

Massimo Zucchetti (*) (**), Manuela Zublena (***)

(*) Politecnico di Torino, C. Duca Abruzzi 24, Torino

(**) C.C.R. Comunità Europea, Ispra (VA)

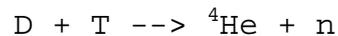
(***) Protezione Civile, Regione Val D'Aosta

**UTILIZZO DEL TITANIO COME LEGANTE IN ACCIAI A BASSA ATTIVAZIONE
PER REATTORI A FUSIONE NUCLEARE.**

1 - INTRODUZIONE

La selezione di materiali strutturali più idonei per l'utilizzo in una macchina a fusione è uno dei problemi più interessanti per l'ingegneria dei reattori a fusione; particolarmente delicata risulta la scelta per la prima parete, cioè quella parte di struttura direttamente esposta al plasma.

Il flusso di neutroni da 14 MeV originati dalla reazione di fusione:



interagisce con le strutture (prima parete, mantello, schermo, magneti), provocando la creazione di isotopi radioattivi; ciò risulta sgradito sia durante la vita del reattore (necessità di schermaggio e di manutenzione remota) che dopo lo spegnimento (calore di decadimento e smaltimento dei rifiuti radioattivi) (1).

Risulta perciò necessario considerare dei materiali che abbiano adeguate caratteristiche nucleari, oltre che meccaniche e fisiche; fra i vari elementi considerati come possibili componenti delle leghe, occorre quindi privilegiare per quanto possibile quelli che, sottoposti a flusso neutronico, presentino le minori quantità di radioattività indotta (2).

2 - IL TITANIO NELLA RICERCA SUI MATERIALI PER LA FUSIONE

Dall'inizio degli anni '80, la ricerca sui materiali strutturali per l'utilizzo in reattori a fusione si è orientata principalmente su quattro classi di leghe (3).

- acciai austenitici
- acciai ferritici
- leghe Fe-Ni-Cr
- leghe al Ti e V

Queste ultime sono in prospettiva le più promettenti, ed hanno già avuto una precedente esperienza di utilizzo come rivestimento di combustibile per reattori veloci, nonché per impieghi aerospaziali (4).

La lega binaria V-20Ti è di facile fabbricabilità ed in reattori veloci ha dato buoni risultati; ha tuttavia scarsa resistenza ad alta temperatura (5).

La lega V-15Cr-5Ti è la più studiata (6,7,8,9) e presenta rispetto alla precedente una migliore resistenza al creep; entrambe hanno una buona resistenza alla corrosione in presenza di Litio, del quale si prevede l'utilizzo come fertilizzante e refrigerante (3).

In tab. 1 sono elencate alcune leghe al titanio valutate per l'impiego in prima parete di reattori a fusione; esse si distinguono per una buona resistenza al creep, alla corrosione e agli stress termici ciclici (3).

Al momento, l'utilizzo per la prima parete di materiali differenti dagli acciai è comunque ancora in fase di studio, così come fra gli acciai sembrano prevalere per il breve termine gli austenitici.

Per il costruendo reattore europeo NET, infatti, la scelta è caduta sull' acciaio AISI316L, essenzialmente per la completa base di dati a disposizione sulle sue caratteristiche (10).

Fra gli impieghi del titanio come legante sono inoltre da segnalare alcune leghe al titanio considerate come possibile materiale strutturale per i magneti superconduttori nei reattori a fusione. Si tratta di alcune superalloys (11) la cui composizione è riportata in tab. 2.

In queste leghe il titanio, unitamente a Nb e Al, funge da elemento indurente: si ottiene la precipitazione di una fase intermetallica ordinata Ni_3M ($M=Ti,Al,Nb$).

Il titanio è infine presente come legante in alcuni acciai considerati in diversi studi per l'utilizzo come materiale strutturale per la prima parete in reattori a fusione. Fra questi il più notevole è senz'altro il PCA (Prime Candidate Alloy), acciaio austenitico elaborato appositamente negli USA per l'utilizzo in campo fusionistico (tab. 3).

L'effetto legante del titanio è ben noto; esso è un forte stabilizzatore della ferrite e promuove la formazione di carburi (TiC). La sua presenza nella PCA si spiega appunto con la volontà di ottenere il TiC ; è stato infatti verificato come, attraverso un meccanismo di intrappolamento dell'elio all'interfaccia del carburo, il titanio abbia una forte azione di soppressione dello swelling in acciai irraggiati (3).

L'onset dello swelling negli acciai inossidabili austenitici, in genere compreso fra i 10 e i 50 dpa, può venire appunto ritardato stabilizzando la microstruttura della lega con l'aggiunta di piccole quantità di titanio.

La PCA contenente lo 0.2-0.4% di titanio, presenta l'onset dello swelling attorno a valori di 60-75 dpa, a seconda della

temperatura di irraggiamento (12). Inoltre, la presenza di titanio ha migliorato pure la resistenza al creep ed all'infragilimento.

Altri acciai contenenti titanio sono riportati in tab. 3, confrontati con l'AISI316L (13-15). Sia l'acciaio JPCA (Japanese Prime Candidate Alloy) che gli altri si avvalgono dell'effetto di soppressione dello swelling del titanio.

E' stato anche indagato il comportamento dell'acciaio AISI316L qualora ad esso vengano aggiunte piccole quantità di Ti, V o Zr (tab. 4) (16) .

Si è notato come l'aggiunta di circa lo 0.2% in peso di titanio, sopprime sensibilmente la formazione di vuoti; in fig. 1 si può notare come l'essenza di vuoti negli acciai con titanio si risolva in uno swelling assolutamente inavvertibile. Discreti risultati ha anche fornito lo Zr, mentre si vede come il V funga invece da esaltatore del fenomeno.

3 - RADIOATTIVITA' INDOTTA NEL TITANIO E LEGANTI SIMILI.

Come si è visto il titanio presenta interessanti proprietà leganti che ne rendono degno di considerazione l'utilizzo in reattori a fusione. Per poterne però permettere la presenza in situazioni così particolari di flusso neutronico veloce, occorre verificare quali e quanti nuclidi radioattivi vengano prodotti dall'interazione del titanio coi neutroni da fusione.

In particolare, può essere utile confrontare il comportamento del titanio con quello di altri elementi con proprietà leganti simili, quali ad esempio Nb, Ta ed Hf. Mediante un apposito codice di calcolo (codice ANITA (17) è stata simulata la

permanenza di tali elementi in un reattore a fusione per un periodo di 2.5 anni, come costituenti di una prima parete sottoposta ad un carico di MW/m^2 .

Si sono calcolati i livelli di radioattività indotta nei vari materiali, per vari e successivi istanti dopo lo spegnimento, ovvero dopo la cessazione dell'irraggiamento; per una prima analisi sono sufficienti le seguenti quantità:

- attività (in Bq/cm^3) (tab.5)
- dose a contatto (in REM/ora) (tab.6)
- calore di decadimento (in W/cm^3) (tab.7)

Nella tabella 8 viene poi calcolato il tempo di decadimento necessario affinché la dose a contatto di una lega contenente l'1% di un dato elemento scenda al di sotto di alcuni livelli tipici prescritti dai regolamenti internazionali, ammesso che gli altri elementi non originino isotopi radioattivi.

Osservando i risultati, si ritrova innanzitutto quanto già è noto in letteratura: il Nb è un elemento la cui presenza va assolutamente evitata, a causa degli elevati livelli di radioattività indotta a lungo termine.

D'altro canto, l'azione legante del Nb è decisiva per alcune proprietà delle leghe; risulta perciò necessario sostituirlo con altri elementi dalle simili azioni leganti, ma dalle migliori proprietà radiologiche.

Ta ed Hf sono appunto due elementi considerati in vari studi come possibili sostituti del Nb. Dai risultati in Tab.5-8 si può concludere come la presenza di Hf sia da evitare; per quanto concerne il Ta, esso presenta indubbiamente ridotti livelli di radioattività indotta a lungo termine. Vi è però la fastidiosa contropartita di valori elevati per la dose a

contatto ed il calore di decadimento, negli istanti immediatamente successivi lo spegnimento; se da un lato quindi si migliora la situazione per lo smaltimento dei rifiuti radioattivi, dall'altro si ha una maggiore severità dello scenario allo spegnimento o in caso di incidente.

L'utilizzo del titanio, per contro, non darebbe luogo a questi inconvenienti, in quanto si mantiene sempre su valori più contenuti del Nb.

In diversi studi (18-22) è stato considerato il problema dell'attivazione dei leganti negli acciai.

Ponti (18-19) ha calcolato la massima percentuale in peso di ogni legante in un acciaio affinché esso soddisfi certi precisi criteri di bassa attività.

A questo proposito è importante far notare come il concetto di "materiale a bassa attività" non sia univocamente definito: esso varia a seconda dell'utilizzo che si prospetta per il materiale dopo lo spegnimento (riciclaggio, oppure sepoltura in depositi superficiali, oppure confinamento in formazioni geologiche profonde o sotto il mare), nonché a seconda della normativa che si applica (differenti sono ad esempio quella statunitense, inglese e tedesca).

Per quanto riguarda i quattro elementi considerati in questo lavoro, i limiti più severi in (18-19) sono quelli relativi all'ipotesi di riciclo del materiale:

ELEMENTO	MAX. % IN PESO
Ti	5 - 10%
Nb	1 ppm
Hf	0.1 ppm
Ta	50 ppm

Noda ed altri (20) hanno suddiviso gli elementi in quattro classi, a seconda del tempo necessario per scendere sotto una dose a contatto di 2.5 mrem/ora, dopo una fluenza in reattore di 10 MW y/SQM; i risultati per gli elementi qui considerati sono:

ELEMENTO CLASSIFICAZIONE

Ti	"A bassa attivazione"	(1 mese < T < 5 anni)
Nb	"A forte attivazione"	(T > 100 anni)
Hf	"A moderata attivazione"	(10 anni < T < 30 anni)
Ta	" "	" "

Jarvis (21) aveva calcolato limiti di concentrazione analoghi a quelli in (18-19), ma con differenti condizioni di utilizzo e facendo riferimento all'ipotesi di riciclaggio del materiale. I risultati qui di seguito

ELEMENTO	MAX. % IN PESO
Ti	0.1 - 1 %
Nb	1 - 10 ppm
Hf	50 %
Ta	50 %

differiscono in parte con quelli precedentemente citati.

Recenti studi (22) rivelano come sia in corso una revisione dei valori precedenti; nel caso del titanio un aggiornamento di alcune sezioni d'urto dovrebbe innalzare il limite precedente di circa un fattore 2.

La normativa americana 10CFR61 (23) che pure fa riferimento a scorie di reattori a fissione può essere utilizzata, mediante alcuni opportuni aggiornamenti (24), per calcolare limiti di

concentrazione relativi alla ipotesi di confinamento delle scorie in discariche controllate poco profonde (Shallow Land Burial).

Ponti (18) ha ricavato, per i quattro elementi in esame, i seguenti valori:

ELEMENTO	MAX. % IN PESO
Ti	fino al 100 %
Nb	5 ppm
Hf	fino al 100 %
Ta	fino al 100 %

4 - RIASSUNTO E CONCLUSIONI

Nel selezionare i materiali più idonei per l'utilizzo strutturale nei reattori a fusione occorre tener conto, oltre che delle proprietà convenzionali, anche dei livelli di radioattività indotta nei materiali in seguito a bombardamento neutronico veloce.

Nell'ambito della ricerca sui materiali, il titanio è presente in diverse leghe sottoposte a caratterizzazione, fra le quali le più importanti sono:

- leghe al vanadio
- leghe al titanio
- superalloys per utilizzo criogenico
- acciai austenitici al titanio (a basso swelling)

Per quanto riguarda gli acciai austenitici (materiale scelto al breve termine per la costituzione della prima parete), la principale ragione della presenza di titanio sta nel suo effetto di soppressione dello swelling.

Passando a considerare la radioattività indotta da flusso neutronico, un confronto fra il titanio ed alcuni elementi dalle simili proprietà leganti (Nb, Ta, Hf) rivela come nel titanio i livelli di attività, dose a contatto e calore di decadimento siano i più contenuti.

Compulsando sia i dati da noi calcolati che quelli citati esistenti in letteratura, si può concludere che in tutti i casi il titanio viene sempre classificato almeno come un accettabile elemento legante minore.

In conclusione, dal punto di vista della radioattività indotta, acciai al titanio possono essere considerati per un proseguimento degli studi in vista del loro utilizzo come materiali strutturali nei reattori a fusione.

5 - BIBLIOGRAFIA.

1. G. CASINI, C. PONTI, P. ROCCO, "Environmental Aspects of Fusion Reactors", EUR-10728, European Atomic Energy Community, Ispra (1986).
2. E. MEDDA, M. ZUCCHETTI, "Radioattività indotta in acciai ferritici per la prima parete di un reattore a fusione", Politecnico di Torino, PT-DE-IN133, 1988.
3. R.E. GOLD et al., "Materials Technology for Fusion: Current Status and Future Requirements", Nucl. Technol./Fusion, 1, 169 (1981).
4. E. MEDDA, "Caratterizzazione Termomeccanica dei Nuovi Materiali per Reattori a Fusione", Tesi di Laurea, Politecnico di Torino (1987).

5. O.N. BRASKI, "The Effect of Neutron Irradiation on Vanadium Alloys", Journ. Nucl. Mat., 141-143, 1125 (1986).
6. R.M. NEILSON, "Volatility of V-15Cr-5Ti Fusion Reactor Alloy", Journ. Nucl. Mat., 141-143, 607 (1986).
7. B.A. LOOMIS et al., "Effect of Heat Treatment and Impurity Concentration on Some Mechanical Properties of V-15Cr-5Ti Alloy", Journ. Nucl. Mat., 141-143, 523 (1986).
8. B.A. LOOMIS et al., "Effect of Helium on Swelling and Microstructural Evolution in Ion-Irradiated V-15Cr-5Ti Alloy", Journ. Nucl. Mat., 141-143, 705 (1986).
9. K.C. LIV, "High Temperature Fatigue Behaviour of Unirradiated V-15Cr-5Ti Tested in Vacuum", Journ. Nucl. Mat., 103 - 104, 913 (1981).
10. THE NET TEAM, "NET Status Report", EU-FU/XII-80/86/51 (1985).
11. L.T. SUMMERS, E.N.C. DALDER, "An investigation on the cryogenic mechanical properties of the low thermal expansion superalloys", Adv. In cruog. Eng., 32, 73. (1985).
12. R.J. PUIGH, "The In-reactor Deformation of the PCA Alloy", Journ. Nucl. Mat., 141-143, 954 (1986).
13. E.A. LITTLE, "Fracture Mechanics Evaluations of Neutron Irradiated Type 321 Austenitic Steel". Journ. Nucl. Mat., 139, 261, (1986).
14. T. KIMOTO, H. SHIRAISHI, "Dose Dependence of Void Swelling and Precipitation Behaviour in MC Carbide Dispersed Austenitic Fe-Ni-Cr Alloys", Journ. Nucl. Mat., 141-143, 754 (1986).

15. H. SCHROEDER, "In-beam Creep Rupture Properties of DIN 1.4970 Austenitic Stainless Steel at 783 K", Journ. Nucl. Mat., 141-143, 476 (1986).
16. K. NAKATA et al., "Void Formation and Precipitation During Electron Irradiation in Austenitic Stainless Steels Modified with Ti, Zr, and V", Journ. Nucl. Mat., 148, 185, (1987).
17. C. PONTI, "Calculation of Radioactive Decay Chains Produced by Neutron Irradiation", EUR 9389 (1984).
18. C. PONTI, "Fusion Reactor Materials to Minimize Long-Lived Radioactive Waste", Proc. ISFNT, Tokio (1988).
19. C. PONTI, "Recycling and Shallow Land Burial as Goals for Fusion Reactor Materials Development", Fusion Technology, 13, 157 (1988).
20. T. NODA et al., "Development of Low Activation Ferritic Steels", Journ. Nucl. Mat., 141-143, 106 (1986).
21. O.N. JARVIS, "Low-Activity Materials Reuse and Disposal", AERE-R10860 (1983).
22. A. KHURSHEED et al., "Activation of Materials for the Fusion Reactor First Wall", Proc. 15th Int. Symp. on Fusion Technology, Utrecht (1988).
23. Code for Federal Regulations, "Licensing Requirement for Land Disposal of Radioactive Waste", Title 10 Part 61 (Washington, DC: Nuclear Regulatory Commission, 1982).
24. S. FETTER, "Radiological Hazards of Fusion Reactors: Models and Comparisons", PhD Dissertation, University of California, Berkeley (1985).

Alloy	Nominal Composition, wt%	Alloy Type
Ti-6Al-4V	Ti-6Al-4V	Alpha + beta
Ti-6242S	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.09S	(Near) alpha
Ti-5621S	Ti-5Al-6Sn-2Zr-1Mo-0.25S	(Near) alpha
Ti-38644	Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr	Beta

Tabella 1 - Leghe di titanio valutate per l'impiego in prima parete di reattori a fusione

Alloy	Fe	Cr	Ni	Co	Nb	Ti	Al	Mo	Mn	C	Si
JBK-75	Bal	15.0	29.0	----	----	2.15	1.25	1.25	0.05	0.026	---
J-903	Bal	----	38.0	15.0	3.0	1.4	0.9	0.5	0.2	0.03	--
J-909	Bal	----	38.2	13.0	4.7	1.5	0.4	0.5	0.2	0.03	0.25
J-905	Bal	----	48.9	0.33	4.7	1.59	0.04	----	0.05	0.01	--

Tabella 2 - Composizione di alcuni superalloys (% in peso)

Elemento	P.C.A.	LS-1	JPCA	AISI316	DIN 1.4970	AISI321
Ni	12.2	13.0	16.2	13.76	15.0	9.7
Cr	14.0	16.0	14.6	17.56	15.1	17.3
Ti	0.24	0.10	0.24	-	0.3	0.49
C	0.05	0.05	0.06	0.047	0.095	0.05
Mo	2.3	1.8	2.4	2.34	1.3	0.28
Mn	1.8	1.0	1.8	1.57	1.81	1.41
Si	0.40	0.90	0.53	0.005	0.31	0.45
P	0.027	-	0.01	0.003	-	0.03
S	0.009	-	0.003	0.005	-	0.021
B	0.0035	-	0.001	-	0.005	-
W	-	0.05	-	-	-	-
V	0.04	-	-	0.02	-	-
N	0.009	-	0.01	0.004	0.01	-
Fe	bal.	bal.	bal.	bal.	bal.	bal.

Tabella 3 - Composizione di alcuni acciai di interesse per applicazioni in reattori di fusione

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Zr	V	N
316	0.07	0.51	1.48	0.002	0.005	17.02	13.75	2.11	-	-	-	0.004
+ Ti	0.07	0.51	1.51	0.002	0.002	16.61	13.84	2.10	0.23	-	-	0.004
+ Zr	0.05	0.52	1.50	0.002	0.002	16.80	13.67	2.16	-	0.30	-	0.005
+ V	0.06	0.51	1.69	0.004	0.002	17.12	13.77	2.21	-	-	0.29	0.002
+ TiZr	0.06	0.51	1.62	0.004	0.006	15.10	15.26	2.51	0.12	0.06	-	0.003
+ TiV	0.06	0.52	1.72	0.007	0.002	16.97	13.67	2.23	0.13	-	0.15	0.001
+ ZrV	0.06	0.51	1.59	0.003	0.002	16.67	14.06	2.33	-	0.26	0.16	0.003

Tabella 4 - Composizione chimica (% in peso) di alcune leghe austenitiche contenenti Ti, V e Zr

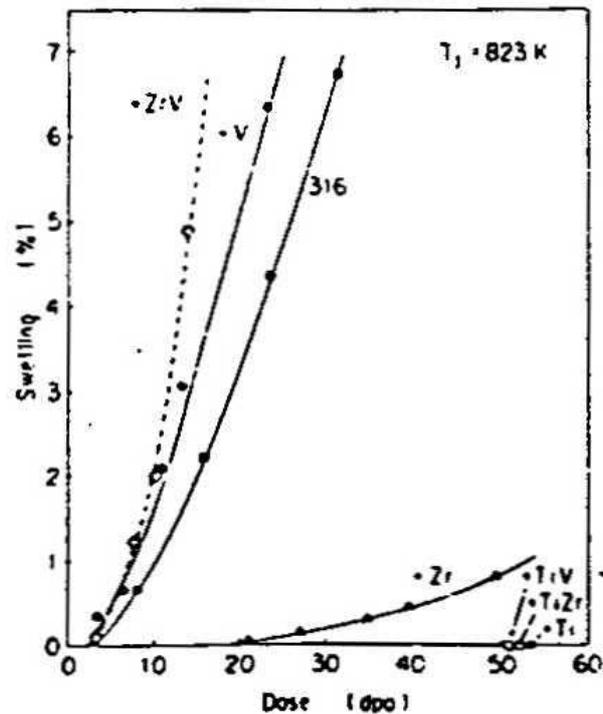


Fig. 1 - Andamento dello swelling per i provini di tabella 4 irraggiati a 823 K

TEMPO DOPO LO SPEGNIMENTO	Ti	Nb	Ta	Hf
0	$5.77 \cdot 10^{12}$	$5.06 \cdot 10^{13}$	$2.61 \cdot 10^{14}$	$7.06 \cdot 10^{14}$
30 d	$1.69 \cdot 10^{12}$	$6.51 \cdot 10^{12}$	$1.43 \cdot 10^{14}$	$1.80 \cdot 10^{14}$
1 y	$2.34 \cdot 10^{11}$	$7.61 \cdot 10^{11}$	$1.68 \cdot 10^{13}$	$7.78 \cdot 10^{11}$
10 y	$3.18 \cdot 10^8$	$4.90 \cdot 10^{11}$	$8.85 \cdot 10^8$	$1.62 \cdot 10^9$
10^2 y	$2.80 \cdot 10^6$	$9.34 \cdot 10^9$	$8.36 \cdot 10^6$	$9.49 \cdot 10^7$
10^3 y	$8.15 \cdot 10^3$	$1.97 \cdot 10^9$	$1.04 \cdot 10^4$	$1.33 \cdot 10^5$
10^4 y	$3.17 \cdot 10^1$	$1.19 \cdot 10^9$	$1.03 \cdot 10^4$	$1.33 \cdot 10^5$
10^5 y	$2.03 \cdot 10^1$	$5.74 \cdot 10^7$	$9.14 \cdot 10^3$	$1.32 \cdot 10^5$

Tabella 5 - Livelli di radioattività indotta in vari elementi dopo 2.5 anni di permanenza in un reattore a fusione come prima parete sottoposta ad un carico di 5 MW/SQM, a vari istanti dopo lo spegnimento (Bq/cm³)

TEMPO DOPO LO SPEGNIMENTO	Ti	Nb	Ta	Hf
0	$3.36 \cdot 10^7$	$5.32 \cdot 10^7$	$6.54 \cdot 10^8$	$1.89 \cdot 10^9$
30 d	$6.26 \cdot 10^6$	$1.44 \cdot 10^7$	$4.91 \cdot 10^8$	$5.18 \cdot 10^8$
1 y	$3.94 \cdot 10^5$	$2.90 \cdot 10^4$	$6.48 \cdot 10^7$	$2.99 \cdot 10^6$
10 y	$2.20 \cdot 10^0$	$1.16 \cdot 10^4$	$5.44 \cdot 10^2$	$5.73 \cdot 10^3$
10^2 y	$3.32 \cdot 10^{-1}$	$8.52 \cdot 10^3$	$6.16 \cdot 10^1$	$7.17 \cdot 10^2$
10^3 y	$2.24 \cdot 10^{-8}$	$8.20 \cdot 10^3$	$1.58 \cdot 10^{-2}$	$3.32 \cdot 10^{-1}$
10^4 y	$1.93 \cdot 10^{-10}$	$6.02 \cdot 10^3$	$1.58 \cdot 10^{-2}$	$3.32 \cdot 10^{-1}$
10^5 y	$1.93 \cdot 10^{-10}$	$2.81 \cdot 10^2$	$1.56 \cdot 10^{-2}$	$3.32 \cdot 10^{-1}$

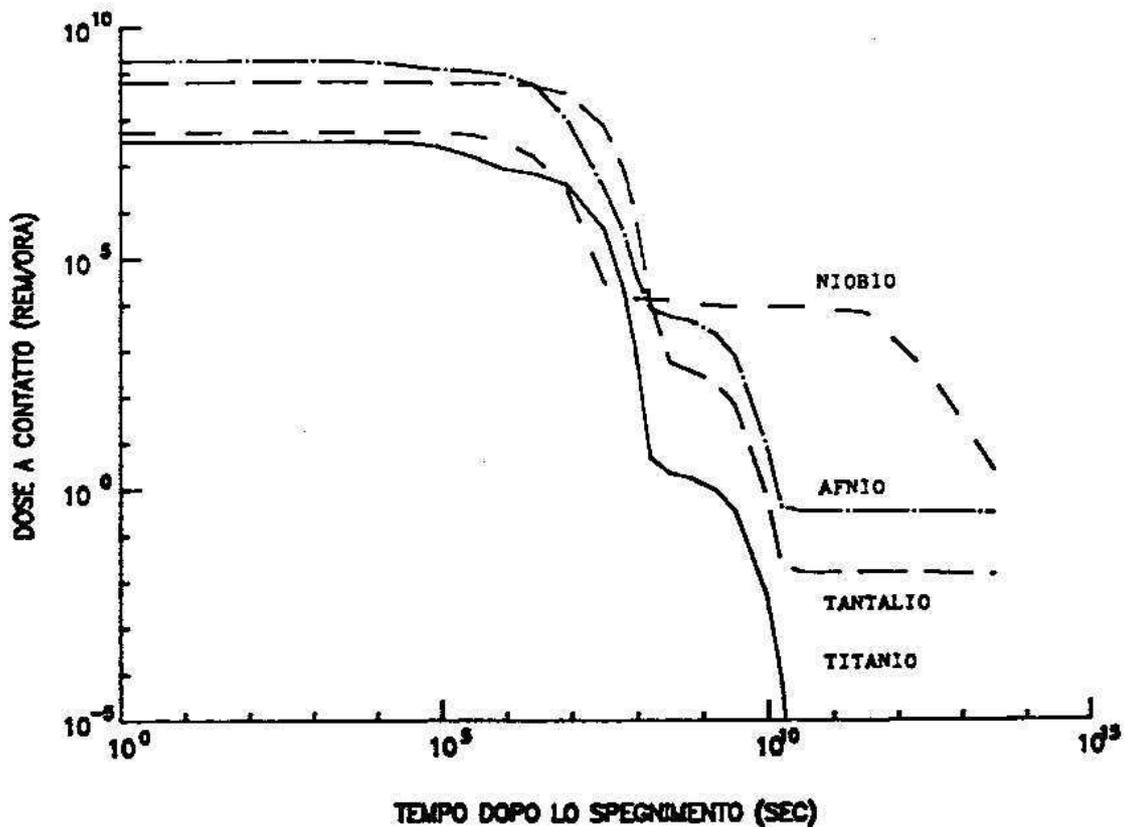


Tabella 6 - Dose a contatto in vari elementi dopo 2.5 anni di permanenza in un reattore a fusione come prima parete sottoposta ad un carico di 5 MW/SQM, a vari istanti dopo lo spegnimento (rem/ora)

TEMPO DOPO LO SPEGNIMENTO	Ti	Nb	Ta	Hf
0	1.85	2.74	37.35	125.4
1 ora	1.79	2.73	36.76	118.4
6 ore	1.68	2.69	34.71	95.1
12 ore	1.57	2.65	33.45	81.0
1 giorno	1.37	2.58	32.51	70.6
3 giorni	0.87	2.32	31.88	64.4
10 giorni	0.44	1.65	30.54	53.3
1 mese	0.34	0.75	27.03	31.2
100 giorni	0.19	0.14	17.68	5.23
1 anno	0.023	0.005	3.57	0.16
10 anni	10^{-6}	$2.8 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4}$

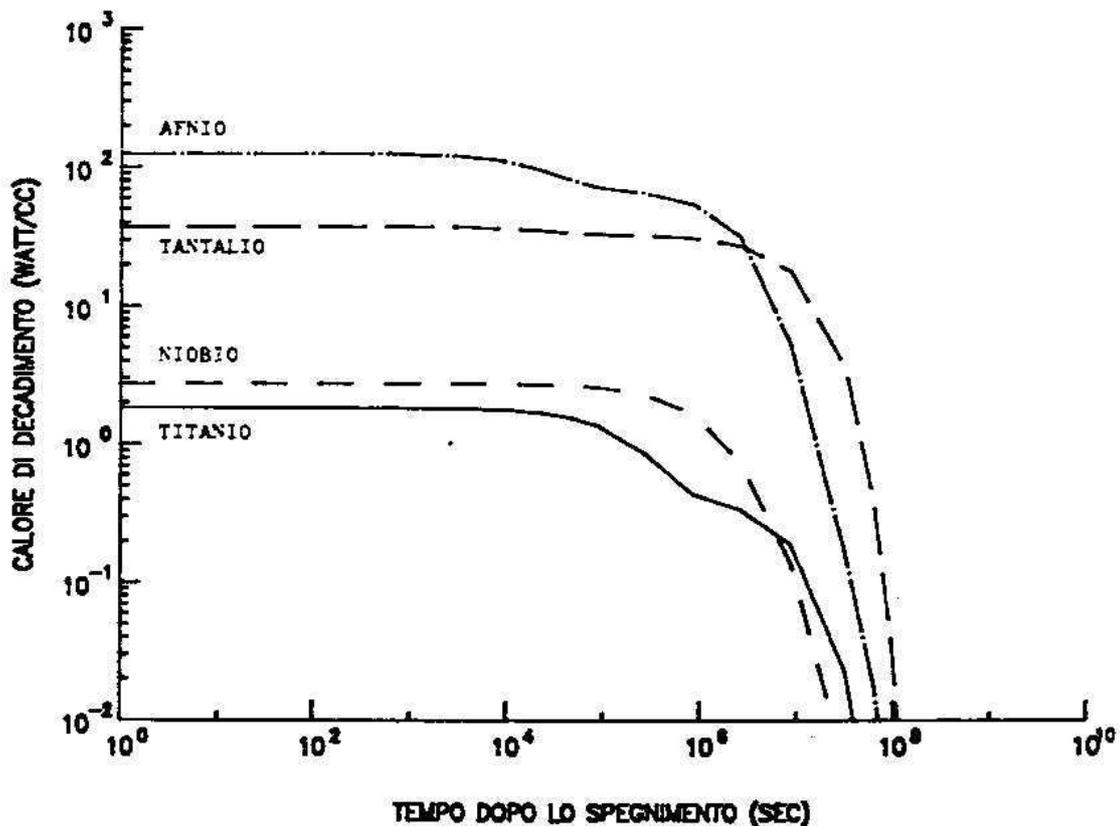


Tabella 7 - Calore di decadimento in vari elementi dopo 2.5 anni di permanenza in un reattore a fusione come prima parete sottoposta ad un carico di 5 MW/SQM, a vari istanti dopo lo spegnimento (Watt/cm³)

LIMITE DI DOSE	CATEGORIA DI RIFIUTO RADIO-ATTIVO	TEMPO DI DECADIMENTO NECESSARIO (anni)			
		Lega 1% Ti	Lega 1% Nb	Lega 1% Ta	Lega 1% Hf
D < 2 rem/h	IAEA cat.2	3.6	10 ⁵	50	160
D < 0.2 rem/h	IAEA cat.1	4.4	2 · 10 ⁵	150	260
D < 2.5 mrem/h (5 rem/y)	Operational Staff Handling	125	> 10 ⁶	350	> 10 ⁶
D < 0.05 mrem/h (0.5 rem/y)	Max. Dose for the public	300	> 10 ⁶	> 10 ⁶	> 10 ⁶

IAEA cat.2 - "Può essere maneggiato e trasportato per brevi periodi dal personale addetto solo in contenitori di piombo o cemento adeguati".

IAEA cat.1 - "Può essere maneggiato e trasportato per brevi periodi dal personale addetto senza speciali precauzioni".

Operational Staff Handling - "Può restare a contatto continuativo con il personale addetto per 40 ore alla settimana=2000 h/a".

Max. Dose for the Public - "Può restare a contatto con la popolazione per 24 ore al giorno=8760 h/a".

Tabella 8 - Tempo di decadimento necessario a leghe contenenti l'1% in peso di alcuni elementi per portarsi al di sotto dei livelli di dose prescritti da alcuni regolamenti internazionali, dopo un irraggiamento di 2.5 anni come prima parete di un reattore a fusione con carico di 5 MW/SQM. Si assume che gli altri componenti della lega non generino isotopi radioattivi