dimensioni.

La soluzione A2 offre, a nostro avviso sufficienti garanzie di sicurezza ma presenta costi e problemi tecnici che possono sconsigliarne l'uso.

La soluzione B1, pur essendo preferibile alla A1, poichè permette una sicura rimozione di calore del conduttore, non è tuttavia accettabile a causa della bassa potenza termica che l'elio può rimuovere dal circuito.

La soluzione B2 permette sia un'efficace rimozione di calore dal rame che un'altrettanto efficace capacità di rimozione di calore dal circuito; non presenta inoltre gli inconvenienti di costo e di tenuta al vuoto della soluzione A2 e ci sembra quindi la più adatta ed affidabile per il raffreddamento di magneti superconduttori di grandi dimensioni come quelli richiesti per un reattore a fusione.

#### BIBLIOGRAFIA -

- (1) - R. V. Smith, Cryogenics 9, 11 (1969).
- (2) - B. Colyer, Rutherford Laboratory Internal Report RHEL/R 193 (1970).