

Aspetti relativi alla sicurezza dei lavoratori nella risonanza magnetica ad uso clinico

Maurizio VIGNATI

*Dipartimento di Igiene del Lavoro, Laboratorio Radiazioni Ionizzanti e Non Ionizzanti,
Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza del Lavoro, Monte Porzio Catone (Roma)*

Riassunto. - Vengono descritti gli aspetti pratici concernenti la sicurezza dei lavoratori impiegati in un presidio di risonanza magnetica. In particolare, si pongono in risalto le relazioni tra sicurezza dei lavoratori e disposizione di impianti, quali l'impianto elettrico e il sistema criogenico. La valutazione delle proprietà fisiche dei criogeni impiegati in tali impianti, può determinare differenti criteri di progettazione degli impianti stessi. Inoltre, vengono valutate le relazioni tra proprietà dei criogeni, caratteristiche dell'impianto elettrico e prevenzione degli incendi.

Parole-chiave: risonanza magnetica nucleare, sicurezza, criogeni, impianto elettrico, incendio.

Summary (*Safety of workers in NMR clinical plants*). - Some practical items, concerning the safety of workers employed in clinical NMR sites are described. In particular, the connections between safety, and arrangement of some installations, like electric system and cryogenic system, are pointed out. The consideration of the physical properties of the cryogens used in such sites can determine different designing criteria of these plants. Furthermore, the connections among properties of cryogens, characteristics of electric system, and prevention of fire are considered.

Key words: nuclear magnetic resonance, safety, cryogens, electric system, fire.

Introduzione

Le prescrizioni di sicurezza di impianti di risonanza magnetica (RMN o brevemente RM) intendono conseguire il più alto grado di sicurezza possibile sia dei pazienti, che dei lavoratori e, in generale, della popolazione. Nel caso di impianti RM questo obiettivo si può raggiungere attraverso una corretta ed armonica integrazione di un buon progetto e di buone norme di sicurezza. Risulta infatti evidente che un cattivo progetto non potrà dar luogo ad un alto grado di sicurezza per effetto delle sole norme di sicurezza. Anche in questo caso bisognerebbe tenere presente che un evento può sempre accadere, contro la volontà degli interessati, se esso è in qualche modo tecnicamente possibile. Quindi, il problema della sicurezza e della prevenzione dovrebbe essere affrontato cominciando a creare un impianto intrinsecamente sicuro. Per quanto riguarda questo primo aspetto, si è ampiamente parlato della necessità di controllare la disposizione dell'impianto, per prevenire rischi derivanti dai campi elettro-magnetici generati dalla apparecchiatura. Tuttavia vi sono altre caratteristiche costruttive dell'impianto che influiscono sulla sicurezza dei lavoratori: si tratta degli aspetti relativi all'impianto elettrico e quelli relativi all'uso dei criogeni. Ora vedremo come questi due aspetti possano interferire l'uno sull'altro. Per cominciare, converrà anticipare che le prescrizioni tecniche re-

lative all'impianto elettrico possono essere condizionate, tra l'altro, dalla contemporanea presenza dei criogeni, pertanto affronteremo per primo il discorso sull'uso di questi.

Aspetti di sicurezza relativi all'uso dei criogeni

Allo stato attuale della tecnologia la necessità di creare elevati campi magnetici da utilizzare in apparecchiature a RM è spesso soddisfatta con l'impiego di avvolgimenti idonei a funzionare in regime di superconduzione, i quali, per quanto oggi è noto, hanno bisogno di essere raffreddati a temperature ben più basse di quella ambientale. Recentissimi sviluppi sperimentali in questo campo stanno elevando considerevolmente la temperatura critica di transizione al regime di superconduttività di appositi materiali. Al momento attuale, la temperatura più alta di transizione registrata è di 160 K [1] quindi, in teoria, si potrebbero costruire magneti superconduttori anche alla temperatura dell'azoto liquido (78 K). Tuttavia, allo stato attuale vi è solo la possibilità di trovare in commercio apparecchiature che hanno bisogno di funzionare alla temperatura dell'elio liquido a pressione ambiente. Inoltre, a causa dell'elevato costo dell'elio, molte apparecchiature, allo scopo di diminuire l'evaporazione di elio, utilizzano un secondo

criogeno, l'azoto liquido, per schermare l'elio liquido nei confronti del calore proveniente dall'ambiente. Pertanto, nei casi più complessi che si possono incontrare in pratica, si potranno avere magneti con una prima e più esterna camicia di azoto liquido, all'interno della quale vi sarà una seconda intercapedine a vuoto ed infine il contenitore dell'elio liquido, in contatto con l'avvolgimento superconduttore.

Come si comprenderà in seguito, questo doppio sistema di refrigerazione non ha soltanto lo scopo di ottenere un risparmio economico, sulla voce di spesa dell'elio liquido, ma anche quello di rendere l'apparecchiatura meno soggetta al gravissimo pericolo derivante dalla perdita della proprietà di superconduzione dell'avvolgimento. Infatti, allorché un superconduttore percorso da corrente viene, per una qualsiasi causa, a riacquistare una temperatura superiore a quella critica di transizione, riacquista immediatamente, nella zona interessata, una conduttività normale. Per fare un esempio, si può dimostrare che un filo di piombo di 2 millimetri di diametro è in grado di condurre, in regime di superconduzione, una corrente di 250 A. È ovvio che, ove tale corrente dovesse essere condotta da una porzione di detto filo in regime di conduzione normale, ne conseguirebbe l'immediata fusione di detto filo. Se questo conduttore è quello che costituisce l'avvolgimento di una apparecchiatura RM, a causa dell'elevato valore della corrente che percorre l'avvolgimento, nella zona interessata si produce una elevatissima quantità di calore, potenzialmente in grado di fondere il conduttore. In sostanza, tutta l'energia accumulata in forma magnetica nell'apparecchiatura tende a liberarsi sotto forma di calore nel criogeno, con conseguente ebollizione rapidissima dei criogeni contenuti. Data l'entità di tale energia e data la notevole massa di tali criogeni, ne possono risultare impulsi di pressione molto elevati, potenzialmente in grado di vincere la resistenza meccanica dei contenitori, con gravi rischi per i lavoratori. Quindi, la riduzione del tasso di evaporazione dell'elio introduce anche un fattore di sicurezza contro questo pericolo. Oltre a questo gravissimo rischio, i lavoratori addetti ad un impianto di RM sono esposti, in conseguenza dell'uso dei criogeni, anche ad altri rischi, che sono illustrati sinteticamente in Fig. 1.

Come si vede dal quadro riassuntivo, i rischi connessi con l'uso dei criogeni si possono dividere, principalmente, in due categorie, quelli derivanti dai criogeni primari, che sono quelli effettivamente introdotti, e quelli derivanti dai prodotti secondari che i primari sono in grado di generare. Per quanto riguarda i prodotti gassosi di cui si parla, converrà tenere presente la normativa vigente, relativa a questo settore, i cui estremi sono qui di seguito riportati:

Normativa in materia di gas compressi e liquefatti

Norme generali:

DPR 1955 n.547; DPR 1956 n. 303

Sul trasporto:

DM 12/9/1925; DM 22/7/1930 e successive integrazioni; DPR 16/6/1959 n. 393; DPR 30/6/1959 n. 420.

Norme per gli utilizzatori:

TU Leggi Sanitarie DM 23/12/1976; L. 1974 n. 256; DM 17/12/59 n. 420

Prodotti primari

I criogeni primari sono in grado di produrre congelamento e morte dei tessuti umani con cui vengano in contatto. Brevi contatti con la pelle possono causare alterazioni simili a quelle prodotte dal calore. Tali ustioni devono essere trattate in modo diverso da quello usato per le ustioni da calore. Particolarmente pericoloso può essere il contatto, anche brevissimo, della cornea e della sclera con i criogeni, dato che tali organi sono assai poco vascolarizzati. Per questo motivo essi sono molto più soggetti, rispetto ad altri organi, a seguire le variazioni di temperatura dell'ambiente circostante. Un contatto anche breve dell'occhio con i criogeni può facilmente provocare una opacizzazione della cornea, con conseguente diminuzione della vista.

Un diverso pericolo può derivare dall'aumento di pressione interna ad un recipiente che contenga dei criogeni, allorché sia impedita la normale fuoriuscita della frazione di liquido che passa in fase gassosa. Infatti, il liquido criogenico esercita la sua azione raffreddante proprio attraverso la sottrazione di calore che consegue alla sua evaporazione. In base a quanto è noto sul comportamento fisico dei gas, se dell'azoto liquido, o dell'elio liquido, fosse contenuto in un recipiente ermeticamente chiuso, posto a temperatura ambiente, non essendo possibile un perfetto isolamento, esso continuerebbe ad evaporare, sottraendo calore al recipiente stesso e farebbe aumentare la pressione interna del recipiente fino a portarla a valori molto elevati (dell'ordine delle centinaia di bar), tali da provocare certamente l'esplosione del recipiente stesso, se esso non fosse dotato di una elevatissima resistenza meccanica. Poiché, invece, i contenitori dell'elio liquido e dell'azoto liquido (chiamati dewar, con termine anglosassone) non possono essere costruiti con tali resistenze meccaniche, che comporterebbero dei pesi inaccettabili, ne consegue che essi sono esposti al pericolo di esplosione, nel caso in cui le tubazioni di comunicazione con l'esterno dovessero chiudersi del tutto. Queste esplosioni si possono definire di tipo puramente meccanico, senza reazioni chimiche. Infine, i criogeni comportano il pericolo di asfissia. Infatti, l'azoto e l'elio non sono gas idonei alla respirazione umana e una loro eccessiva concentrazione nell'aria tende a ridurre la percentuale di ossigeno con

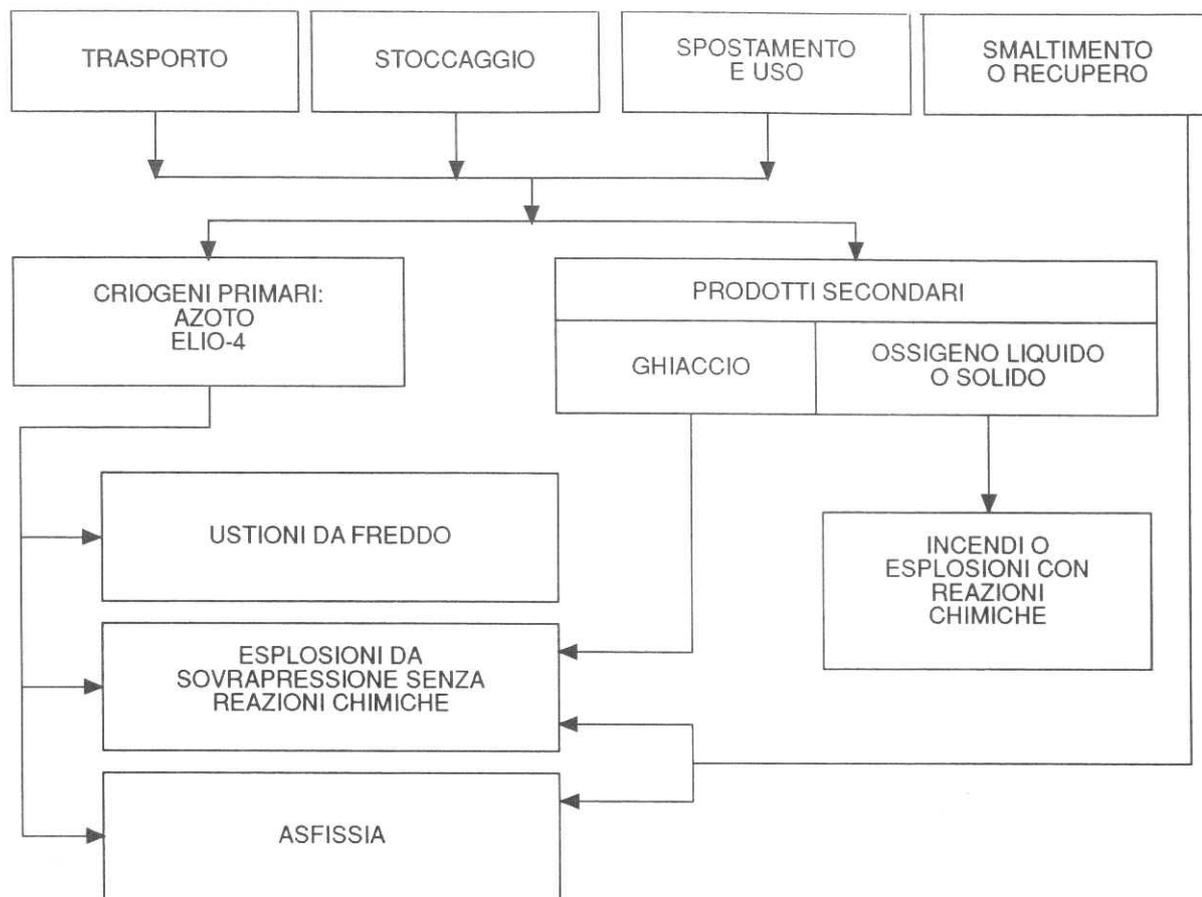


Fig. 1. - Rischi derivanti dai criogeni durante varie fasi del loro impiego nella risonanza magnetica.

conseguenze di vario tipo. Per illustrare questo tipo di effetti si può fare riferimento alla Fig. 2 in cui è riportato un quadro che riassume i principali effetti che diverse concentrazioni di ossigeno nell'aria producono nei soggetti esposti. Si pone in rilievo il fatto che per concentrazioni percentuali di ossigeno che variano dal 18% al 21% nessuna particolare sensazione o effetto nocivo si riscontra nei soggetti esposti. Per questo motivo, secondo quanto è previsto dalla normativa italiana, la soglia di intervento dei rivelatori di ossigeno deve essere tarata in questo intervallo.

Al di sotto del 18% si cominciano ad avvertire delle diminuzioni delle facoltà psichiche nei soggetti esposti e poi dei leggeri malesseri, che però non sarebbero in grado di porre in allarme un soggetto che non fosse a conoscenza del pericolo che corre. Si tratta, infatti, di sensazioni di lieve entità, quali ad esempio una sensazione di formicolio alle estremità delle dita, o della lingua, oppure cefalee ristrette alla zona frontale. Al di sotto del 12% si può andare incontro ad annebbiamento della vista e perdita dei sensi in una sequenza molto rapida, senza che il soggetto possa avere il tempo di reagire. Infine al di sotto del 7% si può incorrere in una rapida asfissia con morte.

Prodotti secondari

I prodotti secondari, citati nel quadro riassuntivo di Fig. 1, sono essenzialmente costituiti dal ghiaccio, cioè acqua in fase solida, aria in fase solida e ossigeno liquido. Infatti, la temperatura estremamente bassa dei due criogeni principali è in grado, chiaramente, di solidificare l'umidità dell'aria. Inoltre, la temperatura dell'elio liquido è anche in grado di liquefare l'aria, anche alla pressione ambiente, e di farla perfino solidificare. Eventuali particelle di ghiaccio che fossero contenute in un dewar di azoto liquido potrebbero occludere i canali di passaggio della fase gassosa verso l'esterno e provocare l'esplosione del dewar. Per l'elio il pericolo è ancora maggiore poiché l'occlusione potrebbe essere provocata anche da particelle di aria solida. Pertanto, una estrema attenzione deve essere usata nell'impiego dei dewar, affinché in essi non possa mai penetrare aria ambientale. Il terzo prodotto secondario è costituito dall'ossigeno liquido. Infatti, come detto, l'aria può condensare sulle tubazioni che vengono usate per trasferire l'elio liquido da un contenitore all'altro, anche se esse sono isolate, perché in tali tubazioni non è possibile raggiungere un

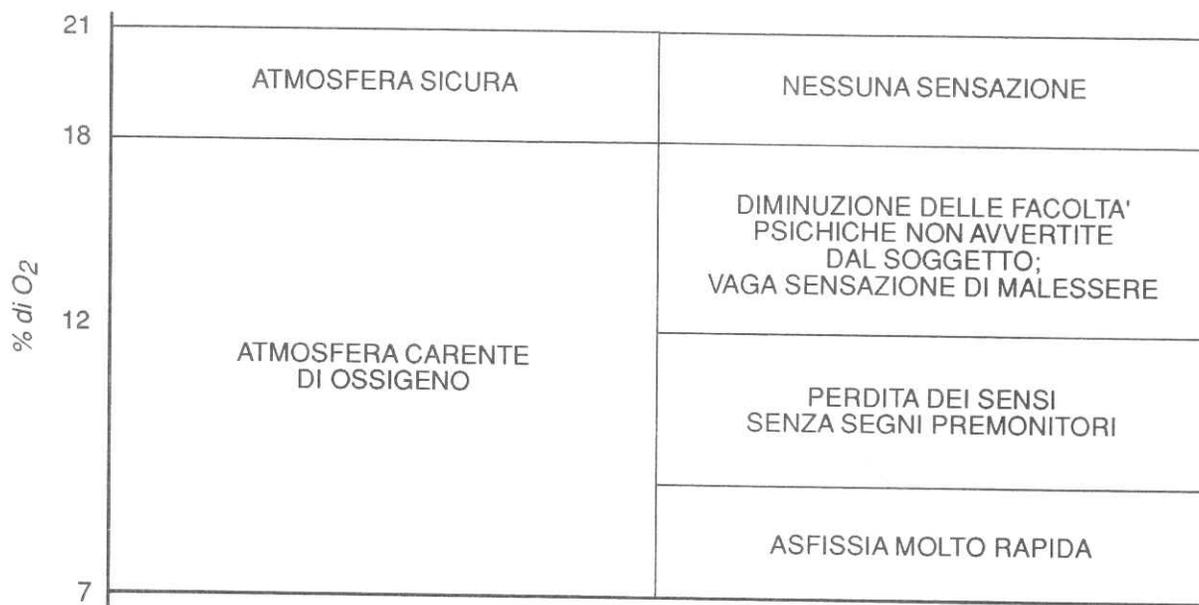


Fig. 2. - Effetti sul corpo umano di atmosfere ossigenate di varia composizione percentuale.

perfetto grado di isolamento. Dato che l'aria è costituita principalmente da azoto e ossigeno, questi due gas possono condensarsi in fase liquida sull'esterno dei tubi e l'esperienza mostra che l'azoto tende a rievaporare più rapidamente dell'ossigeno. In definitiva, le tubazioni che conducono elio liquido tendono ad arricchirsi, sulla loro superficie esterna, di ossigeno liquido. Questo fluido, risgocciolando dai tubi stessi potrebbe dar luogo a reazioni chimiche molto violente con incendi o scoppi, se incontrasse sostanze combustibili quali grassi, gomme di tipo particolare, o materiali plastici espansi di tipo infiammabile.

Smaltimento o recupero dell'elio

In alcuni impianti, per ottenere un risparmio sulla voce di bilancio riguardante l'elio, si procede al recupero di questo fluido dalle tubazioni che convogliano l'elio evaporato dal criostato del magnete. In questi casi sono previsti dei palloni o recipienti di grandi dimensioni in cui il gas viene ricompresso a bassa pressione da compressori volumetrici. È ovvio, quindi, che nei locali in cui tale operazione viene praticata si possono avere anche rischi, sebbene minori, di scoppio o asfissia.

Tuttavia bisogna notare che tale recupero è assai poco praticato.

Descrizione di un tipico impianto di alimentazione di criogeni

Nella Fig. 3 è illustrata la disposizione degli elementi attorno alla sala magnete di un impianto che richiede entrambi i criogeni citati. L'esame di questo caso può

essere utile come caso più complesso da considerare ai fini della sicurezza nella RM. L'apparecchiatura a RM [1] è contenuta in una apposita sala e dalla apparecchiatura stessa, che contiene i due criogeni, si dipartono una serie di tubazioni [2-5] che mettono in comunicazione con l'esterno della sala quelle parti dell'apparecchiatura in cui vi è, o vi potrebbe essere, una produzione di gas non idonei alla respirazione umana. La tubazione [2] è prevista nel caso si verifichi il quench, in cui un improvviso aumento della temperatura del superconduttore può produrre un improvviso aumento di pressione nel contenitore dell'elio. Questa tubazione di grande diametro e resistenza meccanica, provvede a scaricare nell'atmosfera tutto l'elio gassoso che dovesse prodursi in una tale, sfortunata, evenienza. La sua sezione interna, generalmente, aumenta lungo il suo percorso. Analogamente, per il contenitore dell'azoto liquido esiste una tubazione [3] di grande diametro e resistenza meccanica adeguata, che pone in comunicazione il serbatoio stesso con l'atmosfera, nel caso di improvviso aumento di pressione nel contenitore dell'azoto liquido. Per eliminare l'elio in fase gassosa prodotto nel suo dewar durante la normale ebollizione (boil off), è prevista una apposita conduttura [4]. Per la normale evaporazione dell'azoto è prevista, invece, una quarta tubazione [5], nella quale è anche convogliato l'azoto gassoso che si produce durante l'operazione di riempimento del dewar di azoto liquido, di cui si parlerà in seguito. Inoltre, all'interno della sala magnete verrà trasportato, di tanto in tanto, un dewar di elio liquido [6] per i rabbocchi periodici di questo criogeno negli avvolgimenti superconduttori. È importante sottolineare subito che tale dewar *non* deve essere lasciato nella sala magnete per un tempo superiore a quello

necessario all'operazione di rabbocco. Per aumentare la velocità di travaso dell'elio liquido si può usare dell'elio gassoso ad una pressione leggermente superiore a quella atmosferica, in modo che esso, inviato all'interno del dewar, possa spingere l'elio liquido più velocemente all'interno del tubo [16] in esso immerso a guisa di sifone. L'uso dell'elio in fase gassosa per tale scopo è determinato dalla necessità, già citata, di evitare l'ingresso di aria nel dewar. Per ottenere questo flusso di elio gassoso si ricorre a delle bombole in cui tale gas può essere compresso a forte pressione (200-250 bar). Queste bombole devono essere sistemate fuori della sala magnete in appositi spazi aperti e il flusso di gas viene da esse ottenuto attraverso un doppio stadio di riduzione di pressione.

Infatti, un primo riduttore di pressione [13] è applicato sulla bombola stessa; esso riduce la pressione ad un valore dell'ordine di 2 o 3 bar. L'elio a pressione intermedia viene quindi condotto all'interno della sala magnete attraverso una tubazione. All'interno della sala magnete un secondo riduttore di pressione [14] consente di regolare la pressione dell'elio, dal valore della pressione ambiente fino ad un valore massimo di circa 300 mm Hg. In tal modo l'operatore può regolare l'afflusso di elio liquido regolando la pressione dell'elio gassoso.

Per i rabbocchi dell'azoto liquido può essere previsto un serbatoio di grande capacità [20], dato che tale fluido è soggetto ad un maggior consumo, rispetto all'elio liquido. Tale serbatoio deve essere posto in un apposito spazio in zona aperta e collegato con la sala magnete per mezzo di un tubo di acciaio inossidabile ben coibentato. All'interno della sala magnete due rubinetti [8, 9] ed un tubo flessibile [11] completano l'apparato di alimentazione. Il serbatoio è provvisto di un sensore di livello esterno, un pressostato ed una elettrovalvola, che mantengono la pressione interna ad un valore di circa 0,5-0,7 bar in condizioni normali. Inoltre, una valvola di sicurezza è in grado di intervenire per scaricare un eccesso di pressione superiore ad 1,7 bar, se il sistema descritto in

precedenza dovesse fallire. Inoltre, nel tubo di apporto dell'azoto liquido è inserito un separatore galvanico [19] che, pur consentendo il passaggio dell'azoto liquido verso la sala RM, separa la terra del serbatoio [17] da quella [18] della gabbia di Faraday della sala magnete. Infatti, dato che il serbatoio è posto all'esterno, è soggetto ai fenomeni atmosferici e ai contatti accidentali con linee elettriche (che peraltro non devono essere presenti nelle vicinanze). Quindi, la messa a terra del serbatoio è bene che avvenga nel modo più diretto possibile, senza passare per la sala magnete, ove potrebbe dar luogo, in caso di folgore, a pericolose tensioni di passo. Il serbatoio deve essere posto in un luogo recintato, privo di qualsiasi canale che possa condurre il fluido in zone non controllate.

Essendo, con ciò, terminata la descrizione degli elementi essenziali, possiamo descrivere alcune sequenze di manovre, o eventi che potrebbero presentare pericoli per i lavoratori, o i pazienti.

Eventi rischiosi durante il rabbocco dei criogeni

Durante il rabbocco dei criogeni, il dewar dell'elio liquido deve essere prelevato dal suo locale di deposito e portato all'interno della sala magnete; si deve fare il rabbocco nel magnete e quindi il dewar deve essere riportato indietro. Inoltre, dal serbatoio dell'azoto liquido, attraverso una sequenza di operazioni su valvole, si deve convogliare una certa quantità di azoto liquido nell'apposito contenitore del magnete. Queste operazioni comportano tutti i rischi di cui alla Fig. 1. Infatti, durante il trasporto del dewar di elio liquido, si può correre il rischio di una sua esplosione provocata da un eccesso di pressione interna, causato da eccessivo scuotimento e/o chiusura dei condotti di sfiato del dewar. Inoltre è possibile essere colpiti da schizzi di liquido criogenico e respirare aria con concentrazione ridotta di ossigeno, a causa di una aumentata percentuale di criogeni

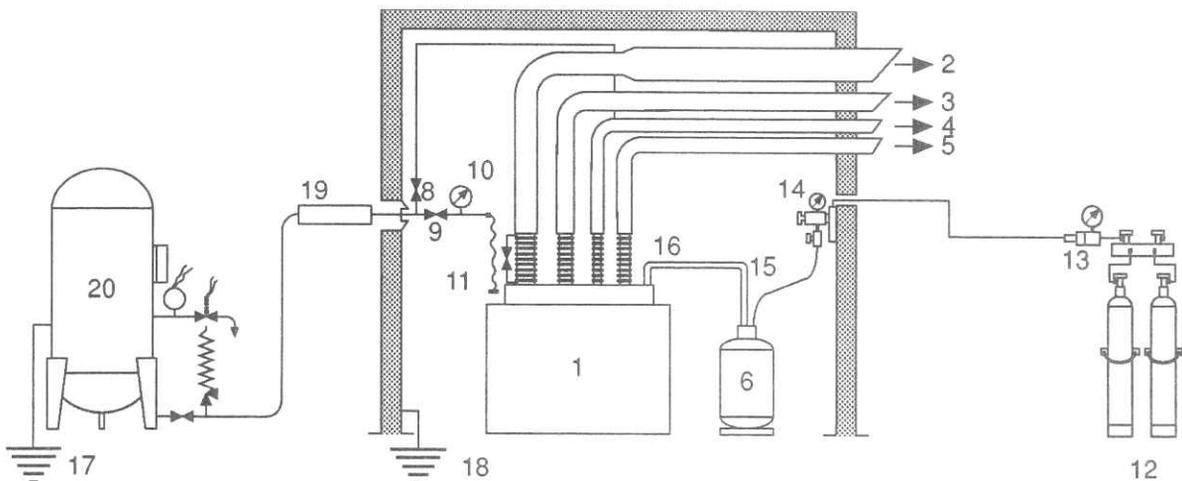


Fig. 3. - Schema di una tipica disposizione di elementi in un impianto a RM che impieghi azoto liquido e elio liquido.

gassosi. Poi, durante il travaso, è possibile la formazione di ossigeno liquido sul tubo a sifone, con conseguente pericolo di incendio o esplosione da reazione chimica. Per quanto riguarda il travaso di azoto liquido, si può ipotizzare un rischio di ustioni da freddo per il contatto con il liquido o le tubazioni fredde e un rischio di asfissia per la formazione, all'interno della sala magnete, di una atmosfera eccessivamente ricca di azoto gassoso.

Evento catastrofico da quench

Sia durante il rabbocco dei criogeni, sia durante la normale attività di analisi, è presente in una sala magnete a superconduttore, il pericolo, sia pure molto improbabile, di un quench che produca il subitaneo insorgere di una massiccia espulsione di gas criogenici impiegati del magnete. Ovviamente, la resistenza dell'apparecchiatura è calcolata per resistere ad un evento del genere, ed in tale evenienza si deve verificare la rottura delle apposite membrane di contenimento per consentire lo smaltimento dei gas all'esterno. Pertanto, è estremamente importante che le tubazioni di uscita siano protette contro l'ingresso di acqua piovana (che potrebbe congelare), animali, etc, che potrebbero aumentare la resistenza a rottura o creare impedenza al flusso da quench. Altri fattori potrebbero influire sulla sicurezza in caso di quench. Infatti è ben possibile che le condotte di scarico non resistano ad un quench in tutti i possibili casi. Si può ipotizzare, infatti, che esse, pur essendo calcolate in modo esatto, siano poi soggette a variazioni della sezione interna a causa di corpi estranei che vi potrebbero penetrare, o di cedimenti o piegamenti delle tubazioni stesse causati da trascuratezza o incidenti. Inoltre, è sempre presente l'incognita della resistenza meccanica delle saldature di giunzione, dato che esse possono subire sia fortissime tensioni meccaniche, che fortissime variazioni di temperatura.

In caso di quench, una tubazione parzialmente ostruita e/o una saldatura particolarmente debole potrebbero causare una rottura della tubazione stessa all'interno della sala magnete, con conseguente spargimento, al suo interno, di pericolosi criogeni liquidi o gassosi, in grado di rendere irrespirabile l'aria, congelare i tessuti umani con cui venissero in contatto e impedire, sia pure per un breve intervallo di tempo, l'apertura della porta della sala, a causa dell'aumento di pressione interna della sala stessa.

Massimo incidente ipotizzabile durante il rabbocco dell'elio liquido

Durante il rabbocco dell'elio liquido è possibile, anche se poco probabile, che l'intercapedine di vuoto del dewar perda il grado di vuoto che assicura un buon isolamento dall'ambiente. Se ciò avviene, l'elio liquido

contenuto nel dewar comincia a bollire e ad evaporare con un rateo molto superiore al normale ed è probabile che un notevole quantitativo di liquido fuoriesca dal dewar stesso impedendo momentaneamente al personale di avvicinarsi per rimuoverlo. È ovvio che in tale eventualità l'aria della sala magnete rischia di diventare irrespirabile. Inoltre, è possibile il verificarsi di condensazione di ossigeno liquido nelle zone colpite da elio liquido fuoriuscente. È stato calcolato che, per un dewar di 250 litri di elio liquido, un incidente del genere potrebbe provocare, nel peggiore dei casi, la produzione di un volume di circa 185 metri cubi di elio gassoso in circa trenta minuti. Dato che, in condizioni normali, un tale dewar di elio liquido può produrre un volume di circa 2 metri cubi di elio gassoso al giorno, ne segue che il massimo incidente ipotizzabile, per perdita di vuoto del dewar, aumenta di 4000 volte il rateo di immissione di elio nell'ambiente. Dato, poi, che il volume di una sala magnete può avere valori attorno ai 180 metri cubi, ne segue anche che un tale incidente sarebbe in grado di saturare completamente l'ambiente stesso di una atmosfera irrespirabile. Se, ipoteticamente, la sala fosse chiusa in modo ermetico, la sua pressione interna potrebbe aumentare di circa 1 bar. Da ciò si deduce l'importanza di una buona ventilazione del locale e la necessità di separare il circuito di aereazione della sala magnete dal restante impianto e l'importanza di chiare norme di comportamento per il personale addetto a queste operazioni.

Proprietà termodinamiche dell'elio liquido e dell'azoto liquido

Per avere una idea di come dovrebbero essere disposte le tubazioni di ventilazione in una sala magnete, è opportuno fare qualche considerazione sulle quantità di calore che il riscaldamento dei due criogeni comporta, e quali sia l'andamento della loro densità con la temperatura. Nelle Fig. 4 e 5 sono riportati due diagrammi, che rappresentano l'andamento delle isoterme dell'elio e dell'azoto, nel piano Pressione-Volume Specifico. Dato che l'elio si trova, praticamente, a pressione ambiente, è stata riportata l'isoterma a 4 K, perché a questa temperatura può esistere in forma liquida. Poi, è stata riportata l'isoterma a 30 K, perché a questa temperatura e a pressione ambiente l'elio ha un peso specifico uguale a quello dell'aria in condizioni normali. Infine, è riportata l'isoterma a 300 K che corrisponde, all'incirca, alla temperatura ambiente della sala magnete.

Per mezzo dei dati termodinamici dell'elio noti in letteratura [2], è possibile calcolare le quantità di calore specifiche (per unità di massa) che detto gas deve assorbire per passare, a pressione ambiente, da una temperatura all'altra. Queste quantità, riportate a latere del diagramma suddetto, si possono calcolare con il primo principio della

termodinamica nell'ipotesi ideale di trasformazioni reversibili; il lavoro termodinamico di ciascuna di esse corrisponde alle aree contrassegnate con le lettere L, G1, G2.

Come si vede, per passare dalla temperatura di 4 K in cui è liquido, alla stessa temperatura, in cui è gassoso, l'elio deve assorbire dall'ambiente in cui si trova una quantità di calore pari a 20 kJ/kg. Per passare da questo stato, alla temperatura di 30 K, deve assorbire ancora 140 kJ/kg. Da questo momento in poi il gas comincerà a dirigersi verso l'alto, per effetto della minore densità rispetto all'aria. Infine, per raggiungere la temperatura ambiente esso dovrà assorbire ancora 1404 kJ/kg.

Nel secondo diagramma di Fig. 5 è rappresentato il comportamento dell'azoto. In questo diagramma è riportata l'isoterma a 78 K, perché questa è la temperatura alla quale il liquido esiste a pressione ambiente. Poi, viene riportata una generica isoterma a 126 K e infine l'isoterma a 300 K corrispondente alla temperatura ambiente. Analogamente al caso precedente, mediante le proprietà termodinamiche dell'azoto note in letteratura [3], possiamo calcolare le quantità di calore specifiche che l'azoto deve assorbire per cambiare di stato. Per passare dallo stato liquido a quello gassoso, sempre a 78 K, l'azoto deve assorbire 198 kJ/kg relativi all'area L, corrispon-

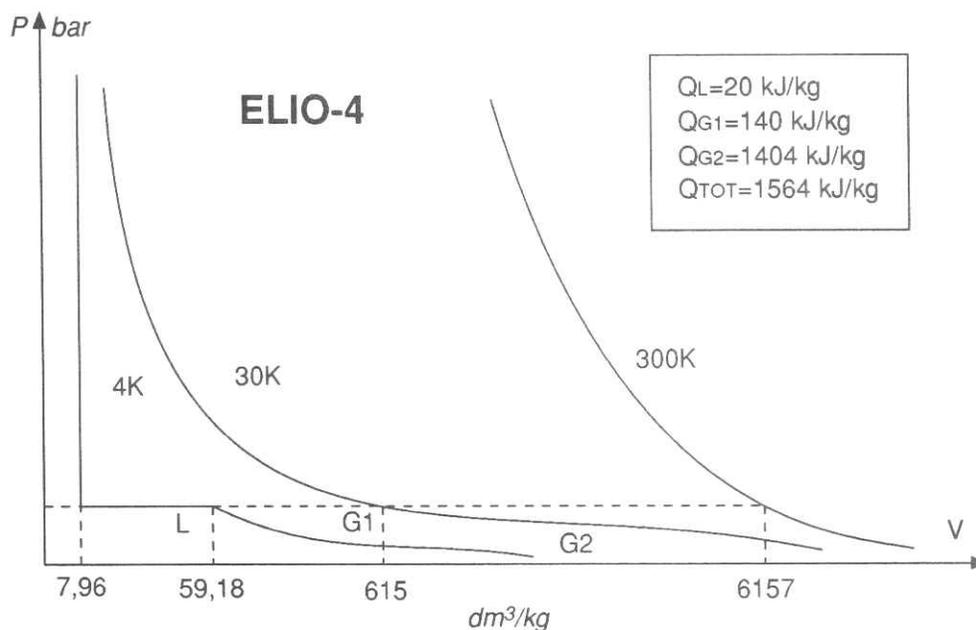


Fig. 4. - Curve isoterme dell'elio e quantità di calore necessarie a compiere le trasformazioni indicate

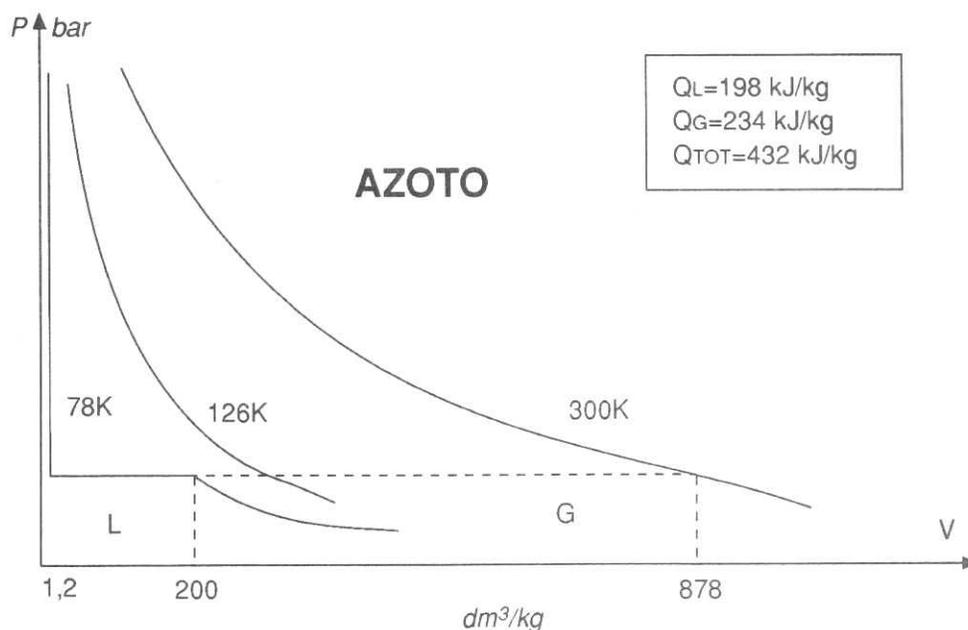


Fig. 5. - Curve isoterme dell'azoto e quantità di calore necessarie a compiere le trasformazioni indicate

dente al lavoro termodinamico di evaporazione. Per passare da questo stato fino alla condizione normale, l'azoto deve assorbire ancora 234 kJ/kg. Dal momento che l'azoto è il componente principale dell'aria ambiente, esso non potrà diventare più leggero dell'aria, come accadeva per l'elio, se la sua temperatura non supererà la temperatura ambiente. Ciò significa che eventuali perdite di azoto provenienti dal sistema criogenico, tenderanno a ristagnare in basso, formando così una zona a ridotta concentrazione di ossigeno a livello del pavimento, che tenderà a mantenersi nel tempo, se non rimossa. Questo fenomeno non può verificarsi con l'elio, se non per il breve tempo impiegato da questo a raggiungere la temperatura di 30 K.

Conseguenze delle proprietà termodinamiche dei criogeni

Da queste semplici considerazioni si comprende che, in pratica, eventuali fughe di elio tenderanno ad accumularsi verso il soffitto, mentre fughe di azoto tenderanno a ristagnare sul pavimento. Da ciò scaturisce la necessità di provvedere ad un diverso tipo di areazione degli ambienti interessati, a seconda che essi impieghino solo elio o anche azoto. Infatti, sia nel caso di normali operazioni di rabbocco dei criogeni, sia in caso di altri eventi catastrofici, è possibile ipotizzare spargimenti di questi liquidi criogenici all'interno della sala magnete. Pertanto, nel caso venga impiegato solo elio, sembra sufficiente porre le bocchette di aspirazione in un punto alto degli ambienti, in prossimità del soffitto. Se, invece, è presente anche l'azoto, sembra necessario provvedere ad installare bocchette di aspirazione anche al livello del pavimento. Le bocchette di immissione dell'aria dovrebbero essere poste, invece, ad una altezza intermedia tra pavimento e soffitto, per non mescolare l'aria immessa con i gas presenti. Un discorso analogo vale, ovviamente, per il rivelatore di ossigeno, poiché è facilmente comprensibile che una diminuzione della concentrazione di ossigeno derivante da un aumento della percentuale di azoto non potrà essere rivelata prontamente da un rivelatore posto in alto, in corrispondenza ad una bocchetta di aspirazione. Per questo motivo, sembra logico auspicare una duplicazione dei sensori di ossigeno, in modo che ognuno possa essere disposto nel punto più opportuno, a seconda del tipo di gas asfissiante potenzialmente presente.

Un discorso analogo si può fare per quanto riguarda la disposizione delle bocchette di scarico esterne, che debbono evacuare i gas criogenici al di fuori degli ambienti diagnostici, siano essi di normale ebollizione oppure di quench. Infatti il gas di "boil off" da elio, dopo aver attraversato tutta la tubazione, avrà certamente raggiunto e superato la temperatura di 30 K. Pertanto, giungendo all'aperto, tenderà a dirigersi verso l'alto. Bisognerà

quindi accertarsi che in alto, sulla verticale di detto orifizio di scarico e/o vicino ad esso, non vi siano finestre o altre aperture che possano ricondurre il fluido in altri ambienti frequentati da persone. Per il tubo di quench questa precauzione dovrà, a maggior ragione, essere verificata, curando che vi sia una notevole distanza tra l'uscita del tubo stesso e ogni altro luogo abitualmente frequentato dai lavoratori.

Per il tubo di scarico del "boil off" dell'azoto, dato che detto fluido tende a raggiungere asintoticamente la temperatura ambiente e a mantenere, quindi, un peso specifico maggiore dell'aria, è probabile che al termine della condotta esso tenda ancora a cadere verso il basso. Bisognerà, allora, assicurarsi che al di sotto di essa non vi siano recinzioni in muratura o barriere continue, finestre o altre aperture tali da favorire un rientro del gas, più denso dell'aria, in luoghi frequentati dai lavoratori. Da quanto sopra riportato, a proposito delle proprietà dei gas e del pericolo di quench, scaturisce la necessità di tenere a disposizione degli apparecchi auto-respiratori, sia per il personale addetto al travaso dei criogeni, sia per il personale eventualmente addestrato a soccorrere il paziente in caso di incidente da quench.

Norme e prescrizioni sugli impianti elettrici

Per quanto riguarda gli impianti elettrici, dato che sono installati in ambienti adibiti ad uso medico, devono essere conformi alla norma CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano) 64-4, specifica per il settore [4]. La principale caratteristica di questa norma è quella di evitare che il paziente possa essere sottoposto a micro-shock pericolosi. Volendo riassumere, possiamo dire che l'alimentazione di ogni sala deve essere prelevata da un apposito trasformatore di isolamento, in modo che nessuna parte dell'impianto elettrico sia direttamente connessa alla rete esterna. Inoltre, tutte le parti metalliche esterne delle apparecchiature che sono riconducibili alla definizione di masse elettriche e le masse estranee, devono essere collegate ad un unico Nodo Collettore Equipotenziale, a sua volta collegato a terra. Questo nodo è costituito, in genere, da una morsettiere multipla in cui ogni morsetto reca il contrassegno del rispettivo dispositivo posto a terra nella sala. Nel caso particolare della RM, questo nodo può essere posizionato sulla piastra metallica di separazione, che reca i filtri passanti dei cavi di alimentazione della sala. Il trasformatore di isolamento deve contenere, tra avvolgimento primario e secondario, uno schermo e l'isolamento del secondario deve essere costantemente monitorato. Allorché detto isolamento dovesse scendere al di sotto di un certo valore, un dispositivo automatico deve interrompere l'alimentazione, oppure, in caso tale alimentazione non possa essere interrotta, deve attivare un allarme acustico o visivo. Naturalmente, in alcuni casi la protezione può anche essere fornita da un interruttore differenziale da

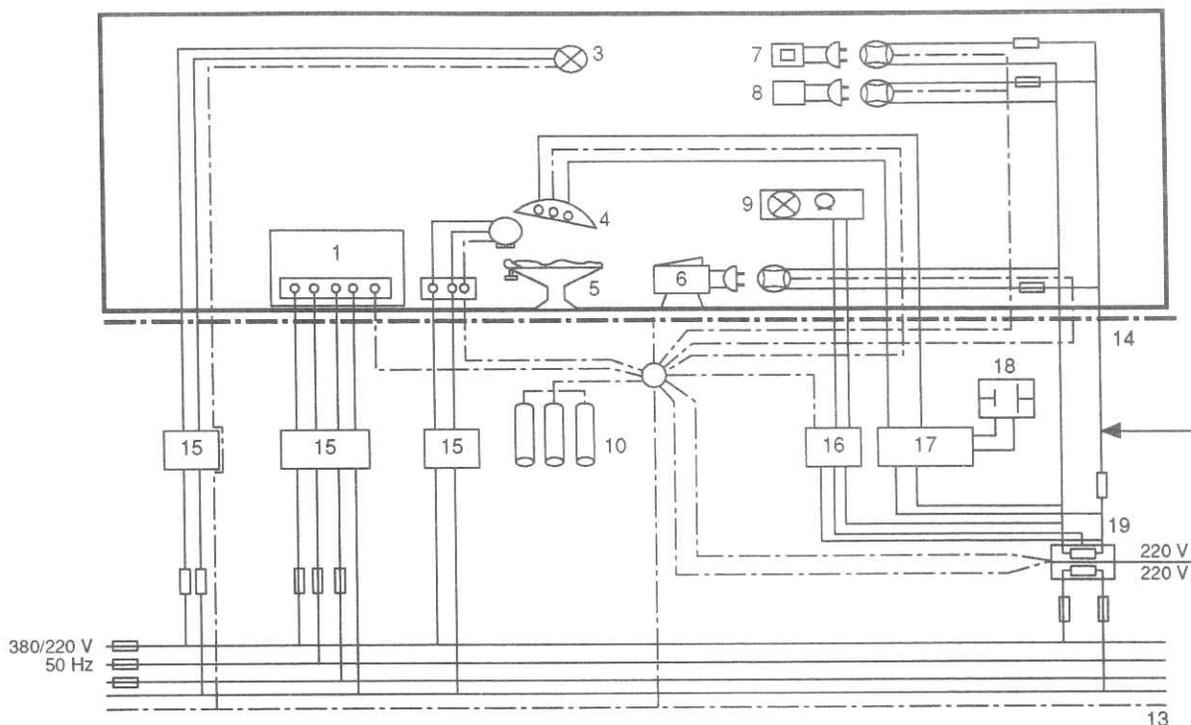


Fig. 6. - Esempio di alimentazione e di eguagliazione del potenziale

30 mA. Nella Fig. 6 è riportata una riproduzione dello schema elettrico tipico di una sala diagnostica medica, tratto dalla citata norma CEI 64-4.

La norma CEI 64-4 prevede anche il caso in cui l'ambiente stesso contenga percentuali di ossigeno superiori al normale. Per questi casi si prescrive, tra l'altro, il distanziamento delle apparecchiature elettriche dalle bocchette erogatrici di ossigeno e/o l'uso di componenti che non emettano scintille durante il normale uso. Bisogna tenere presente che, a causa della recente emanazione della terza edizione della norma di carattere generale, cioè la CEI 64-8 [5], la norma CEI 64-4 sarà certamente revisionata, in conseguenza degli importanti cambiamenti della norma generale. Il concetto informatore delle prescrizioni relative agli ambienti a maggior rischio in caso di incendio è quello di ridurre al minimo la probabilità che l'impianto elettrico sia causa di innesco di incendi.

Pertanto, un elemento essenziale, ai fini della sicurezza, è quello della distanza tra impianto elettrico e materiale combustibile, oppure quello di una particolare scelta dei materiali da impiegare. La norma CEI 64-8 prevede il caso in cui vi siano "ambienti a maggior pericolo in caso di incendio". Una delle motivazioni attribuite da questa norma al maggior pericolo è legata all'elevato danno per persone, animali e cose che l'incendio potrebbe produrre. Sotto questo punto di vista, non c'è alcun dubbio che un incendio in una sala magnetica recherebbe un rilevante danno economico, sia per il costo dell'apparecchiatura, sia per la perdita di fatturato derivante da una lunga riparazione, sia per i danni indiretti che il riscaldamento

di grosse quantità di criogeni potrebbe provocare. Per questi motivi, questa eventualità deve essere scongiurata nel più sicuro dei modi. Pertanto, come vedremo, ove la norma 64-4 dovesse recepire questo concetto, ne potrebbe conseguire la necessità di adeguare l'impianto elettrico alle disposizioni della 64-8. Infatti, in una sala diagnostica di RM l'impianto elettrico è installato, in genere, sopra la pannellatura che ricopre la gabbia di Faraday e questi pannelli sono fabbricati con materiali compositi leggeri, potenzialmente infiammabili. Anche la pavimentazione può essere fatta in materiale plastico, anche esso potenzialmente infiammabile. Poi, possono verificarsi le condizioni per la presenza di ossigeno liquido, che può essere prodotto dalla condensazione dell'aria che venisse in contatto con l'elio liquido. Come si è visto, questa eventualità può verificarsi sulle tubazioni di travaso o durante un incidente ad un dewar. È noto che l'ossigeno puro può provocare la combustione o l'esplosione, senza alcun innesco, di sostanze grasse, solventi, gomme o altro. Quindi, in una sala a RM, il rischio di incendio non deriva solo dall'impianto elettrico, ma anche da altre cause, che potrebbero, a loro volta, innescare altri focolai nell'impianto elettrico. Sarebbe quindi una buona norma quella di controllare che detti materiali siano non combustibili. In sostanza, essi dovrebbero appartenere alla classe 0 di reazione al fuoco, secondo la definizione contenuta nel DM 26/6/1984 [6]. Questo controllo è facilmente eseguibile, dato che i materiali che posseggono questo requisito devono portare il relativo marchio di conformità alla classe di reazione

al fuoco. Se l'impianto elettrico è installato sopra dei materiali combustibili, per evitare il pericolo che esso sia causa di incendio, si dovranno applicare le precauzioni citate nella norma 64-8, sezione 7. Pertanto, l'impianto potrà essere fatto in una serie di modi: ad esempio, i cavi potranno essere contenuti in canali metallici o altri materiali con grado di protezione almeno IP4X, gli interruttori di sicurezza dovranno essere posti fuori (a monte) dell'ambiente a maggior rischio in caso di incendio, etc. Sembra ovvio osservare che queste precauzioni potrebbero ben essere prese ancorché la norma 64-4 non dovesse recepire il concetto di ambiente a maggior rischio in caso di incendio, poiché un eccesso di sicurezza in un ambiente già pieno di potenziali pericoli sembra sempre auspicabile.

Infine, sempre in tema di impianto elettrico, va evidenziata l'importanza della presenza di un gruppo di intervento di rete (diverso dal gruppo di continuità), per assicurare la ventilazione della sala anche in caso di interruzione dell'alimentazione di rete. La possibilità di ripiegare su gruppi di intervento (rapido), piuttosto che su gruppi di continuità, risiede nel fatto che per i ventilatori non è necessaria una continuità dell'alimentazione di rete. Infatti, anche interruzioni di durata relativamente breve nella ventilazione non sarebbero in grado di produrre significative modificazioni nella composizione dell'atmosfera della sala.

Norme interne per il personale operante in un impianto a RM

Nessun impianto, per quanto sicuro, potrà mai evitare incidenti se gli operatori addetti non lo usano in modo adeguato. Essi dovranno essere edotti dei pericoli cui sono esposti e rispettare le norme interne di sicurezza emanate dall'esperto e rese esecutive dal datore di lavoro. Durante la normale routine esse consentiranno lo svolgersi del lavoro, evitando gli incidenti più prevedibili.

Ma la loro utilità sarà grande nel caso dei rari incidenti di cui si è parlato, se il grado di preparazione del personale consentirà di tenere sempre presenti queste remote eventualità, consentendo prontezza di intervento e determinazione, con la piena consapevolezza dei rischi che si corrono nei vari casi.

Questi fattori umani possono ottenere un massimo di efficacia se sono mantenuti attivi con esercitazioni periodiche di incidente simulato. In mancanza di ciò è prevedibile che un comportamento avventato porti a conseguenze negative. In particolare, sembra opportuno addestrare il personale all'uso dei mezzi protettivi cioè, occhiali, guanti e calzari isolanti per le normali operazioni sui criogeni e autorespiratore, in caso di incidenti con spargimento di criogeni, per trarre in salvo il paziente.

Lavoro presentato su invito.
Accettato il 14 dicembre 1993.

BIBLIOGRAFIA

1. BADINI, M.A. 1993. Nuovi modelli per le ceramiche superconduttrici. *Le scienze* **295**: 10.
2. Mc CARTY, R.D. 1972. Thermodynamic properties of helium-4 for temperatures from 2 to 1500 K with pressures to 1000 atmospheres. NBS-TN-631.
3. JACOBSEN, R.T, STEWART, R.B. & JAHANGIRI, M. 1986. Thermodynamic properties of nitrogen from the freezing line to 2000 K at pressures to 1000 MPa. *J. Phys. Chem. Ref. Data* **15**: 2.
4. COMITATO ELETTROTECNICO ITALIANO. 1964. Norma CEI 64-4, fascicolo 1501.
5. COMITATO ELETTROTECNICO ITALIANO. 1964. Norma CEI 64-8, fascicolo 1922.
6. ITALIA. 1984. DM 26/6/1984 n. 48. Classificazione di reazione al fuoco ed omologazione dei materiali ai fini della prevenzione incendi. *GU* n. 234 del 25/8/1984 4 (Suppl. Ord.).