

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI TRENTO

FACOLTÀ DI INGEGNERIA



CORSO DI STUDIO IN INGEGNERIA DEI MATERIALI

“Metallurgia dei Metalli non ferrosi”

PROF. DIEGO COLOMBO

**IL PIOMBO ED IL BISMUTO PER APPLICAZIONI NUCLEARI E AD
ALTA ENERGIA**

ANNO ACCADEMICO 2008/2009

LUCA GELISIO, 133616

INDICE

Elenco delle figure	ii
Parte 1. Il Piombo ed il Bismuto	1
1. Il Piombo	1
2. Il Bismuto	3
3. Le leghe di Piombo e Bismuto	4
Parte 2. Alcune applicazioni	5
4. Il Piombo come schermo per le radiazioni	6
4.1. La beamline MCX ad ELETTRA	10
5. Reattori nucleari raffreddati da leghe Piombo-Bismuto	14
5.1. Reattore nucleare veloce a fissione raffreddato a Piombo	15
6. Piombo e Bismuto come target in Amplificatori di Energia	17
Riferimenti bibliografici	18

ELENCO DELLE FIGURE

1.1 Configurazione elettronica del Piombo. Adattata da: [1].	1
1.2 Piombo. Adattata da: [2].	2
2.1 Configurazione elettronica del Bismuto. Adattata da: [6].	3
2.2 Bismuto. Adattata da: [7].	4
3.1 Diagramma di fase binario Bismuto-Piombo. Da: [20].	5
4.1 Diagramma di penetrazione. Da: [10].	7
4.2 Camera in Piombo. Da:[13].	8
4.3 Mattoni di Piombo. Da:[14].	9
4.4 Grembiule piombato. Adattato da:[15].	9
4.5 Schema di Elettra. Da:[17].	10
4.6 Schema della linea. Da:[17].	11
4.7 Schema del sistema ottico della linea. Da:[17].	11
4.8 Schema dettagliato della linea. Adattato da:[17].	12
4.9 Camera da vuoto.	13
4.10 Sistemi di protezione dello scintillatore.	13
5.1 Reattore veloce raffreddato a Piombo. Da: [24].	16

SOMMARIO. Il Piombo ed il Bismuto sono largamente utilizzati in applicazioni nucleari, per esempio come mezzo refrigerante, ed in applicazioni ad alta energia, come schermi per radiazioni ionizzanti. Ciò è dovuto ad alcune proprietà fisiche di questi metalli, che verranno discusse in seguito.

Parte 1. Il Piombo ed il Bismuto

E' necessario iniziare, dunque, con una panoramica sulle proprietà fisico-chimiche degli elementi oggetto di studio, che determinano l'impiego sopraccitato di questi.

1. IL PIOMBO

Il Piombo, il cui nome deriva dal latino *plumbum*, è l'elemento chimico stabile con numero atomico più elevato, 82. Nella tavola degli elementi, è indicato dal simbolo *Pb* ed appartiene al quattordicesimo gruppo ed al sesto periodo, metallo del blocco *p*. La sua configurazione elettronica è $[Xe] 4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^2$, ed è visibile in Fig. 1.1; gli stati d'ossidazione permessi sono 2 e 4. Il Piombo pesa 207.2 amu , ha raggio 175 pm e raggio di Van der Waals 202 pm . Allo stato solido gli atomi si arrangiano in cella cristallina cubica a facce centrate, *fcc*.

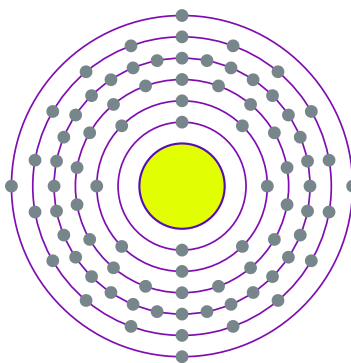


FIGURA 1.1. Configurazione elettronica del Piombo. Adattata da: [1].

In natura, esiste come mistura di quattro isotopi stabili, ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb e ^{208}Pb la cui abbondanza relativa è, rispettivamente, 1.48%, 23.6%, 22.6% e 52.3%. Alcuni isotopi

del Piombo sono il prodotto finale di catene di decadimento. In particolare, ^{206}Pb , ^{207}Pb e ^{208}Pb sono il risultato della catena, rispettivamente, ^{238}U , ^{235}U e ^{232}Th con emivite 4.47×10^9 , 7.04×10^8 e 1.4×10^{10} anni.

Per quanto concerne le proprietà fisiche, la densità, nei pressi della temperatura ambiente, è circa $11.34 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Fonde a 600.61 K e bolle a 2022 K ; i calori di fusione ed evaporizzazione sono, rispettivamente, $4.77 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ e $179.5 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$. Il calore specifico, a 25°C , è di $26.65 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, la resistività elettrica a 20°C è di $208 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$ e la conducibilità termica a 27°C è di $35.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Dal punto di vista delle proprietà meccaniche, il modulo di elasticità è 16 GPa , il coefficiente di Poisson 0.44 e le durezza Mohs e Brinell, rispettivamente, 1.5 e 38.3 MPa . Oltre ad essere molto tenero, il Piombo è duttile, malleabile e resistente alla corrosione.



FIGURA 1.2. Piombo. Adattata da: [2].

Generalmente viene estratto insieme a Zinco, Argento e Rame: il più importante minerale del Piombo è la *galena* (PbS), che ne contiene l'86.6%. Sono comuni inoltre la *cerussite* (PbCO_3) e l'*anglesite* (PbSO_4). Tuttavia, la maggior quota di Piombo proviene oggi dal riciclaggio.

Per concludere, il Piombo ed i suoi composti sono tossici per inalazione ed ingestione:

essi provocano un avvelenamento detto *saturnismo*. Questo metallo può danneggiare il sistema nervoso e causare malattie del cervello e del sangue. Una lista completa degli effetti nocivi di questo metallo è reperibile in [5].

2. IL BISMUTO

Il Bismuto è l'elemento chimico avente numero atomico 83. Nella tavola periodica degli elementi, è indicato dal simbolo *Bi* ed appartiene al quindicesimo gruppo ed al sesto periodo, metallo del gruppo *p*. Il ^{209}Bi , unico isotopo naturale, è leggermente radioattivo ed ha emivita per decadimento α pari ad 1.9×10^{19} anni, tempo oltre un milione di volte superiore alla stima dell'età dell'Universo. Questo elemento può quindi essere considerato l'elemento stabile avente numero atomico più elevato. La configurazione elettronica del Bismuto è $[\text{Xe}] 4f^{14} 5d^{10} 6s^2 6p^3$, ed è visibile in Fig. 2.1; gli stati d'ossidazione permessi sono 3 e 5. Il Piombo pesa 209.0 amu , ha raggio 154 pm e raggio di Van der Waals 207 pm . Allo stato solido gli atomi si arrangiano in cella cristallina romboedrica.

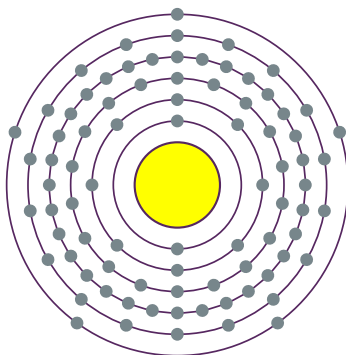


FIGURA 2.1. Configurazione elettronica del Bismuto. Adattata da: [6].

Per quanto concerne le proprietà fisiche, la densità, nei pressi della temperatura ambiente, è circa $9.78 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Fonde a 544.7 K e bolle a 1837 K ; i calori di fusione ed evaporizzazione sono, rispettivamente, $11.31 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ e $151 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$. Il calore specifico, a 25°C , è di $25.52 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, la resistività elettrica a 20°C è di $1.29 \mu\Omega \cdot \text{m}$, la più

elevata di tutti i metalli, e la conducibilità termica a $27^{\circ}C$ è di $7.97 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, in natura la più bassa se si esclude quella del Mercurio.

Dal punto di vista delle proprietà meccaniche, il modulo di elasticità è $32 GPa$, il coefficiente di Poisson 0.33 e le durezza Mohs e Brinell, rispettivamente, 2.25 e $94.2 MPa$. Il Bismuto è duro e fragile ed è in assoluto il metallo più diamagnetico. E' uno delle poche sostanze la cui fase liquida è più densa della solida.

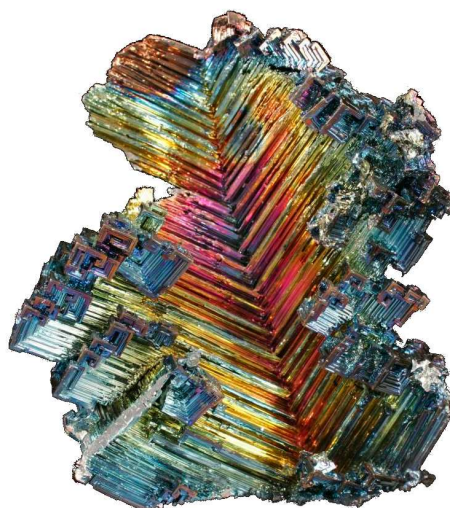


FIGURA 2.2. Bismuto. Adattata da: [7].

Il Bismuto è molto meno tossico dei suoi vicini nella tavola periodica. E' usato principalmente nel campo farmaceutico e per preparare leghe a basso punto di fusione come quelle per i fusibili.

3. LE LEGHE DI PIOMBO E BISMUTO

Tutte le leghe Piombo-Bismuto con composizione tra il 30% ed il 75% in peso di Piombo possiedono punto di fusione inferiore ai $200^{\circ}C$. La Fig. 3.1 mostra il diagramma di fase binario del sistema Bismuto-Piombo. Tale diagramma mostra chiaramente un punto eutettico quando la percentuale in peso del Piombo è pari al 44.5%. A questo valore di composizione, il sistema fonde a $123.5^{\circ}C$ e bolle a $1670^{\circ}C$.

In corrispondenza di questo punto, poiché il Piombo si espande leggermente fondendo ed il Bismuto si contrae lievemente, la variazione di volume dovuto al cambiamento di stato è trascurabile.

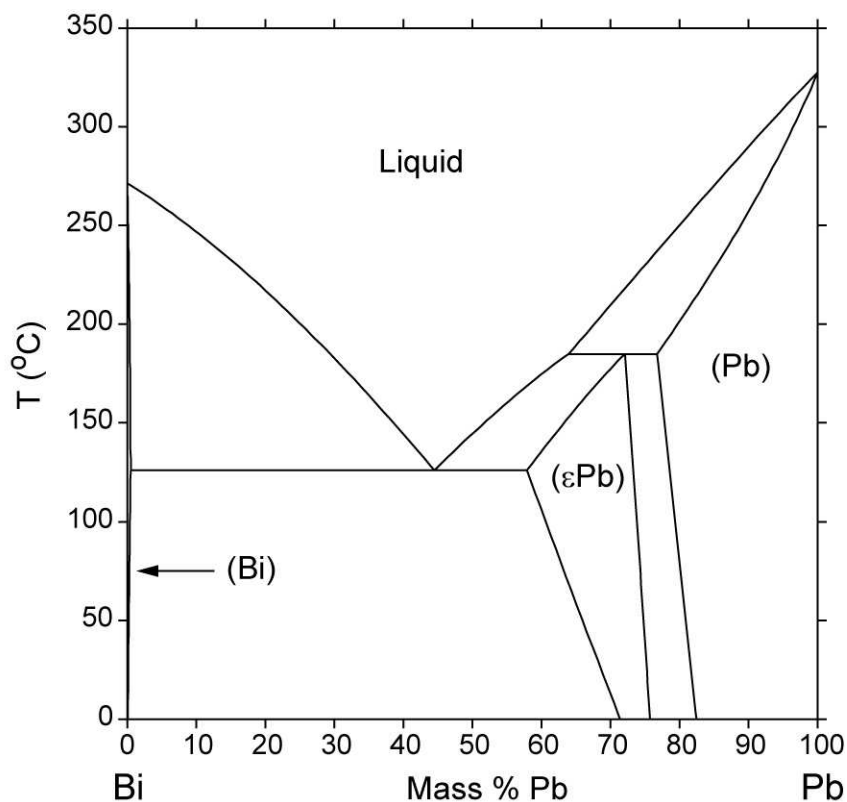


FIGURA 3.1. Diagramma di fase binario Bismuto-Piombo. Da: [20].

Questo eutettico fu inizialmente impiegato come mezzo refrigerante sui reattori nucleari dei sottomarini sovietici *Lira*, comunemente noti come classe *Alfa*, durante la Guerra Fredda. Tali reattori erano in grado di erogare 155 MW di potenza, capaci di muovere 3200 ton di metallo a circa 41 nodi sotto la superficie del mare.

Parte 2. Alcune applicazioni

Dopo aver dettagliatamente descritto i due elementi oggetto di studio e le loro leghe, verranno ora forniti alcuni esempi d'applicazione, attuali e potenziali.

4. IL PIOMBO COME SCHERMO PER LE RADIAZIONI

La *protezione dalle radiazioni* è la scienza di proteggere l'ambiente e le persone dagli effetti devastanti delle radiazioni ionizzanti. Queste consistono di particelle subatomiche od onde elettromagnetiche aventi energia sufficiente da ionizzare atomi o molecole. Esempi di particelle ionizzanti sono le α , le β ed i neutroni; esempi di onde elettromagnetiche sono i raggi UV ad alta frequenza, i raggi x ed i γ .

Queste radiazioni derivano dai materiali radioattivi, dagli acceleratori di particelle, dai tubi per la produzione di raggi x e sono presenti nell'ambiente. L'esposizione a questi può causare danni ai tessuti viventi, bruciature, tumore e danni genetici a bassi dosaggi e morte ad elevati dosaggi.

L'esposizione a radiazione è controllata dalla combinazione di tre fattori: tempo, distanza e schermatura. La riduzione del *tempo* di esposizione riduce la dose efficace assorbita proporzionalmente mentre l'aumento della *distanza* riduce la dose con l'inverso del quadrato. La *schermatura*, discussa in seguito, riduce la dose assorbita esponenzialmente con lo spessore dello schermo.

Così come esistono diversi tipi di radiazione, aventi diverse caratteristiche, esistono anche diverse metodologie di protezione da queste. Le particelle di tipo α , nuclei di Elio, sono le meno penetranti e possono essere stoppate da un singolo foglio di carta; le β , elettroni, penetrano di più ma possono comunque essere assorbite da alcuni millimetri di Alluminio. L'aggiunta di materiali a bassa densità è necessaria in caso gli elettroni siano particolarmente energetici. In caso le particelle β posseggano carica positiva, ovvero siano positroni, bisogna considerare anche la radiazione γ derivante dall'annichilazione elettrone-positrone. I neutroni sono assorbiti dai nuclei atomici in una reazione nucleare. Le proprietà ionizzanti della radiazione elettromagnetica dipendono dalla frequenza dell'onda considerata.

In particolare, le radiazioni α e γ , di frequente utilizzo nella scienza ed ingegneria dei materiali, sono meglio assorbite da atomi con nuclei pesanti; più pesante è l'atomo, maggiore è l'assorbimento. Va infine notato che una scelta non opportuna del materiale schermante può addirittura amplificare gli effetti dannosi delle radiazioni, a causa di interazioni con il materiale stesso.

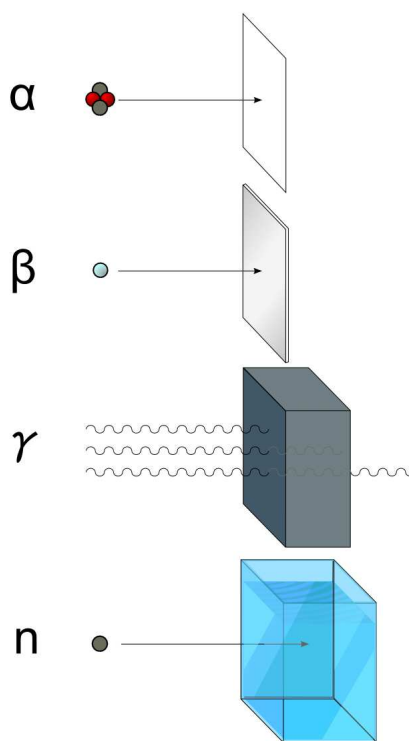


FIGURA 4.1. Diagramma di penetrazione. Da: [10].

E' intuitivo comprendere che quanto più la materia è concentrata all'interno di un dato volume, tanto più è probabile che all'interno di questo abbia luogo l'assorbimento di una particella vagante. L'elevata densità del Piombo, unito al fatto che esso è molto stabile dal punto di vista nucleare, in quanto prodotto di una catena naturale di decadimento, lo rende quindi adatto ad essere utilizzato come schermo per le radiazioni.

La Tab. 1 riporta lo spessore di dimezzamento della radiazione γ di alcuni materiali e la densità degli stessi. Con il termine spessore di dimezzamento si intende lo spessore di materiale necessario per ridurre della metà l'intensità della radiazione che passa attraverso di esso.

Materiale	Spessore di dimezzamento [cm]	Densità [$g \cdot cm^{-3}$]
Uranio impoverito	0.2	19.1
Piombo	1.0	11.3
Acciaio	2.5	7.86
Cemento	6.1	3.33
Legno	29	0.56
Aria	15000	0.0012

TABELLA 1. Spessori di dimezzamento di alcuni materiali. Da: [28].

Il Piombo è estremamente efficace nello stoppare radiazioni α , γ ed x . Tuttavia, l'interazione con elettroni ad elevata energia, incluse le particelle β , può generare radiazione di frenamento, potenzialmente più dannosa di quella originale. Inoltre, il Piombo non è un buon assorbitore di neutroni.



FIGURA 4.2. Camera in Piombo. Da:[13].

Il Piombo è utilizzato per schermare macchine per i raggi x , impianti nucleari, laboratori ed altri luoghi in cui il vengono prodotte radiazioni ionizzanti.

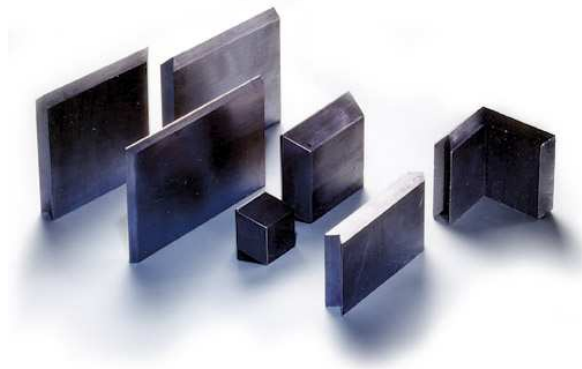


FIGURA 4.3. Mattoni di Piombo. Da:[14].

Esistono diversi tipi di schermature, utilizzate sia per proteggere (i) le persone che per (ii) proteggere esperimenti ed equipaggiamenti. Alla prima categoria appartengono, per esempio, i grembiuli piombati, visibili in Fig. 4.4, utilizzati, in ospedale, per proteggere i pazienti dalle radiazioni x . Sono inoltre piombati protezioni della tiroide e guanti.



FIGURA 4.4. Grembiule piombato. Adattato da:[15].

Per quanto riguarda la protezione degli strumenti da laboratorio, vengono utilizzati, per esempio, mattoni di Piombo, visibili in Fig. 4.3 od, in generale, lastre e fogli per il contenimento delle radiazioni ionizzanti.

4.1. La beamline MCX ad ELETTRA. Gli esempi d'utilizzo del Piombo come attenuatore di radiazioni ionizzanti sono potenzialmente infiniti. Questo caso di studio è stato scelto in quanto la storia della beamline in oggetto è legata a questa Università. Essa utilizza la radiazione di sincrotrone prodotta dal fascio elettronico in transito in un magnete curvante, installato sull'anello di accumulazione di terza generazione presso il laboratorio internazionale multidisciplinare Elettra, a Trieste.

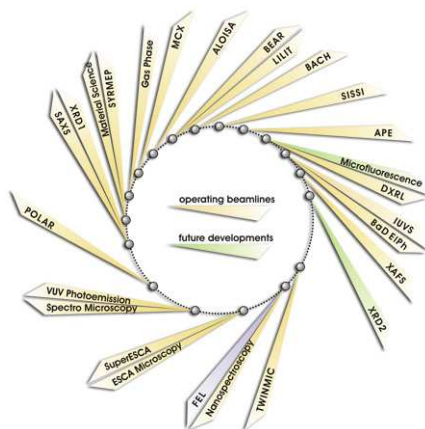


FIGURA 4.5. Schema di Elettra. Da:[17].

La luce di sincrotrone è la radiazione elettromagnetica generata da particelle cariche, in questo caso elettroni, che viaggiano a velocità relativistiche e sono deflessi da campi magnetici.

La linea *Materials Characterisation by X-ray diffraction* (MCX) permette di praticare esperimenti di diffrazione come analisi di tessitura e tensioni residue, misure in condizione di incidenza radente, identificazione strutturale e di fase, studi di cinetica ed altri.

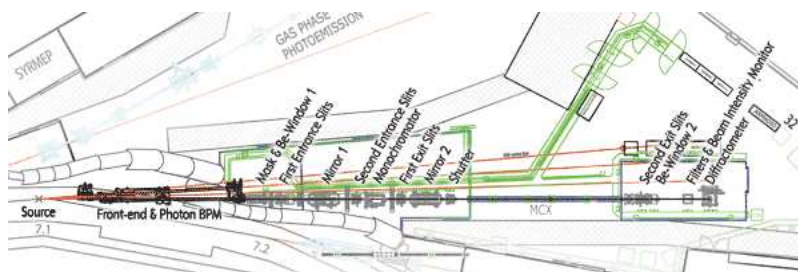


FIGURA 4.6. Schema della linea. Da:[17].

Il sistema ottico della linea consiste in due specchi ed un monocromatore. Lo specchio più vicino alla sorgente è cilindrico, rivestito di Platino, ed è necessario per collimare il fascio sul doppio cristallo monocromatore orizzontale in Silicio (*111*), in configurazione 1:1. Il secondo specchio, rivestito di Platino anch'esso, ha raggio di curvatura variabile, da infinito a 6 km.

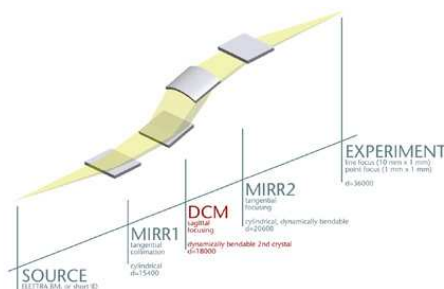


FIGURA 4.7. Schema del sistema ottico della linea. Da:[17].

Le caratteristiche della sorgente di luce e dei raggi X al campione sono riassunte, rispettivamente, in Tab. 2 ed in Tab. 3.

	2.0 GeV	2.4 GeV
Tipo	Magnete curvante	
Energia critica	3.2 keV	5.5 keV
Dimensione della sorgente	$s_x = 0.139 \text{ mm}$	$s_x = 0.197 \text{ mm}$
	$s_y = 0.028 \text{ mm}$	$s_y = 0.030 \text{ mm}$
	$s_{y'} = 0.009 \text{ mrad}$	$s_{y'} = 0.013 \text{ mrad}$
Divergenza orizzontale del fascio	2.0 mrad	

TABELLA 2. Caratteristiche della sorgente di luce. Da: [17].

La strumentazione standard è basata su un diffrattometro a quattro cerchi con supporto per il campione in grado di traslare nelle direzioni x , y e z ed uno scintillatore per la misura dell'intensità diffratta.

Intervallo d'energia	$8 \div 23 \text{ keV}$, $2.1 \div 23 \text{ keV}$ in Elio
Risoluzione in energia	$\frac{\Delta E}{E} = 2 \times 10^{-4}$
Flusso di fotoni	$10^{11} \frac{\text{fotoni}}{\text{sec}}$
Dimensione del fascio	da $10 \times 1 \text{ mm}^2$ a $1 \times 1 \text{ mm}^2$

TABELLA 3. Caratteristiche dei raggi X al campione. Da: [17].

Per quanto riguarda la radioprotezione, la Fig. 4.8 testimonia il largo impiego del Piombo. In particolare, le linee verticali rosse rappresentano degli schermi fatti di questo metallo, utilizzati in varie sezioni della linea.

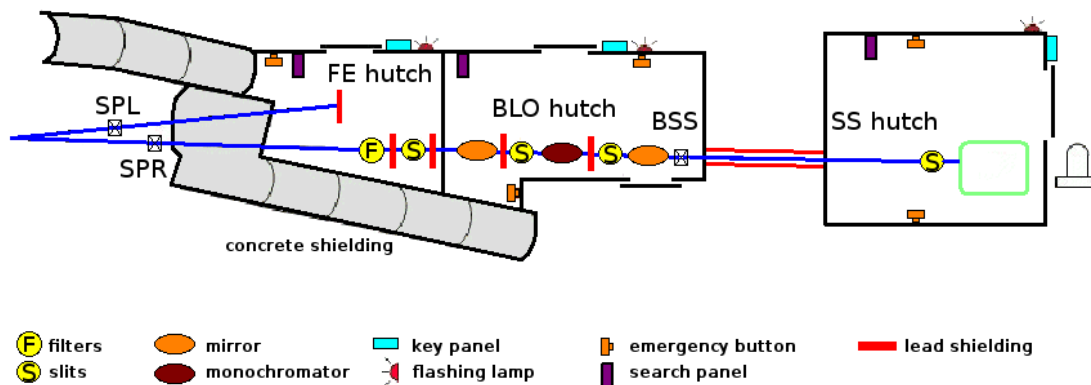


FIGURA 4.8. Schema dettagliato della linea. Adattato da:[17].

Anche la camera da vuoto, visibile in Fig. 4.9, è schermata con Piombo.



FIGURA 4.9. Camera da vuoto.

La Fig. 4.10, a sinistra, mostra come viene schermato lo scintillatore dalla radiazione che non sia quella diffratta durante un esperimento. A destra, il cappuccio protettivo che viene applicato allo scintillatore quando non utilizzato.

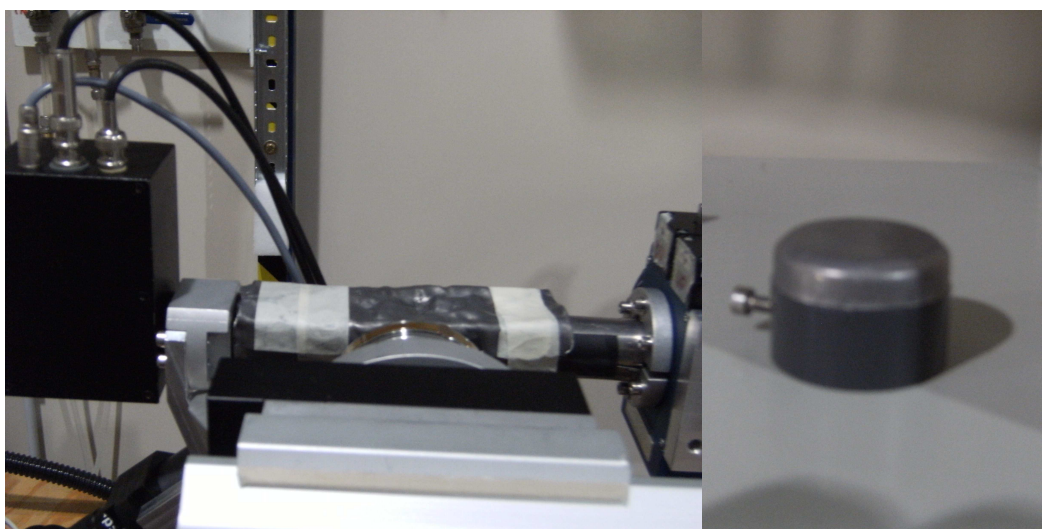


FIGURA 4.10. Sistemi di protezione dello scintillatore.

5. REATTORI NUCLEARI RAFFREDDATI DA LEGHE PIOMBO-BISMUTO

Un mezzo refrigerante in un reattore nucleare serve per rimuovere il calore dal cuore del reattore e trasferirlo ai generatori elettrici e all'ambiente. Generalmente si utilizzano due cicli refrigeranti in quanto il liquido nel primo diviene radioattivo a breve termine.

Quasi tutti i reattori oggi operanti sono ad *acqua leggera*, in cui normale acqua ad alta pressione funge sia da refrigerante che da moderatore di neutroni. Di questi, circa un terzo sono ad *acqua bollente*, nei quali il refrigerante nel circuito primario bolle divenendo vapore dentro il reattore. I restanti due terzi sono reattori ad *acqua pressurizzata*, in cui l'acqua è pressurizzata a valori ancora superiori al primo caso.

I sali fusi posseggono bassa pressione di vapore e quelli contenenti elementi leggeri come *FLiBe* fungono anche da moderatore. Anche l'Elio è stato utilizzato come mezzo refrigerante. Esso è inerte sia dal punto di vista chimico che dal punto di vista delle reazioni nucleari ma possiede bassa capacità termica. I reattori veloci, in cui i neutroni emessi dalle fissioni non vengono moderati, sono raffreddati da metalli liquidi, generalmente Sodio fuso. Anche il Piombo e le sue leghe sono stati proposti come mezzo refrigerante, ed occasionalmente utilizzati.

Per ciò che concerne i *vantaggi*, se confrontato con metalli liquidi refrigeranti a base di Sodio, come *NaK* od il Sodio stesso, i refrigeranti a base Piombo posseggono punti d'ebollizione nettamente superiori. Questo permette al reattore di operare a temperature più elevate, aumentando il rendimento termico dello stesso e sopportando eventuali anomalie. Inoltre, il *Pb* e le leghe *Pb - Bi* non reagiscono direttamente con acqua o aria, al contrario di *NaK* e Sodio, che si accendono spontaneamente in aria e reagiscono esplosivamente con l'acqua. Quindi, questi ultimi necessitano di un sistema di raffreddamento intermedio, che determina un aumento dei costi.

Come già discusso, il Piombo è un eccellente schermo per le radiazioni γ ed è praticamente

trasparente ai neutroni. Al contrario il Sodio, se bombardato intensamente con neutroni, origina il ^{24}Na , avente emivita 15 ore e decadimento con emissione di un elettrone e due raggi γ . Quindi, il circuito di raffreddamento primario in quest'ultimo caso dovrà essere schermato.

In ultimo, il vantaggio dei refrigeranti appena discussi sull'acqua è il più elevato punto di ebollizione. Questo significa che non è necessario pressurizzare il reattore, come occorre fare nel caso dell'acqua. La sicurezza del sistema risulta migliorata in quanto è ridotta la probabilità di perdita di parte del mezzo refrigerante.

Per ciò che concerne gli *svantaggi*, il Piombo e, particolarmente, le leghe Piombo-Bismuto, sono più corrosivi nei confronti dell'acciaio rispetto al Sodio. Inoltre, la temperatura di fusione di quest'ultimo, 97.72°C , è inferiore a quella del Pb e dell'eutettico $\text{Pb} - \text{Bi}$. Quindi, in caso di operazioni del reattore a bassa temperatura, il mezzo refrigerante può solidificare. Infine, il Bismuto in lega illuminato da un fascio di neutroni può formare Polonio per decadimento β . Il Polonio, radioattivo, emette particelle α e rende perciò necessario l'uso di precauzioni durante il rifornimento di refrigerante.

Dopo questa panoramica introduttiva, è fornito un esempio di reattore in fase di sviluppo che impiegherà le leghe di Piombo come mezzo refrigerante.

5.1. Reattore nucleare veloce a fissione raffreddato a Piombo. Il *reattore a fissione veloce raffreddato a Piombo* è un reattore nucleare di *IV Generazione* che utilizza come mezzo refrigerante Piombo fuso o l'eutettico Piombo-Bismuto con ciclo chiuso.

Un reattore veloce è caratterizzato dal fatto che la catena di fissione è sostenuta da neutroni veloci. Non è quindi necessario un mezzo moderatore.

Secondo [27], la scelta del Piombo fuso aumenta la sicurezza in quanto relativamente inerte. In termini di sostenibilità, questo elemento è abbondante e quindi disponibile anche in caso di impiego di un numero elevato di reattori.

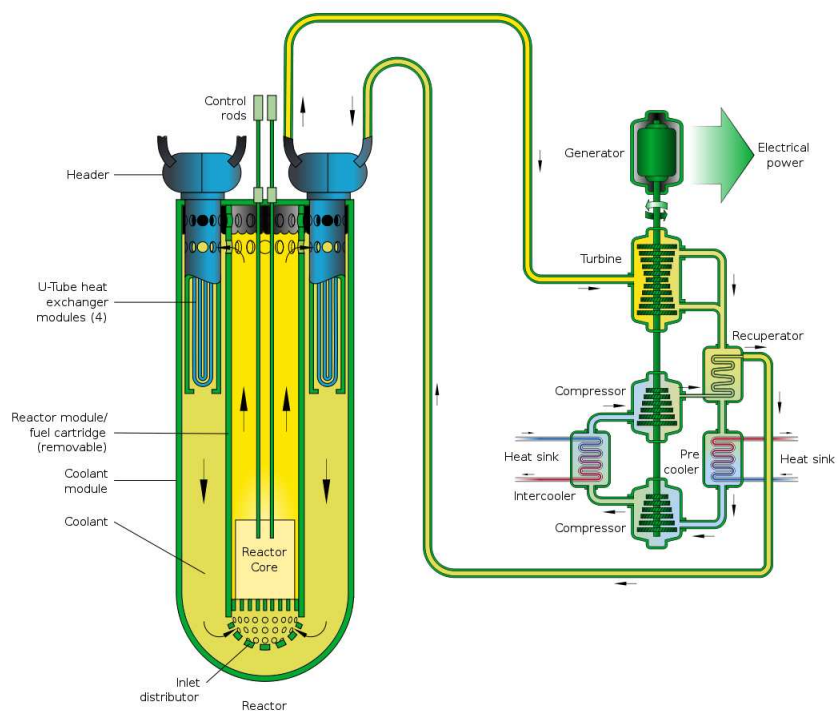


FIGURA 5.1. Reattore veloce raffreddato a Piombo. Da: [24].

Nel dettaglio, la catena può essere sostenuta da neutroni veloci in quanto il Piombo ha una sezione d'assorbimento molto piccola: l'efficienza del combustibile è quindi elevata e si riduce la produzione di scorie altamente radioattive. Per quanto riguarda l'economicità, il Piombo costa poco e così il ciclo refrigerante in quanto questo elemento non reagisce con l'acqua e non brucia in aria.

Ovviamente è importante considerare la sicurezza di questa tipologia di reattori. Come già accennato, il Piombo ha elevato punto d'ebollizione, tensione di vapore e capacità schermanti nei confronti dei raggi γ . Inoltre, questo elemento trattiene i prodotti di fissione rilasciati dal nucleo. L'ultima considerazione riguarda la probabilità di danneggiamento del nucleo: essa è molto bassa in quanto il Piombo ha buone caratteristiche di trasferimento del calore ed elevata capacità termica.

6. PIOMBO E BISMUTO COME TARGET IN AMPLIFICATORI DI ENERGIA

Per concludere, è interessante citare anche gli Amplificatori di Energia (AE). Questi sono reattori nucleari *subcritici*, caratterizzati dall'incapacità di continuare autonomamente la reazione a catena senza una fonte esterna di neutroni.

Questi provengono dal processo di spallazione: bombardando un elemento pesante come Piombo o Bismuto con protoni ad elevata energia provenienti, per esempio, da un sincrotrone, essi emettono un gran numero di neutroni. L'enorme vantaggio, dal punto di vista della sicurezza, di questi reattori è che spegnendo l'acceleratore di particelle la reazione termina.

Esiste inoltre una variante agli AE, che permette di bruciare residui radioattivi a lunga vita al fine di ridurre la pericolosità previo bombardamento neutronico.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] <http://en.wikipedia.org/wiki/Lead>
- [2] <http://dsc.discovery.com/tv/how-stuff-works/lead.html>
- [3] <http://periodic.lanl.gov/elements/82.html>
- [4] <http://www.americanelements.com/pb.html>
- [5] <http://www.infointossicazione.it/diagnosi/intossicazioni-da-metalli-pesanti/59-effetti-del-piombo.html>
- [6] <http://it.wikipedia.org/wiki/Bismuto>
- [7] <http://www.periodictable.com/Elements/083/index.html>
- [8] dispense del corso "Corso sulla protezione delle radiazioni ionizzanti", Università degli Studi di Roma "Tor Vergata", 2009
- [9] <http://www-naweb.iaea.org/nahu/dmrp/faqanswers.shtm>
- [10] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alfa_beta_gamma_neutron_radiation_M1.PNG
- [11] http://en.wikipedia.org/wiki/Radiation_shield
- [12] http://en.wikipedia.org/wiki/Ionizing_radiation
- [13] <http://www.gravitagroup.com/lead-for-radiation-shielding.asp>
- [14] http://wardray-premise.com/images/products/large/materials/lead_bricks.jpg
- [15] http://www.dremed.com/catalog/product_info.php/products_id/334
- [16] http://www.lngs.infn.it/lngs_infn/index.htm?mainRecord=http://www.lngs.infn.it/lngs_infn/contents/lngs_en/publ
- [17] <http://www.elettra.trieste.it/>
- [18] A.V. Zrodnikov, O.G. Grigoriev, V.I. Chitaykin, A.V. Dedoul, B.F. Gromov, G.I. Toshinsky, Yu.G. Dragunov, "Multipurposed small fast reactor SVBR-75/100 cooled by plumbum-bismuth". Proceedings, International Working Group on Fast Reactors (Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency), pp. 322-335 (2001).
- [19] <http://www.nea.fr/html/science/reports/2007/nea6195-handbook.html>, "Handbook on Lead-bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies", OECD Nuclear Energy Agency, France (2007)
- [20] <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/bipb.html>
- [21] Advanced Reactor Technology, "Design of an Actinide Burning, Lead-Bismuth Cooled Reactor That Produces Low Cost Electricity", U.S.A. Department of Energy (1999)

[22] http://en.wikipedia.org/wiki/Alfa_class_submarine

[23] <http://en.wikipedia.org/wiki/LBE>

[24] http://en.wikipedia.org/wiki/Lead_cooled_fast_reactor

[25] http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_reactor_coolant

[26] <http://www.world-nuclear.org/info/inf98.html>

[27] <http://www.gen-4.org/Technology/systems/lfr.htm>

[28] http://it.wikipedia.org/wiki/Reattore_subcritico

[29] <http://192.107.61.51/ADS/frame.html>