

Comitato Nazionale Energia Nucleare

~~117400677~~

STUDIO SPERIMENTALE DEL COMPORTAMENTO TERMICO DELLE BARRE DI COMBUSTIBILE

*INTEGRALE DI CONDUCEBILITÀ DI BARRE COMBUSTIBILI
VIBROCOMPATTATE CONTENENTI POLVERE DI UO_2 E MI-
CROSFERE DI $UO_2 - PuO_2$.*

A. CALZA-BINI, G. COSOLI, G. FILACCHIONI, M. LANCHI,
A. NOBILI, U. V. ROCCA, P. L. ROTOLONI

Comitato Nazionale Energia Nucleare

**STUDIO SPERIMENTALE
DEL COMPORTAMENTO TERMICO
DELLE BARRE DI COMBUSTIBILE**

*INTEGRALE DI CONDUCEBILITÀ DI BARRE COMBUSTIBILI
VIBROCOMPATTATE CONTENENTI POLVERE DI UO_2 E MI-
CROSFERE DI $UO_2-P_2O_5$.*

A. CALZA-BINI, G. COSOLI, G. FILACCHIONI, M. LANCHI,
A. NOBILI, U. V. ROCCA, P. L. ROTOLONI

RT/ING(74)13

Testo pervenuto nell'aprile 1974

1 - PREMESSA

Il presente lavoro descrive l'esperienza di irraggiamento di 4 barrette combustibili vibrocompattate - 2 costituite da frammenti di UO_2 e 2 da microsfere sol-gel di ossido misto di U e Pu - eseguita nell'ambito del programma CYRANUM sviluppato al Laboratorio Tecnologie Ceramiche per lo studio del comportamento termico di barre sotto irraggiamento^(1, 2).

L'esperienza è stata condotta presso il reattore SILOE' del Centro di Grenoble ed ha permesso di misurare l'integrale di conducibilità e le modalità di scambio termico guaina/combustibile limitatamente a bassi valori del burn-up (v. Tab. I) ed a temperature massime di combustibile dell'ordine di 2.200°C.

2 - DESCRIZIONE DELL'ESPERIENZA

2.1 - Descrizione del campione

L'esperienza consiste nell'irraggiamento in un canale del reattore SILOE' di Grenoble di 4 capsule di tipo CYRANUM. Le caratteristiche principali delle capsule strumentate e dei campioni di irraggiamento sono riportate in Appendice I.

2.2 - Descrizione del dispositivo

Per la descrizione della sezione in pila del forno CYRANUM, adoperato nel corso delle presenti esperienze, si rimanda alla referenza (3).

La capsula viene sistemata in un dispositivo mobile posto nel riflettore del "core" del reattore: è così possibile variare il livello di potenza del campione indipendentemente dalla potenza del reattore.

Un calorimetro a nucleo di grafite e due misuratori di flusso a filo di rodio sono disposti solidamente alla capsula e permettono di valutare le potenza nucleare e γ generate nel campione.

2.3 - Modalità di esecuzione della misura

Per tutti i campioni era previsto un irraggiamento di ~ 1.000 h pari a 2 cicli del reattore.

Le storie di irraggiamento sono riportate nelle Figure 4.1.1, 4.2.1, 4.3.1 e 4.3.2. Come si può osservare, tutti i campioni sono rimasti in pila il tempo previsto, ad eccezione del CYRANUM 8 che è stato estratto prima della fine del secondo ciclo per malfunzionamento della strumentazione.

La parte più delicata dell'esperienza è risultata essere la misura della potenza generata nel campione e della ripartizione tra potenza nucleare e γ .

La descrizione approfondita dei metodi di misura della potenza usati viene riportata nell'Appendice II.

3 - ELABORAZIONE DEI DATI SPERIMENTALI

3.1 - Dati di irraggiamento

Dai dati forniti dalla strumentazione della capsula sono stati ricavati i valori delle grandezze che definiscono le condizioni d'irraggiamento (distribuzione della temperatura, livello di potenza).

Le variabili significative direttamente rilevate sono: la temperatura centrale del combustibile; la temperatura ad 1 mm dalla superficie; la temperatura superficiale; la temperatura esterna di guaina; i segnali dei collectrons ed il segnale del calorimetro; la potenza totale sviluppata nel dispositivo.

Da questi dati vengono ricavate le grandezze che interessano direttamente il calcolo della conduttanza dell'intercapedine e dell'integrale di conducibilità: la temperatura periferica del combustibile, come media della temperatura superficiale e quella a 1 mm dalla superficie, ed attribuita al raggio ($R_{cb} = 0,5$ mm); la densità lineare di potenza nucleare e γ generate nel combustibile.

Da un'analisi comparativa dei dati relativi ad uno stesso campione risulta che i valori delle grandezze quali temperatura di guaina, indicazione dei collectrons e potenza

totale prodotta non sono sempre coerenti. In particolare si osserva che per un dato valore del segnale dei collectrons si hanno valori della temperatura media di guaina che differiscono poco tra loro, mentre gli scarti tra i valori della potenza totale prodotta superano in qualche caso il 10%. Questa incoerenza nei dati potrebbe nascere dal fatto che le indicazioni dei collectrons e le temperature sono legate al valore della potenza lineare in corrispondenza del piano mediano mentre la resistenza di misura fornisce la potenza totale di tutta la barretta alta 18 cm., e quindi può risentire maggiormente di eventuali distorsioni assiali di flusso. Inoltre la resistenza di misura più di una volta ha subito delle derive non riconducibili a variazioni delle condizioni d'irraggiamento.

Queste considerazioni hanno suggerito di elaborare i dati forniti dalla strumentazione tenendo conto dei risultati di tutte e quattro le capsule, in modo da ridurre al minimo l'effetto delle incoerenze riscontrate. E' da sottolineare infatti che le barrette hanno tutte le stesse geometrie e sono state irraggiate in capsule identiche.

Si osserva che per tre campioni, due a ossido misto e uno a UO_2 , la corrispondenza tra valore medio dei collectrons e temperatura di guaina è sostanzialmente la stessa; per il quarto campione ad UO_2 , il CYRANUM 10, invece, la curva della temperatura di guaina in funzione dei dati dei collectrons è più bassa che negli altri tre campioni. Tale differenza non è solo attribuibile alla minore densità del combustibile del CYRANUM 10 ma anche ad una differente condizione di scambio termico nella barriera termica.

3.2 - Determinazione dell'integrale di conducibilità e della conducibilità termica

Sulla base dei fenomeni che regolano la trasmissione del calore attraverso un solido policristallino^(1, 4) la dipendenza della conducibilità termica della temperatura può essere descritta con la formula:

$$K(T) = \frac{1}{B + CT} + DT^3 \quad (3.2.1)$$

di conseguenza l'integrale di conducibilità tra i limiti di temperatura T_1 e T_2 è:

$$\int_{T_1}^{T_2} K(T) dT = \frac{1}{C} \ln \frac{B + CT_2}{B + CT_1} + \frac{D}{4} (T_2^4 - T_1^4) \quad (3.2.2)$$

Durante l'irraggiamento per ciascun valore della potenza lineare del combustibile vengono misurate le temperature centrale T_C e periferica T_0 . Pertanto detto R il raggio del combustibile e R_0 il raggio al quale si attribuisce la temperatura T_0 (ved. Cap. 3), integrando l'equazione della trasmissione del calore si ha:

$$\int_{T_0}^{T_C} K(T) dT = \frac{1}{4\eta} \frac{I_0 (\chi R_0)^{-1}}{0.5 \chi R \chi I_1 (\chi R)} q'_n + \frac{1}{4\pi} \frac{R_0^2}{R^2} q'_s \quad (3.2.3)$$

in cui i simboli hanno il seguente significato:

λ = inverso della lunghezza di diffusione

$I_0(x)$ = funzione di Bessel modificata di ordine 0

$I_1(x)$ = funzione di Bessel modificata di ordine 1

q'_n = potenza lineare nucleare

q'_γ = potenza lineare dovuta all'assorbimento dei raggi γ nel combustibile.

Per scrivere la (3.2.3) si è supposta trascurabile la depressione del flusso γ nella capsula.

Combinando le equazioni (3.2.2) e (3.3.3) con un calcolo basato sul metodo dei minimi quadrati viene determinata la migliore terna di valori dei parametri B, C, D. Nell'espressione (3.2.1) ognuno dei tre parametri ha un preciso significato fisico, legato ai meccanismi che regolano la trasmissione del calore: tuttavia il valore ottenuto con il metodo di calcolo adoperato non può essere preso come una misura del singolo parametro. Infatti, due curve che approssimano ugualmente bene i dati di integrale misurati corrispondono a terne di valori di parametri anche molto differenti.

3.3 - Determinazione del coefficiente di scambio termico combustibile-camicia

Nel caso di una barretta contenente combustibile vibrocompattato assegnare un valore alla temperatura superficiale del combustibile contiene un maggior margine di incertezza rispetto al caso di un combustibile a pastiglie. Di conseguenza molti autori preferiscono descrivere le proprietà termiche di una barretta di combustibile a polvere attraverso l'integrale

grale effettivo di conducibilità tra i limiti di temperatura interna di guaina e centrale del combustibile. Nel nostro caso, tuttavia, dall'analisi delle variazioni nel comportamento termico sotto irraggiamento delle quattro capsule è sembrato di individuare l'origine di alcuni di questi fenomeni proprio nel meccanismo di scambio dell'interfaccia combustibile-guaina. Si è cercato quindi di descrivere separatamente i fenomeni termici nel combustibile e quelli dell'interfaccia.

Nella formula (3.2.3) si ottiene, ponendo $R_0 = R$:

$$\int_{T_S}^{T_C} K(T) dT = \frac{1}{4\pi} \frac{I_0(\lambda R) - 1}{0.5\lambda \lambda R I_1(\lambda R)} q'_n + \frac{1}{4\pi} q'_\gamma \quad (3.3.1)$$

in cui T_S indica la temperatura superficiale del combustibile. Tale valore può essere ricavato sulla base della potenza lineare e della temperatura centrale misurata, sulla curva dell'integrale di conducibilità determinata in precedenza.

In analogia con il caso di combustibile a pastiglia, il coefficiente di scambio termico combustibile-guaina viene definito anche per la barretta vibrocompattata come:

$$H_g = \frac{q'}{2\pi R (T_S - T_{GI})} \quad (3.3.2)$$

Ponendo nella (3.3.2) il valore misurato di potenza lineare e temperatura di guaina e della temperatura superficiale T_S dedotta come detto precedentemente, si ottengono i valori di H_g in funzione della potenza.

4 - RISULTATI

4.1 - Campione CYRANUM 9

I dati forniti dal campione CYRANUM 9 sono riportati nelle tabelle 4.1.1 e 4.1.2.

Essi sono stati elaborati in modo da evidenziare eventuali differenze nel comportamento termico durante i due cicli d'irraggiamento. La storia termica del campione è illustrata in Fig. 4.1.1. Si osserva che dopo la prima salita a potenza tutte le temperatura di combustibile sono aumentate considerevolmente nell'arco di circa 10 ore, mentre la potenza lineare e la temperatura di guaina non hanno subito variazioni.

I dati della prima salita a potenza (è stata raggiunta la temperatura centrale di 2.100°C) sono stati elaborati separatamente, mentre i restanti del primo ciclo sono stati trattati con quelli del secondo ciclo.

Nella Fig. 4.1.2 sono confrontate le curve della $K(T)$ relative ai dati della prima salita a potenza e a tutti gli altri rispettivamente. Nella Fig. 4.1.3 sono riportate le corrispondenti curve dell'integrale di conducibilità. Si può osservare che le curve dell'integrale non mostrano diffe

renze sostanziali se si esclude il fatto che quella che chiameremo relativa ai punti "a regime" è leggermente più alta della curva ricavata con i dati della prima salita.

Le differenze nelle curve di $K(T)$ sono più marcate: la curva "prima salita" è molto piatta e resta notevolmente al di sotto di quella "a regime" tra 0 e 800°C e tra 1.800 e 2.800°C.

Dal confronto dei valori calcolati dai parametri B, C, D riportati nella tabella 4.1.3, si vede che per le curve "a regime" il valore di B è assai più basso mentre i valori di C e D sono più alti, e confrontabili con quelli propri di un combustibile a pastiglie⁽¹⁾.

Tutto ciò suggerisce l'ipotesi di una avvenuta ristrutturazione del combustibile anche se limitata. Infatti, anche qualitativamente la curva "a regime" è assai simile a quelle relative ad un combustibile a pellet.

Nella Fig. 4.1.4 sono riportati i valori delle temperature centrale, periferica ed esterna di guaina in funzione della potenza lineare per i due cicli di irraggiamento. In essa si vede in modo più evidente l'aumento subito dalla temperatura centrale e periferica del combustibile mentre non si osservano differenze sulla temperatura di guaina. E' da sottolineare che le curve della temperatura durante il primo ciclo d'irraggiamento dopo l'aumento verificatosi, praticamente coincidono con i punti misurati durante tutto il secondo ciclo. Il fenomeno in questione presenta tre sostanziali caratteristiche: l'aumento della temperatura non è immediato ma si sviluppa nel tempo e si esaurisce nel giro di circa 10 ore; tutte e tre le temperature di combustibile ne sono interessate;

TAB. 4.1.2 - Condizioni d'irraggiamento del campione CYRANUK 9 - II ciclo

Temperatura esterna di guaina (°C)	Temperatura periferica T ₅ (°C)	Temperatura periferica T ₆ (°C)	Temperatura centrale (°C)	Potenza totale (P)	Tensione calorimetro (mV)	Tensione collettore (mV)	Potenza lineare nucleare (G/cm)	Potenza lineare gamma (G/cm)
78	179	120	220	750	0,221	0,117	22	4
116	303	195	393	1625	0,439	0,258	53	8
151	432	269	535	2525	0,672	0,408	84	9
164	455	271	640	2900	--	--	--	--
229	696	425	970	4175	0,945	0,776	159	22
263	838	492	1213	4900	1,04	0,977	200	24
325	1009	535	1545	5750	1,13	1,15	256	26
356	1149	670	1790	6475	1,21	1,45	298	28
390	1265	756	1975	7425	1,29	1,662	341	28
420	1339	815	2145	8250	1,34	1,835	377	30
500	896	597	1393	5525	--	--	--	--
501	929	571	1458	5800	1,100	1,131	255	25
525	1029	637	1640	6200	1,162	1,28	289	25
545	1089	667	1770	6575	1,20	1,382	312	27
587	1211	751	2000	7425	1,26	1,597	360	28
593	1151	827	2065	7750	1,175	1,58	356	28
571	1086	784	1935	7250	1,13	1,475	333	28
561	1029	744	1825	6850	1,10	1,37	309	27
532	991	715	1720	6425	1,075	1,28	289	26
523	951	689	1640	6200	1,06	1,215	274	26
501	877	633	1485	5850	1,02	1,105	249	25
488	818	605	1377	5525	0,99	1,02	230	24
488	808	607	1355	5450	0,98	1,005	226	24
475	775	583	1295	5250	0,97	0,96	216	24
465	737	565	1215	5025	0,94	0,895	202	23
451	691	529	1125	4725	0,915	0,822	186	22
437	665	520	1075	4525	0,90	0,785	177	22
423	616	483	975	4175	0,87	0,712	161	22
413	569	452	905	3900	0,84	0,66	148	22
403	543	425	847	3650	0,815	0,61	137	21
400	537	433	838	3650	0,795	0,595	134	21
414	585	463	934	3975	0,83	0,673	152	22
447	707	567	1145	4800	0,90	0,837	189	23
460	732	574	1200	4950	0,915	0,881	199	23
486	813	642	1355	5400	0,965	1,012	228	24
509	914	694	1570	5950	1,01	1,172	265	25
535	968	736	1695	6200	1,04	1,26	284	26
569	1079	821	1915	7075	1,10	1,45	327	27
569	1077	821	1915	7075	1,10	1,427	322	27
586	1123	845	2015	7550	1,125	1,54	347	28
592	1149	879	2075	7825	1,13	1,622	366	29
619	1211	939	2215	8550	1,18	1,76	396	30
646	--	979	2375	9200	1,22	1,915	431	31

TAB. 4.1.3 - Valori dei coefficienti di conducibilità termica

B $W^{-1} \text{ cm } ^\circ K$	C $W^{-1} \text{ cm}$	D $W \text{ cm}^{-1} \text{ or}^{-1}$	
24,25	0,0091	$1,3 \cdot 10^{-15}$	1 ^a salita
16,25	0,0191	$5,0 \cdot 10^{-13}$	a rimpio

l'aumento non è stato riassorbito nel secondo ciclo ma è stato conservato praticamente inalterato.

Da queste considerazioni si può concludere che alla base del fenomeno sta una modificazione permanente nel meccanismo di scambio termico combustibile-guaina.

La Fig. 4.1.5 mostra i valori di H_G ricavati con la formula (3.32); ovviamente in corrispondenza della variazione subita dalla temperatura si ha una forte diminuzione di H_G . Nella Fig. 4.1.6 è riportato il valore di H_G in funzione del tempo d'irraggiamento, limitatamente alle prime ore significative. Si può dire che le variazioni nei meccanismi di scambio sono già in atto sin dall'inizio dell'irraggiamento, ma durante la prima salita a potenza sono mascherate dalle variazioni di potenza.

Analizzando i valori di H_G riportati in Fig. 4.1.5, si osserva una leggera dipendenza dalla potenza. Uno studio approfondito delle modalità di scambio termico nel caso di combustibile vibrocompattato non è ancora a punto.

4.2 - Risultati del campione CYRANUM 10

Il campione CYRANUM 10 ha funzionato fin dall'inizio dell'irraggiamento con una sola termocoppia periferica, la T_5 , posta all'interfaccia combustibile/guaina.

La seconda termocoppia periferica è risultata fuori uso fin dal primo start-up del reattore. Nelle tabelle 4.2.1 e 4.2.2 sono riportate le misure delle grandezze più significative rilevate durante l'irraggiamento. In Fig. 4.2.1 è riportata la storia termica del campione, mentre nella Fig. 4.2.2 vengono riportati, in funzione della potenza lineare,

TAB. 4.2.1 - Temperature d'irraggiamento del campione CYRANUM 10

Temperatura esterna al reattore (°C)	Temperatura periferica T_5 (°C)	Temperatura periferica T_6 (°C)	Temperatura centrale (°C)	Potenza totale (t)	Tensione calorimetrica (mV)	Tensione collettore (mV)	Potenza lineare nucleare (t/cm)	Potenza lineare guaina (t/cm)
103	155	Termocoppia rotta	380	1715	0,700	0,300	11,5	1
153	237	all'inizio irraggiamento	647	4300	0,774	0,500	103	11
158,5	237		710	3400	0,795	0,520	107	12
170	272		710	3550	0,835	0,640	131	20
185	298		610	3980	0,870	0,730	150	21
210	315		505	4225	0,905	0,805	169	23
231	315		4005	4675	0,950	0,950	195	24
233	378		1115	5225	1,005	1,075	221	25
272	417		1230	5600	1,050	1,155	245	25
301	466		1425	6130	1,125	1,300	285	27
318	499		1525	6325	1,170	1,480	304	28
340	534		1765	6650	1,215	1,610	330	29
363	579		1985	7250	1,250	1,725	354	30
370,5	607		2005	7625	1,290	1,825	375	31
400	635		2105	8000	1,340	1,935	397	31
376	602		1955	7600	1,285	1,800	370	31
355	571		1835	7170	1,240	1,690	347	30
342	553		1700	6700	1,200	1,580	324	28
323	531		1585	6410	1,180	1,480	304	28
300	492		1410	5850	1,100	1,310	269	30
254	423		1165	4850	0,985	1,040	213	25
259	492		1460	5125	1,000	1,060	218	25
269	511		1590	5500	1,020	1,120	230	26
271	508		1625	5500	1,025	1,130	232	26
284	553		1780	5950	1,075	1,255	258	26
307	588		1925	6410	1,120	1,370	281	28
315	507		2015	6600	1,150	1,445	297	29
328	646		2125	6900	1,180	1,545	317	30
306	533		1935	6410	1,125	1,280	283	28
304	585		1910	6325	1,115	1,345	276	28
305	593		1935	6410	1,120	1,365	280	28
279	548		1720	5775	1,050	1,180	242	25
247	497		1445	5025	0,965	0,980	201	25
198	393		1050	3825	0,850	0,675	138	22
173	347		875	3275	0,800	0,540	111	20
171	337		855	3275	0,800	0,550	113	20
171	342		855	3275	0,800	0,550	113	20
171	342		855	3275	0,800	0,545	112	20
159	339		850	3125	0,910	0,590	107	19
165	341		855	3275	0,883	0,520	105	19
161	332		845	3275	0,846	0,513	104	19
163	330		840	3200	0,817	0,506	104	19
150	337		1165	4225	0,940	0,775	159	22
223	471		1270	4580	0,980	0,830	171	22

0.11.1.1.1.1

Temperatura esterna di guaina (°C)	Temperatura periferica T ₅ (°C)	Temperatura periferica T ₆ (°C)	Temperatura centrale (°C)	Potenza totale (W)	Tensione collettore (V)	Tensione di saturazione (V)	Potenza elettrica (W)	Temperatura nucleare (°C)
107	507	111	318	555	1,200	1,200	111	21
107	511	114	327	555	1,200	1,200	111	21
107	515	116	331	555	1,200	1,200	111	21
107	519	118	335	555	1,200	1,200	111	21
107	523	120	339	555	1,200	1,200	111	21
107	527	122	343	555	1,200	1,200	111	21
107	531	124	347	555	1,200	1,200	111	21
107	535	126	351	555	1,200	1,200	111	21
107	539	128	355	555	1,200	1,200	111	21
107	543	130	359	555	1,200	1,200	111	21
107	547	132	363	555	1,200	1,200	111	21
107	551	134	367	555	1,200	1,200	111	21
107	555	136	371	555	1,200	1,200	111	21
107	559	138	375	555	1,200	1,200	111	21
107	563	140	379	555	1,200	1,200	111	21
107	567	142	383	555	1,200	1,200	111	21
107	571	144	387	555	1,200	1,200	111	21
107	575	146	391	555	1,200	1,200	111	21
107	579	148	395	555	1,200	1,200	111	21
107	583	150	399	555	1,200	1,200	111	21
107	587	152	403	555	1,200	1,200	111	21
107	591	154	407	555	1,200	1,200	111	21
107	595	156	411	555	1,200	1,200	111	21
107	599	158	415	555	1,200	1,200	111	21
107	603	160	419	555	1,200	1,200	111	21
107	607	162	423	555	1,200	1,200	111	21
107	611	164	427	555	1,200	1,200	111	21
107	615	166	431	555	1,200	1,200	111	21
107	619	168	435	555	1,200	1,200	111	21
107	623	170	439	555	1,200	1,200	111	21
107	627	172	443	555	1,200	1,200	111	21
107	631	174	447	555	1,200	1,200	111	21
107	635	176	451	555	1,200	1,200	111	21
107	639	178	455	555	1,200	1,200	111	21
107	643	180	459	555	1,200	1,200	111	21
107	647	182	463	555	1,200	1,200	111	21
107	651	184	467	555	1,200	1,200	111	21
107	655	186	471	555	1,200	1,200	111	21
107	659	188	475	555	1,200	1,200	111	21
107	663	190	479	555	1,200	1,200	111	21
107	667	192	483	555	1,200	1,200	111	21
107	671	194	487	555	1,200	1,200	111	21
107	675	196	491	555	1,200	1,200	111	21
107	679	198	495	555	1,200	1,200	111	21
107	683	200	499	555	1,200	1,200	111	21
107	687	202	503	555	1,200	1,200	111	21
107	691	204	507	555	1,200	1,200	111	21
107	695	206	511	555	1,200	1,200	111	21
107	699	208	515	555	1,200	1,200	111	21
107	703	210	519	555	1,200	1,200	111	21
107	707	212	523	555	1,200	1,200	111	21
107	711	214	527	555	1,200	1,200	111	21
107	715	216	531	555	1,200	1,200	111	21
107	719	218	535	555	1,200	1,200	111	21
107	723	220	539	555	1,200	1,200	111	21
107	727	222	543	555	1,200	1,200	111	21
107	731	224	547	555	1,200	1,200	111	21
107	735	226	551	555	1,200	1,200	111	21
107	739	228	555	555	1,200	1,200	111	21
107	743	230	559	555	1,200	1,200	111	21
107	747	232	563	555	1,200	1,200	111	21
107	751	234	567	555	1,200	1,200	111	21
107	755	236	571	555	1,200	1,200	111	21
107	759	238	575	555	1,200	1,200	111	21
107	763	240	579	555	1,200	1,200	111	21
107	767	242	583	555	1,200	1,200	111	21
107	771	244	587	555	1,200	1,200	111	21
107	775	246	591	555	1,200	1,200	111	21
107	779	248	595	555	1,200	1,200	111	21
107	783	250	599	555	1,200	1,200	111	21
107	787	252	603	555	1,200	1,200	111	21
107	791	254	607	555	1,200	1,200	111	21
107	795	256	611	555	1,200	1,200	111	21
107	799	258	615	555	1,200	1,200	111	21
107	803	260	619	555	1,200	1,200	111	21
107	807	262	623	555	1,200	1,200	111	21
107	811	264	627	555	1,200	1,200	111	21
107	815	266	631	555	1,200	1,200	111	21
107	819	268	635	555	1,200	1,200	111	21
107	823	270	639	555	1,200	1,200	111	21
107	827	272	643	555	1,200	1,200	111	21
107	831	274	647	555	1,200	1,200	111	21
107	835	276	651	555	1,200	1,200	111	21
107	839	278	655	555	1,200	1,200	111	21
107	843	280	659	555	1,200	1,200	111	21
107	847	282	663	555	1,200	1,200	111	21
107	851	284	667	555	1,200	1,200	111	21
107	855	286	671	555	1,200	1,200	111	21
107	859	288	675	555	1,200	1,200	111	21
107	863	290	679	555	1,200	1,200	111	21
107	867	292	683	555	1,200	1,200	111	21
107	871	294	687	555	1,200	1,200	111	21
107	875	296	691	555	1,200	1,200	111	21
107	879	298	695	555	1,200	1,200	111	21
107	883	300	699	555	1,200	1,200	111	21
107	887	302	703	555	1,200	1,200	111	21
107	891	304	707	555	1,200	1,200	111	21
107	895	306	711	555	1,200	1,200	111	21
107	899	308	715	555	1,200	1,200	111	21
107	903	310	719	555	1,200	1,200	111	21
107	907	312	723	555	1,200	1,200	111	21
107	911	314	727	555	1,200	1,200	111	21
107	915	316	731	555	1,200	1,200	111	21
107	919	318	735	555	1,200	1,200	111	21
107	923	320	739	555	1,200	1,200	111	21
107	927	322	743	555	1,200	1,200	111	21
107	931	324	747	555	1,200	1,200	111	21
107	935	326	751	555	1,200	1,200	111	21
107	939	328	755	555	1,200	1,200	111	21
107	943	330	759	555	1,200	1,200	111	21
107	947	332	763	555	1,200	1,200	111	21
107	951	334	767	555	1,200	1,200	111	21
107	955	336	771	555	1,200	1,200	111	21
107	959	338	775	555	1,200	1,200	111	21
107	963	340	779	555	1,200	1,200	111	21
107	967	342	783	555	1,200	1,200	111	21
107	971	344	787	555	1,200	1,200	111	21
107	975	346	791	555	1,200	1,200	111	21
107	979	348	795	555	1,200	1,200	111	21
107	983	350	799	555	1,200	1,200	111	21
107	987	352	803	555	1,200	1,200	111	21
107	991	354	807	555	1,200	1,200	111	21
107	995	356	811	555	1,200	1,200	111	21
107	999	358	815	555	1,200	1,200	111	21
107	1003	360	819	555	1,200	1,200	111	21
107	1007	362	823	555	1,200	1,200	111	21
107	1011	364	827	555	1,200	1,200	111	21
107	1015	366	831	555	1,200	1,200	111	21
107	1019	368	835	555	1,200	1,200	111	21
107	1023	370	839	555	1,200	1,200	111	21
107	1027	372	843	555	1,200	1,200	111	21
107	1031	374	847	555	1,200	1,200	111	21
107	1035	376	851	555	1,200	1,200	111	21
107	1039	378	855	555	1,200	1,200	111	21
107	1043	380	859	555	1,200	1,200	111	21
107	1047	382	863	555	1,200	1,200	111	21
107	1051	384	867	555	1,200	1,200	111	21
107	1055	386	871	555	1,200	1,200	111	21
107	1059	388	875	555	1,200	1,200	111	21
107	1063	390	879	555	1,200	1,200	111	21
107	1067	392	883	555	1,200	1,200	111	21
107	1071	394	887	555	1,200	1,200	111	21
107	1075	396	891	555	1,200	1,200	111	21
107	1079	398	895	555	1,200	1,200	111	21
107	1083	400	899	555	1,200	1,200	111	21
107	1087	402	903	555	1,200	1,200	111	21
107	1091	404	907	555	1,200	1,200	111	21
107	1095	406	911	555	1,200	1,200	111	21
107	1099	408	915	555	1,200	1,200	111	21
107	1103	410	919	555	1,200	1,200	111	21
107	1107	412	923	555	1,200	1,200	111	21
107	111							

gli andamenti della temperatura centrale, della T_5 e della temperatura di guaina.

La carenza di informazioni sulla temperatura superficiale ha comportato la non completa autonomia nell'elaborazione dei dati del CYRANUM 10: si sono infatti utilizzati, ai fini della valutazione della temperatura superficiale, i risultati di conduttanza di gap ottenuti mediante il CYRANUM 9, limitatamente alla prima salita a potenza.

Il confronto tra i dati relativi ai due campioni citati è riportato in Fig. 4.2.3.

A parità di potenza lineare, si osserva che:

- 1) la T_C nel campione CYRANUM 10 è leggermente superiore a quella del CYRANUM 9; la differenza media tuttavia è dell'ordine di 50°C ;
- 2) la temperatura di guaina nel CYRANUM 10 è inferiore a quella del CYRANUM 9; la differenza è dell'ordine di 50°C alla potenza di 400 W/cm ;
- 3) la temperatura periferica T_5 nel CYRANUM 10 è inferiore all'analoga nel CYRANUM 9 e lo scarto è dell'ordine di quello riscontrato nella temperatura di guaina.

Si può dedurre che, limitatamente alla prima salita a potenza, i valori della conduttanza del gap nei due dispositivi sono molto vicini e che quindi è giustificato utilizzare i valori di conduttanza trovati col CYRANUM 9.

Nelle Figure 4.2.4 e 4.2.5 sono riportate le curve di conducibilità e di integrale di conducibilità relativamente alla I^* salita a potenza, insieme con la curva teorica ricavata sulla base delle correlazioni di Deissler e Bian⁽³⁾.

Anche nel CYRANUM 10 si è notato dopo le prime ore di irraggiamento un rilevante aumento nelle temperature T_5 e T_C per valori costanti della temperatura di guaina e della potenza lineare. Per quanto riguarda l'elaborazione dei punti sperimentali rilevati dopo il verificarsi di questo fenomeno si possono fare le seguenti osservazioni:

- 1) a parità di potenza lineare l'aumento della temperatura centrale nel CYRANUM 10 è circa doppio di quello riscontrato nel CYRANUM 9;
- 2) le curve della temperatura periferica T_5 dei due campioni coincidono (tranne alcuni punti iniziali del secondo ciclo del CYRANUM 9, dovuti forse ad uno spostamento del centro termico). L'aumento nella T_5 del CYRANUM 10 risulta quindi superiore a quello del CYRANUM 9.

Da queste osservazioni risulterebbe che c'è per il CYRANUM 10 dopo l'aumento delle temperature una conducibilità inferiore ai valori determinati prima dell'aumento delle temperature. Si può concludere che non è ricavabile un valore dell'Hg sulla base del confronto delle sole temperature periferiche T_5 . Pertanto non è stata determinata la curva della $K(T)$ dopo l'aumento delle temperature.

4.3 - Risultati dei campioni a sol-gel - CYRANUM 7 e 8

Sono stati irraggiati due campioni contenenti combustibile sottoforma di sfere sol-gel. Le storie termiche dei due campioni sono riportate nelle Figg. 4.3.1 e 4.3.2.

Durante la prima salita a potenza le termocoppie periferiche del combustibile si sono rotte in ambedue i cam-

Fig. 4.3.3 - Condizioni d'irraggiamento

Temperatura esterna di guaina (°C)	Temperatura periferica (°C)	Temperatura periferica (°C)	Temperatura centrale (°C)	Temperatura totale (°C)	Tensione solenoidale (V)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)
103	102	102	102	102	0,7	102	102	102
127	127	127	127	127	0,7	127	127	127
143	143	143	143	143	0,7	143	143	143
157	157	157	157	157	0,7	157	157	157
170	170	170	170	170	0,7	170	170	170
185	185	185	185	185	0,7	185	185	185
199	199	199	199	199	0,7	199	199	199
211	211	211	211	211	0,7	211	211	211
220	220	220	220	220	0,7	220	220	220
231	231	231	231	231	0,7	231	231	231
240	240	240	240	240	0,7	240	240	240
251	251	251	251	251	0,7	251	251	251
263	263	263	263	263	0,7	263	263	263
273	273	273	273	273	0,7	273	273	273
283	283	283	283	283	0,7	283	283	283
293	293	293	293	293	0,7	293	293	293
300	300	300	300	300	0,7	300	300	300
306	306	306	306	306	0,7	306	306	306
316	316	316	316	316	0,7	316	316	316
326	326	326	326	326	0,7	326	326	326
332	332	332	332	332	0,7	332	332	332
342	342	342	342	342	0,7	342	342	342
352	352	352	352	352	0,7	352	352	352
362	362	362	362	362	0,7	362	362	362
372	372	372	372	372	0,7	372	372	372
382	382	382	382	382	0,7	382	382	382
392	392	392	392	392	0,7	392	392	392
400	400	400	400	400	0,7	400	400	400
500	500	500	500	500	0,7	500	500	500
508	508	508	508	508	0,7	508	508	508

(*) - I dati contrassegnati con asterisco sono la media di due collezioni.
Gli altri sono il valore relativo ad un solo collection.

pioni prima di raggiungere la massima potenza. Nelle Figg. 4.3.3 e 4.3.4 sono riportate le curve di temperatura per i due campioni rispettivamente.

Dal confronto tra i valori della temperatura centrale e periferica e sulla base della conducibilità misurata per la polvere di UO_2 e di dati ricavabili dalla letteratura si è potuto concludere che la posizione delle termocoppie periferiche era assai più vicina al centro del combustibile di quanto non fosse deducibile dai dati di caricamento. Dagli esami di post-irraggiamento tale impressione è stata parzialmente confermata dalla presenza di lingotti metallici diffusi alla periferia del combustibile.

Le curve dell'integrale di conducibilità e della conducibilità sono state quindi determinate calcolando la temperatura superficiale del combustibile mediante la conduttanza misurata nei campioni vibrocompattati ad ossido di uranio.

Questa estrapolazione può essere fatta in quanto che, seppure le dimensioni e la forma delle particelle sol-gel sono diverse rispetto a quelle della polvere ad UO_2 , il meccanismo di scambio termico può ritenersi lo stesso: dipendenza dal gas di riempimento, debole o nulla pressione del contatto tra particelle e guaina sono gli elementi comuni che hanno un peso decisivo ai fini dello scambio termico interfacciale.

Nel campione CYRANUM 8 si dispone soltanto dei dati relativi alla prima salita a potenza il cui esame non rivela particolari anomalie. Pertanto è stato attribuito al campione 8 la conduttanza interfacciale "non modificata" o iniziale del CYRANUM 9: le curve di integrale e di conducibilità così trovate, e riportate nelle Figg. 4.3.5 e 4.3.6, sono quindi

riferite al combustibile non modificato.

Nel CYRANUM 7 la termocoppia centrale ha funzionato fino alla fine dell'irraggiamento, pertanto sono distinguibili varie fasi.

Durante il raggiungimento della massima potenza in corrispondenza alla temperatura centrale di 1.400°C si è verificato un aumento nella temperatura di combustibile. L'entità dell'aumento verificabili sulla temperatura centrale è dell'ordine di 150°C analogo a quello riscontrato sul CYRANUM 9.

Successivamente il livello di potenza del campione resta costante fino a quando verso la fine del ciclo, si porta il campione, per alcune ore, ad una potenza di $\sim 400 \text{ W/cm}$ corrispondente ad una temperatura centrale di circa 2.100°C .

Nel II° ciclo dopo alcune ore a potenza molto bassa ($\sim 150 \text{ W/cm}$) il campione è stato portato ad una potenza costante di $400\text{--}450 \text{ W/cm}$ fino alla fine del ciclo.

Durante questa fase si osserva, a parità di potenza lineare, un decremento della temperatura centrale di circa 200°C .

Per il calcolo della conducibilità termica e dell'integrale di conducibilità sono stati considerati i punti sperimentali rilevati durante le salite a potenza avvenute nella fase finale del I° ciclo e all'inizio del II° ciclo.

Essendo la salita a potenza avvenuta dopo il fenomeno di aumento delle temperature di combustibile, per il calcolo della temperatura superficiale si è assunta la conduttanza interfacciale "modificata" del campione CYRANUM 9.

Le curve di conducibilità e di integrale, rappresentate in Figg. 4.3.5 e 4.3.6, sono da ritenersi relative al combustibile non modificato.

La gran parte delle modificazioni di struttura avviene presumibilmente durante il secondo ciclo, nel periodo di permanenza del campione a 400 W/cm , questo è confermato dal calo di temperatura di $\sim 200^{\circ}\text{C}$ osservato.

Non è stato tuttavia possibile determinare le curve di conducibilità ed integrale relative al combustibile modificato in quanto non sono state eseguite ulteriori escursioni di potenza.

E' stato tuttavia eseguito un calcolo di verifica della distribuzione di temperatura in condizione di combustibile "modificato", tenendo conto della formazione del foro centrale e della densificazione della parte centrale del combustibile.

Il calcolo è stato eseguito a partire dalla ceramografia della sezione trasversale mediana della pin dopo irraggiamento ed assumendo per la parte densificata una conducibilità termica pari a quella di una pellet con densità 95%.

In Fig. 4.3.7 sono mostrate le curve di temperatura relative al combustibile "non modificato" e modificato; risulta una differenza nella temperatura centrale di 196°C in buon accordo con l'abbassamento di temperatura misurato sperimentalmente.

5 - COMMENTI

5.1 - Integrale di conducibilità

In Fig. 5.1.1 sono riportate le curve di integrale di conducibilità ricavate dall'irraggiamento delle 4 capsule.

Le curve relative ai campioni sol-gel sono praticamente coincidenti e si situano all'interno della fascia delimitata superiormente dalla curva del CYRANUM 9 ed inferiormente da quella del CYRANUM 10.

Tra le due curve esiste uno scarto costante dell'ordine del 13% sulla cui origine si sono avanzate alcune ipotesi. Si può, per esempio, attribuire la differenza ad una sottostima della potenza sviluppata nel campione CYRANUM 10; si ha però, a parità di temperatura centrale, una buona corrispondenza tra le densità lineari di potenza nei due campioni che sembra smentire questa affermazione.

Un'altra causa della differenza tra le due curve potrebbe essere legata all'utilizzo per il CYRANUM 10 dei valori di conduttanza ottenuti con il CYRANUM 9; la necessità di questa estrapolazione nasceva dal fatto che la termocoppia di combustibile posta ad 1 mm dalla guaina non aveva funzionato.

La differenza tra la temperatura di guaina e la temperatura misurata all'interfaccia tra combustibile e guaina è risultata però la stessa, a parità di potenza, nei due campioni: questo significa che è giustificato assumere uguale conduttanza nei due campioni e diversa conducibilità termica, che non il viceversa.

In conclusione, quindi, le differenze di comportamento termico dei due campioni sembrano più legate alla conducibilità del combustibile che non alla conduttanza dell'interfaccia combustibile/guaina.

L'entità della differenza riscontrata è leggermente superiore all'errore stimato della misura, che si aggira sul 9-10%; il discorso sulla spiegazione della differenza tra le due curve di integrale di conducibilità non ha, a questo punto, ulteriori elementi di giudizio ravvisabili all'interno dell'insieme dei dati forniti dalle misure dirette in pila.

Il problema potrà essere eventualmente riaperto a conclusione degli esami post-irraggiamento.

5.2 - Conduttanza combustibile/guaina

L'aspetto più interessante emerso nello studio della conduttanza combustibile/guaina è stata l'osservazione della sua netta diminuzione dopo le prime ore di irraggiamento: su questo fenomeno vengono riportate le seguenti considerazioni.

Lo scambio termico tra il combustibile a polvere e la guaina avviene attraverso le particelle di combustibile a contatto della guaina e attraverso il gas di riempimento; si può scrivere cioè:

$$H_g = H_S + H_f \quad (5.2.1)$$

in cui H_S rappresenta la componente di scambio solido/solido ed H_f la componente gassosa.

Considerando il modello di Cetinkale e Fishenden⁽⁵⁾ si trova che l'analogia non è completa non potendosi considerare piccola la distanza tra le particelle di combustibile rispetto alle loro dimensioni: tuttavia si può ancora scrivere:

$$H_S \propto n a K_m \quad (5.2.2)$$

in cui a e n sono rispettivamente il raggio e il numero per unità di superficie delle particelle in contatto con la guaina, e:

$$K_m = \frac{2 K_1 K_2}{K_1 + K_2} \quad (5.2.3)$$

dove K_1 e K_2 sono le conducibilità termiche dei due materiali di contatto. In analogia con il modello di Ross e Stoute^(6,7), il contributo gassoso dipende dallo spessore t del gas tra le particelle di combustibile e la guaina e del tipo di gas, cioè:

$$H_f = \frac{K_g}{t + a} = \frac{K_g}{\delta} \quad (5.2.4)$$

dove a dipende dal tipo di gas e dallo stato della superficie.

Nel caso di combustibile vibrocompattato si possono fare le seguenti osservazioni:

- il numero di punti di contatto dipende poco dalla potenza in quanto il volume libero nel combustibile è sufficiente ad assorbire la dilatazione termica riducendo quindi la pressione del combustibile sulla guaina;

- il valore di K_m dipendendo dalla conducibilità dei materiali in contatto dipende dalla temperatura e quindi dalla potenza lineare. Nel caso nostro fino a temperature dell'ordine di quelle raggiunte dalla superficie del combustibile la conducibilità decresce con la temperatura mentre quella dello Zircaloy-2 aumenta; essendo $K_{Zr} > K_{comb}$ si ha una diminuzione di K_m con la potenza;
- una variazione dello stato chimico della guaina (ossidazione) provoca un forte abbassamento della conducibilità di una delle superfici in contatto, con la conseguenza di abbassare il valore del coefficiente di scambio⁽⁹⁾;
- il termine K_g dipende linearmente dalla conducibilità del gas di riempimento (nel nostro caso He): essa varia da $1,55 \times 10^{-3}$ a $3,1 \times 10^{-3}$ W/cm °C nell'intervallo di temperatura 20-600 °C.

Si può concludere pertanto che:

- il contributo H_S è praticamente indipendente dalla potenza (aumento del numero di punti di contatto, diminuzione della K_m);
- il contributo H_f varia linearmente con la potenza (aumento lineare della K_g).

Sulla base delle rilevazioni effettuate sul campione CYRANUM 9 è stata eseguita una valutazione dei coefficienti H_S e δ delle formule (5.2.1) e (5.2.4).

Nella tabella 5.2.1 è riportato il confronto tra i valori misurati e calcolati dopo la modifica della conduttanza. I valori riportati nell'ultima colonna della suddetta tabella si calcolano avendo inserito nella formula (5.2.5) se-

guente i valori di $H_S = 0,08$ e $\delta = 0,0189$ cm.

$$H_g = H_S + \frac{K_g}{\delta} \quad (5.2.5)$$

Supponendo l'esistenza, dopo la modificazione, di uno strato di ossido di Zr sulla superficie interna della guaina, il contatto avverrebbe tra UO_2 - PuO_2 e $Zr-O_2$. La conducibilità termica dell'ossido di Zirconio è circa 0,017 W/cm °C per cui $K_m = 0,029$ contro un valore di 0,11 prima della modificazione.

Il valore iniziale stimato di H_S verrebbe quindi ad essere:

$$H_S = 0,308$$

in buon accordo con i dati misurati prima della modifica.

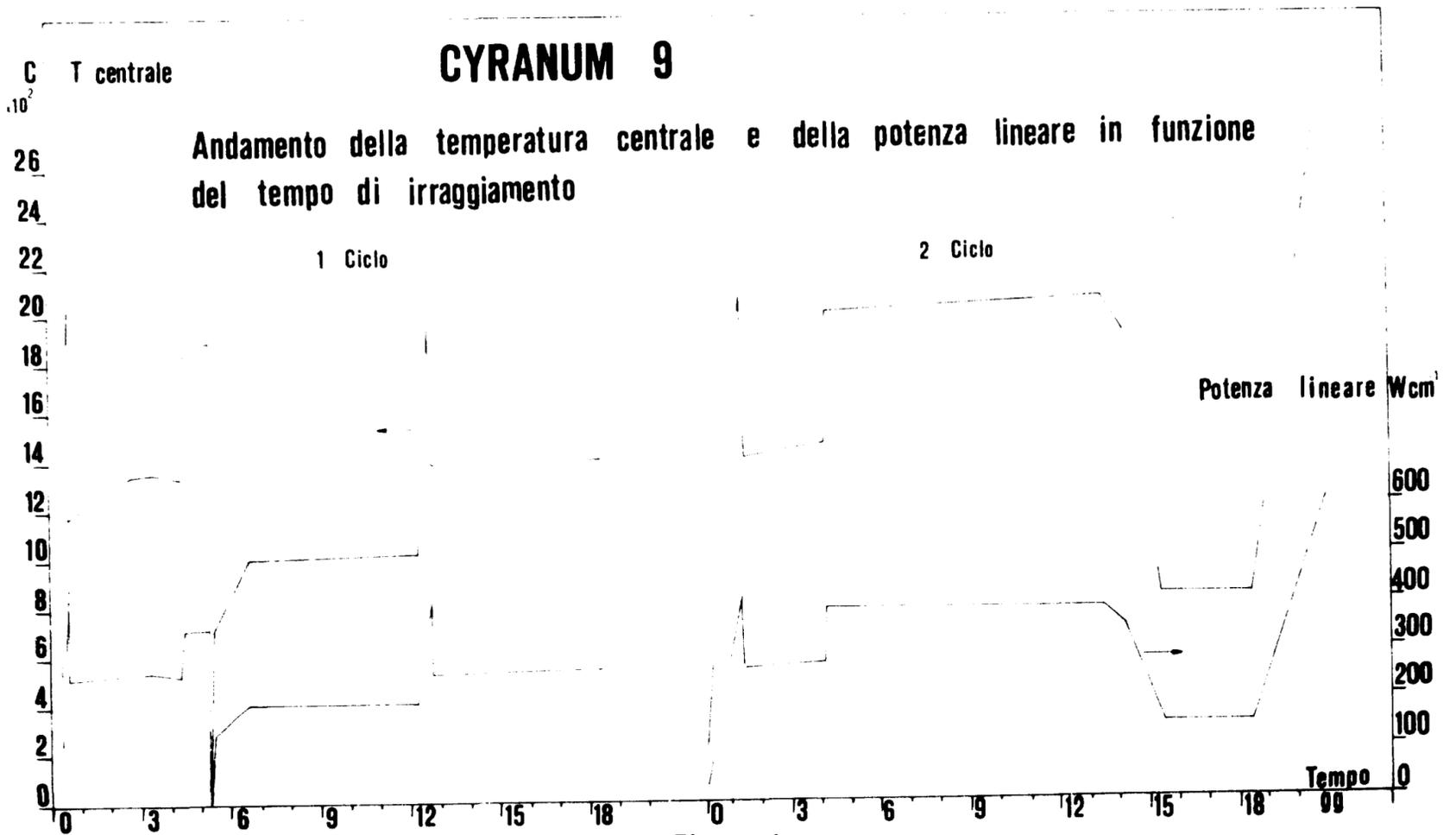


Fig. 4.1.1

34

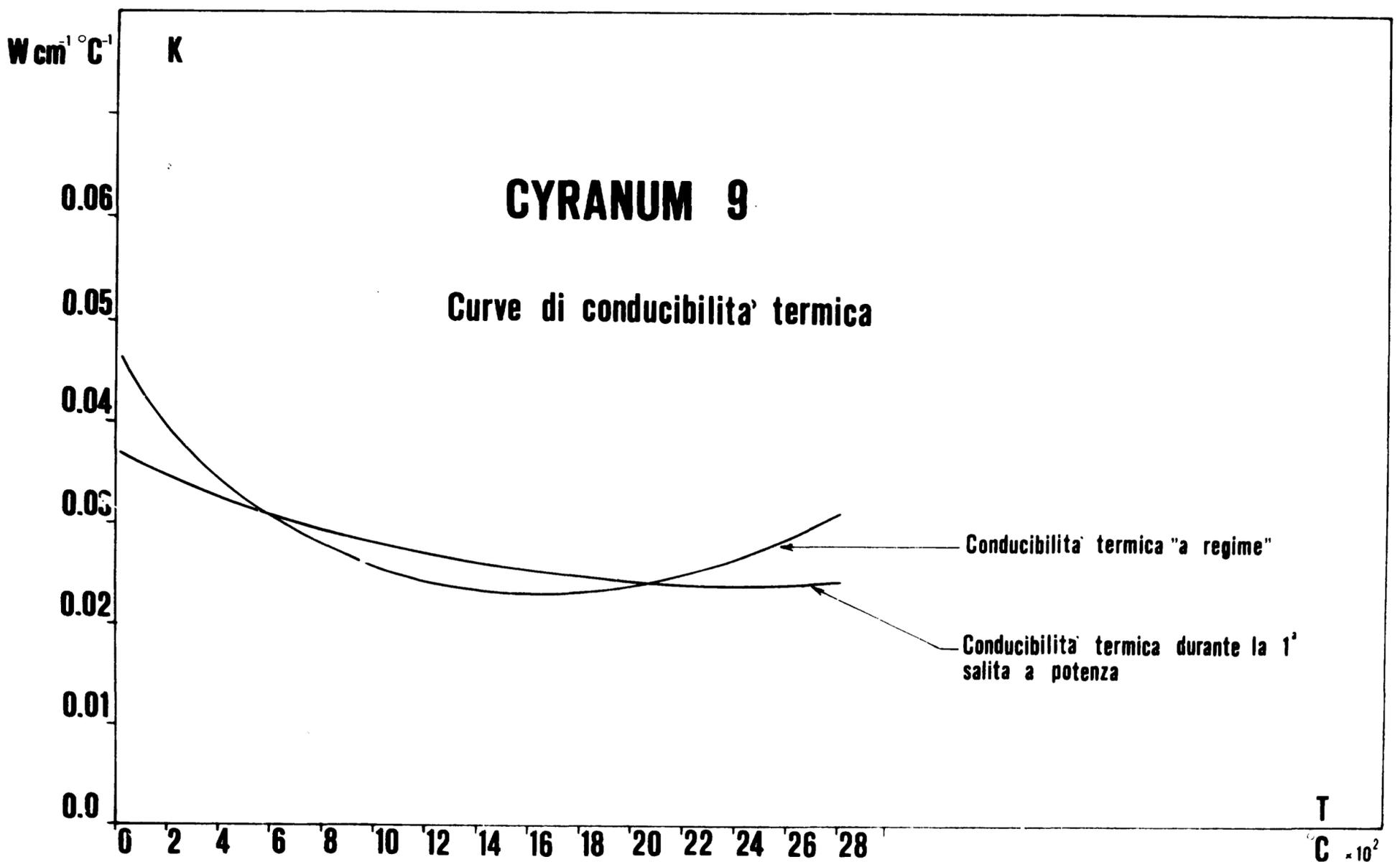


Fig. 4.1.2.

35

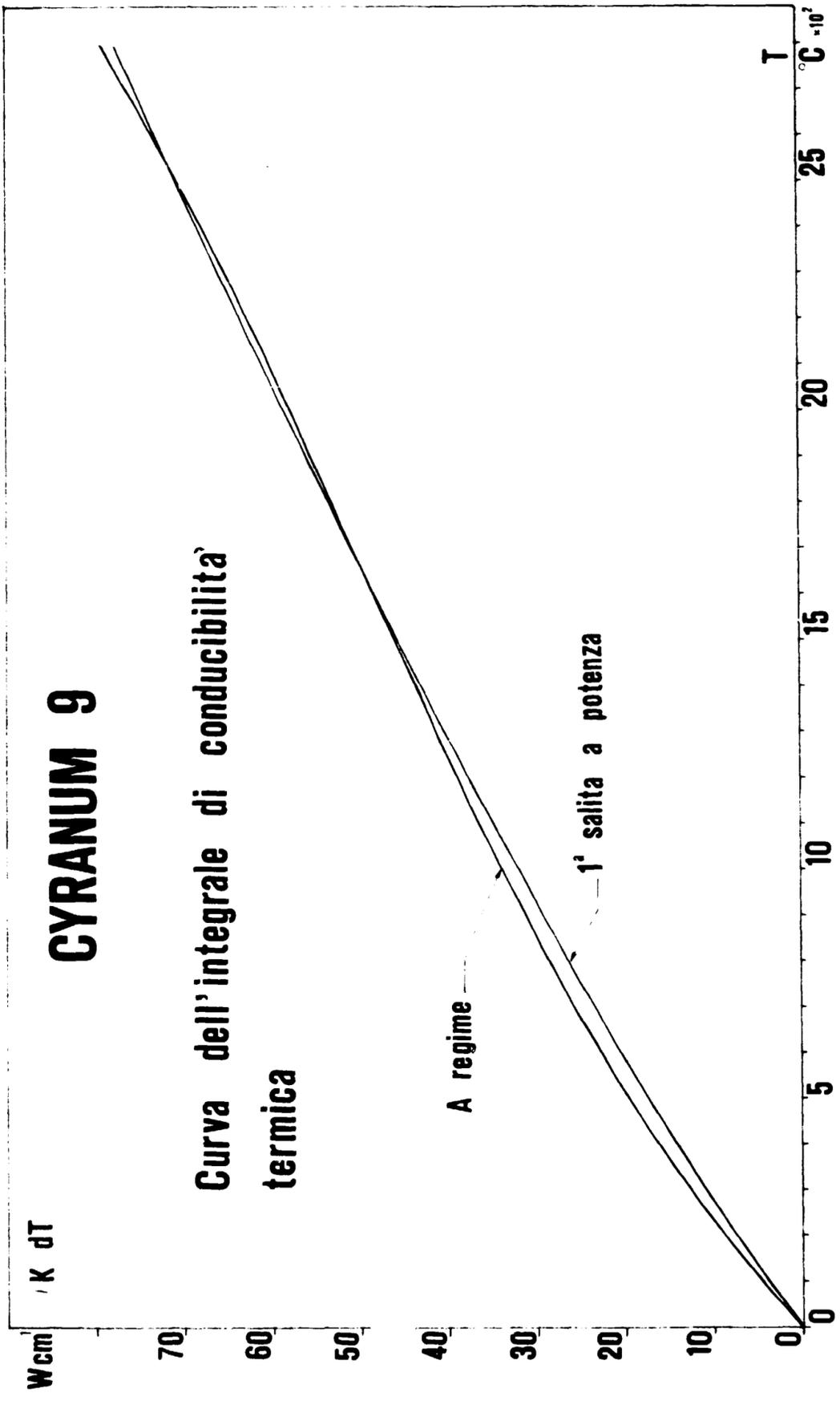


Fig. 4.1.3.

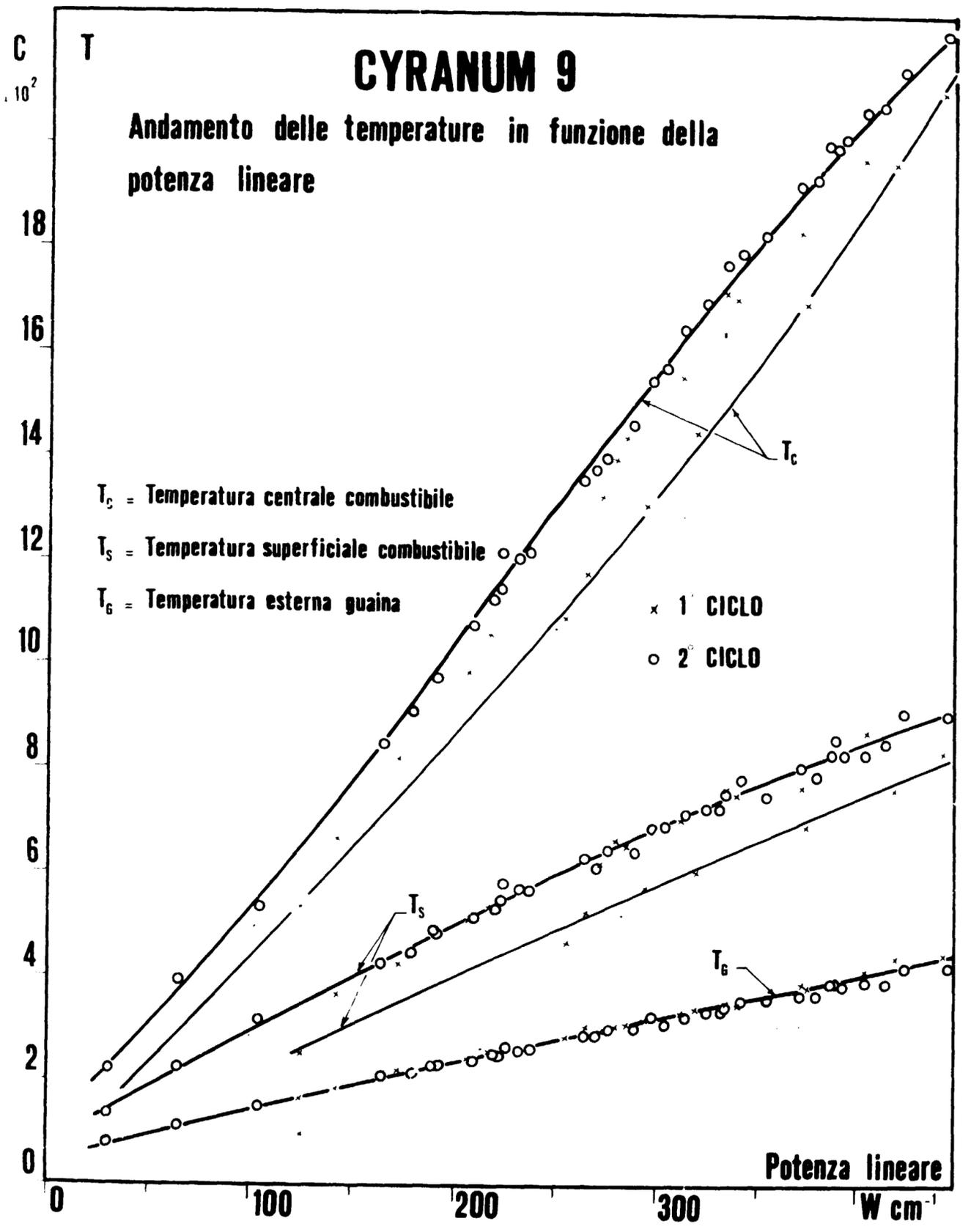


Fig. 4.1.4.

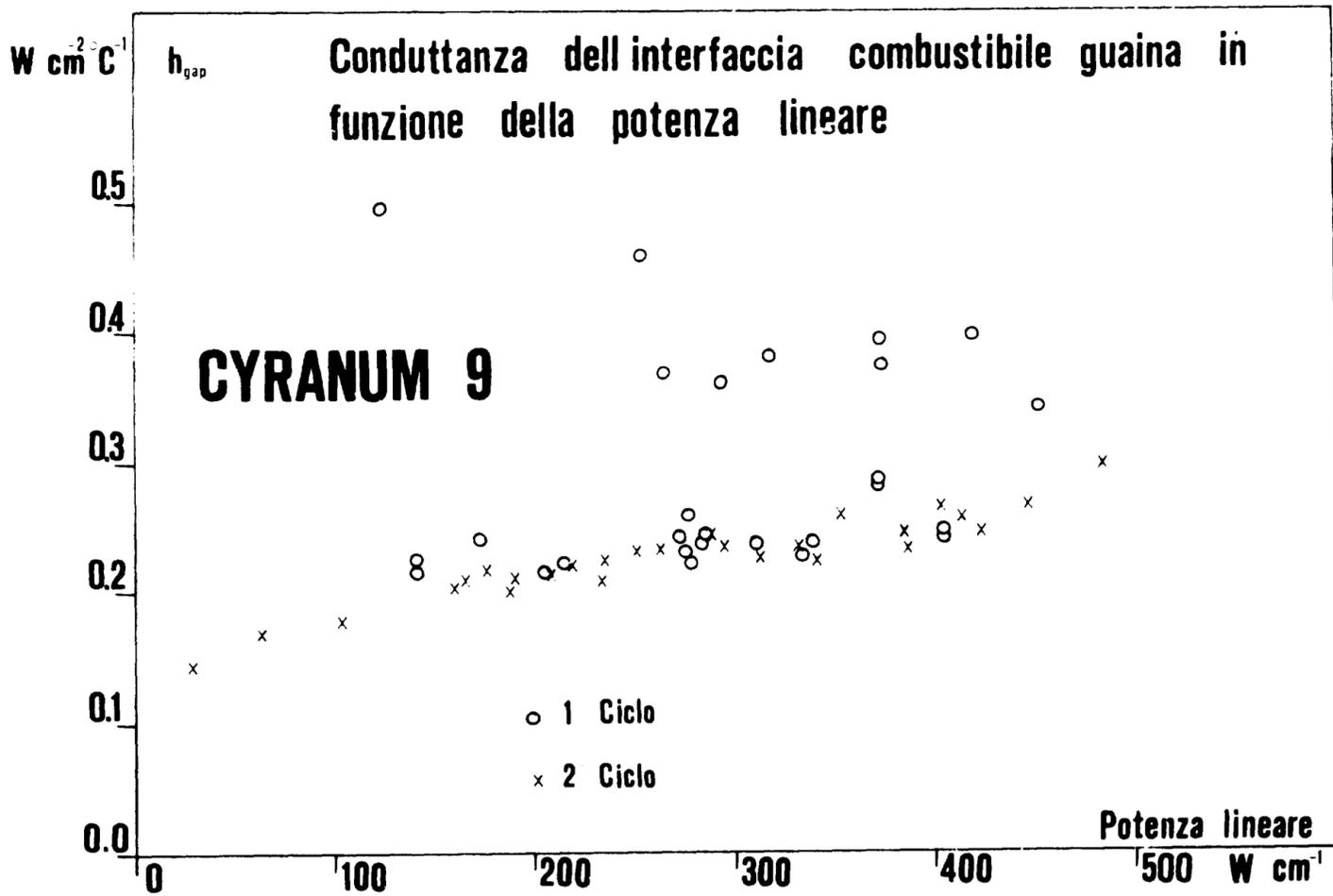


Fig.4.1.5.

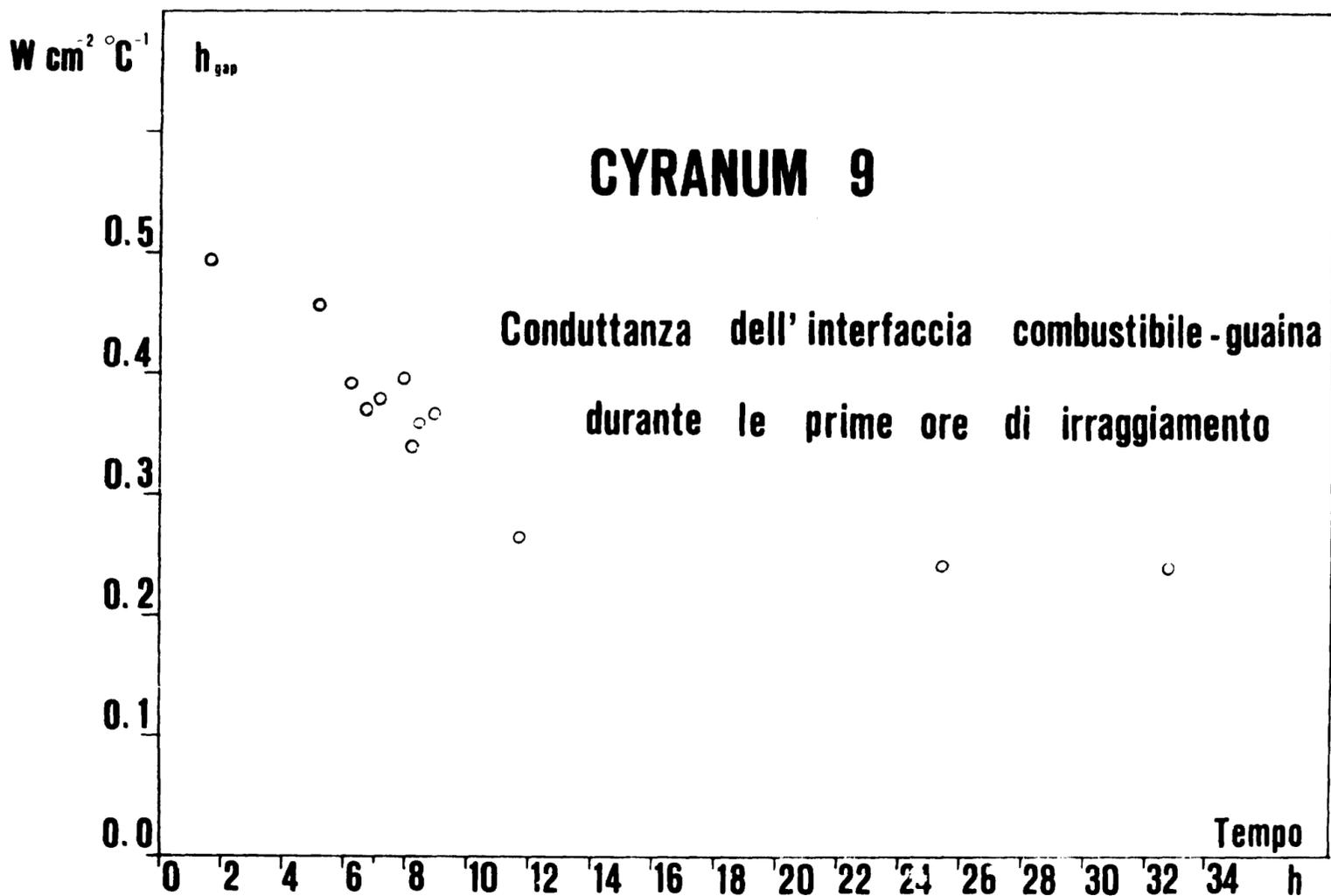


Fig. 4.1.6.

CYRANUM 10

Andamento della temperatura centrale e della potenza lineare in funzione del tempo di irraggiamento

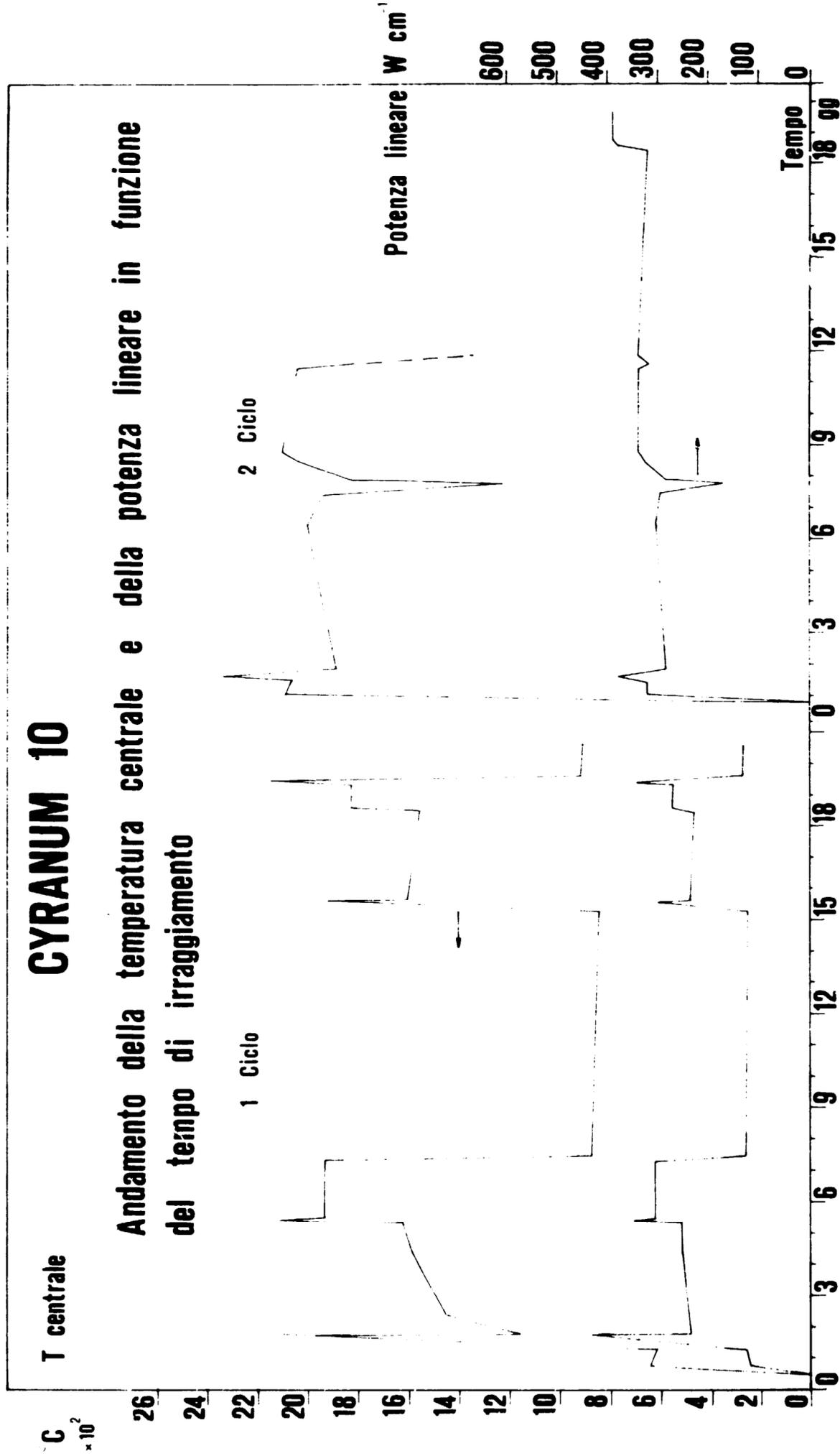


Fig.4.2.1.

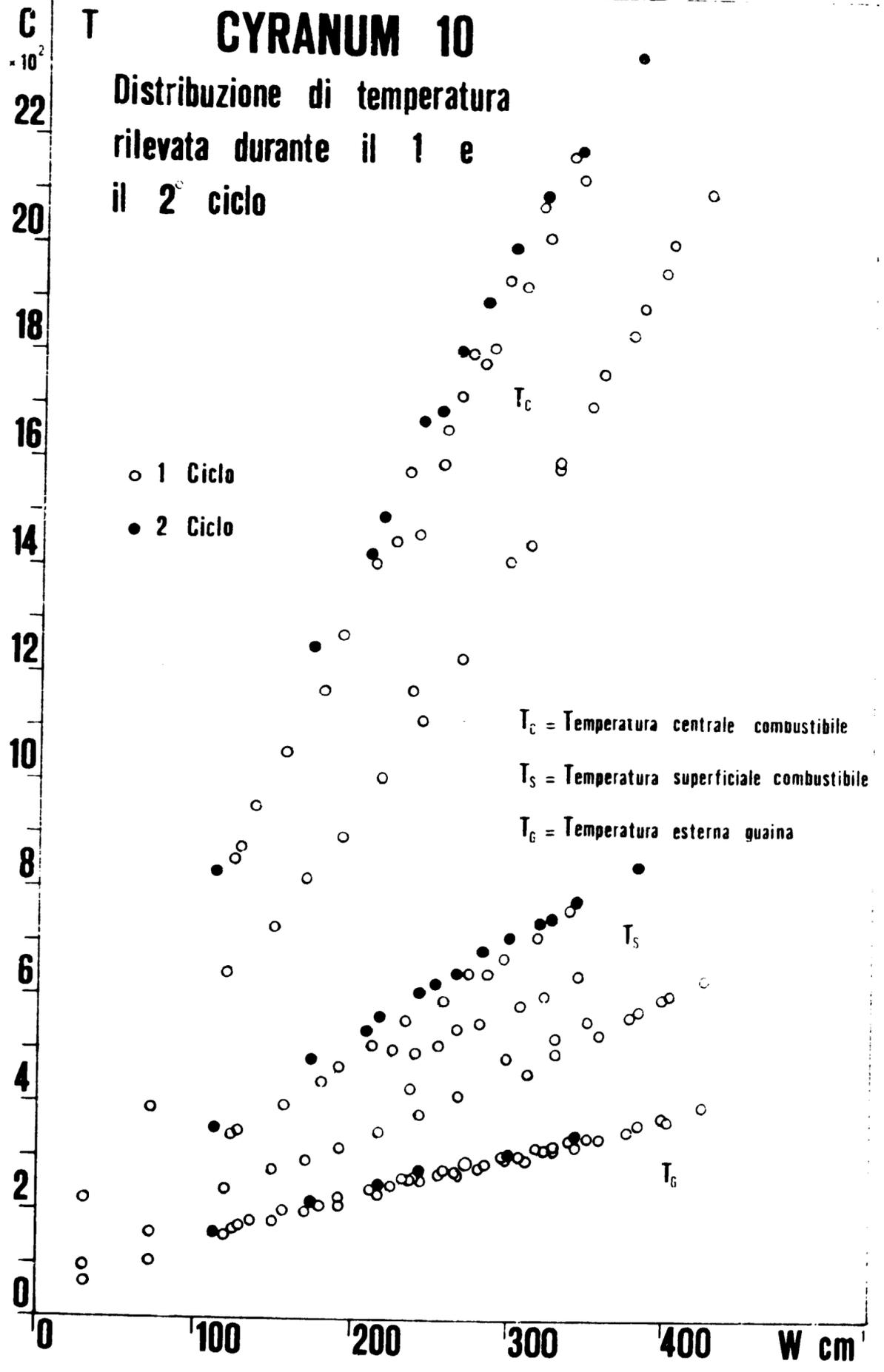


Fig.4.2.2.

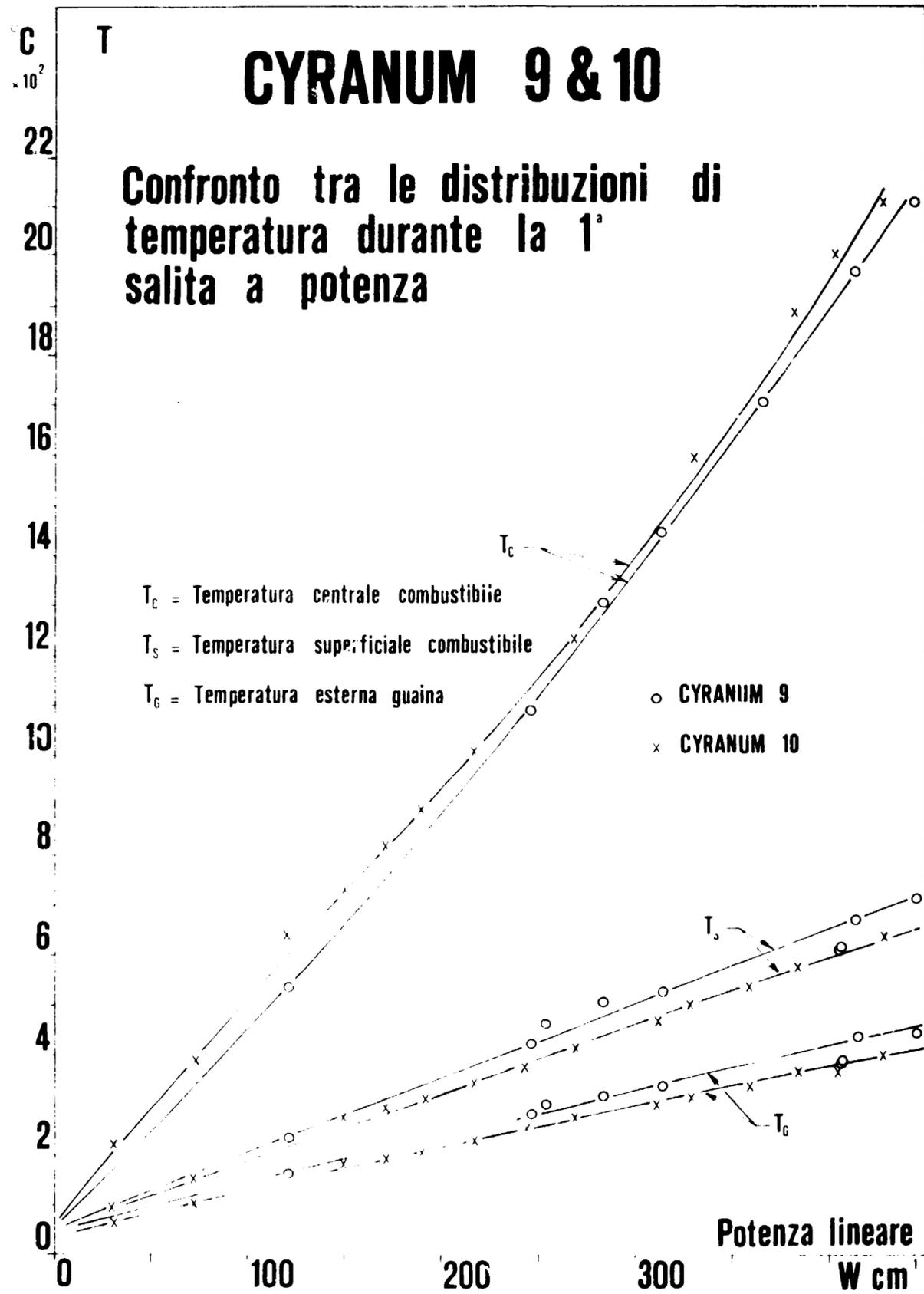


Fig.4.2.3.

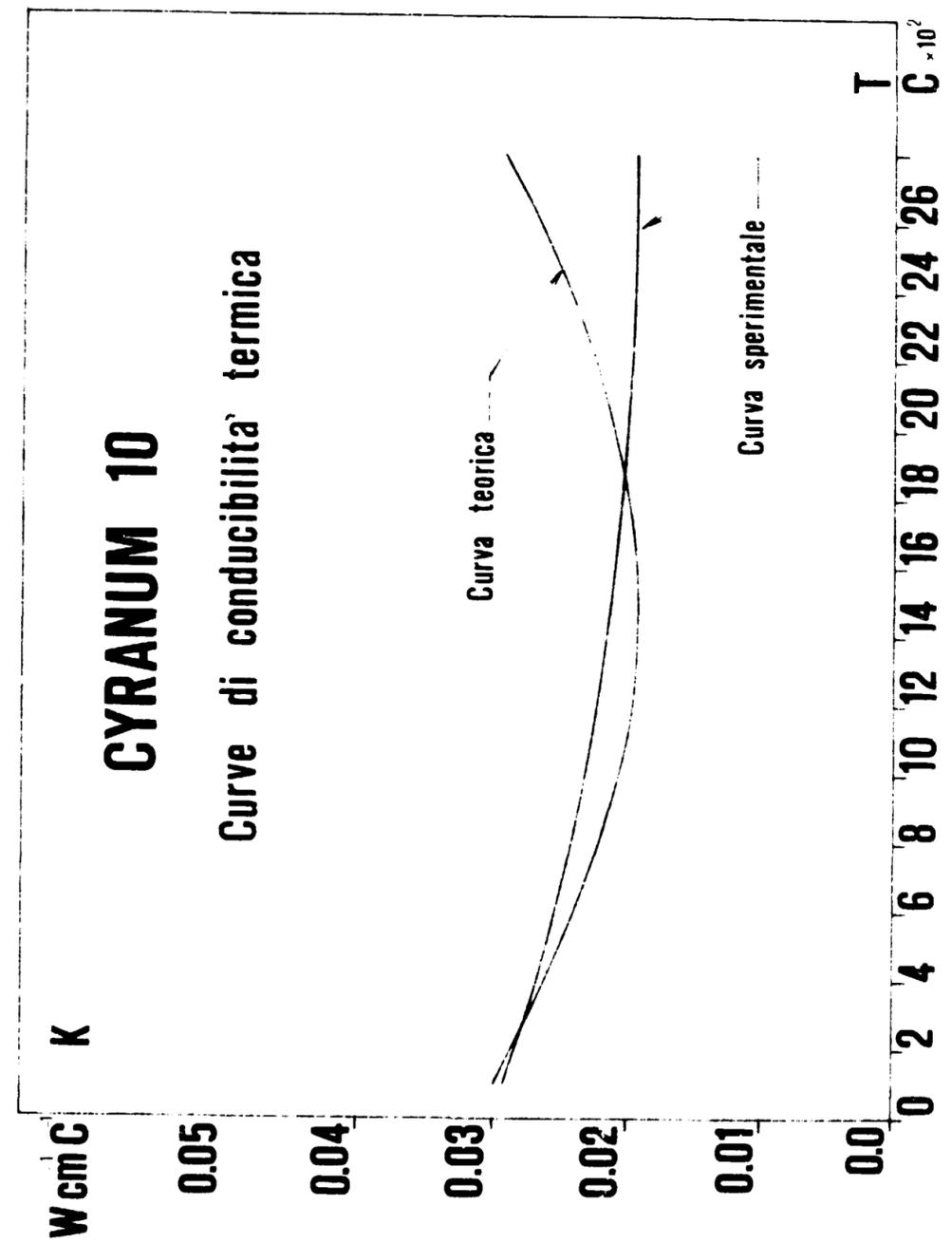


Fig.4.2.4.

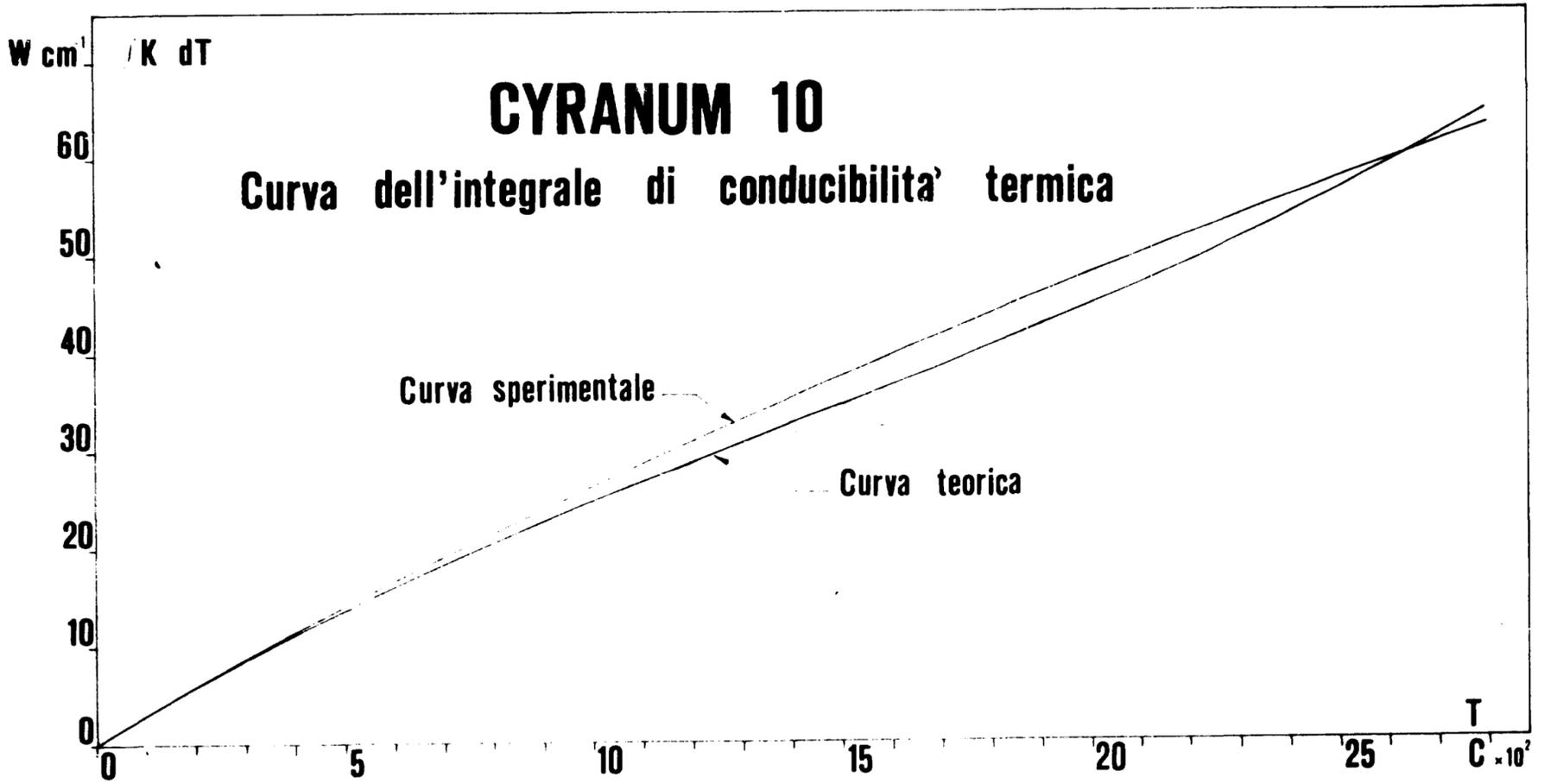


Fig.4.2.5.

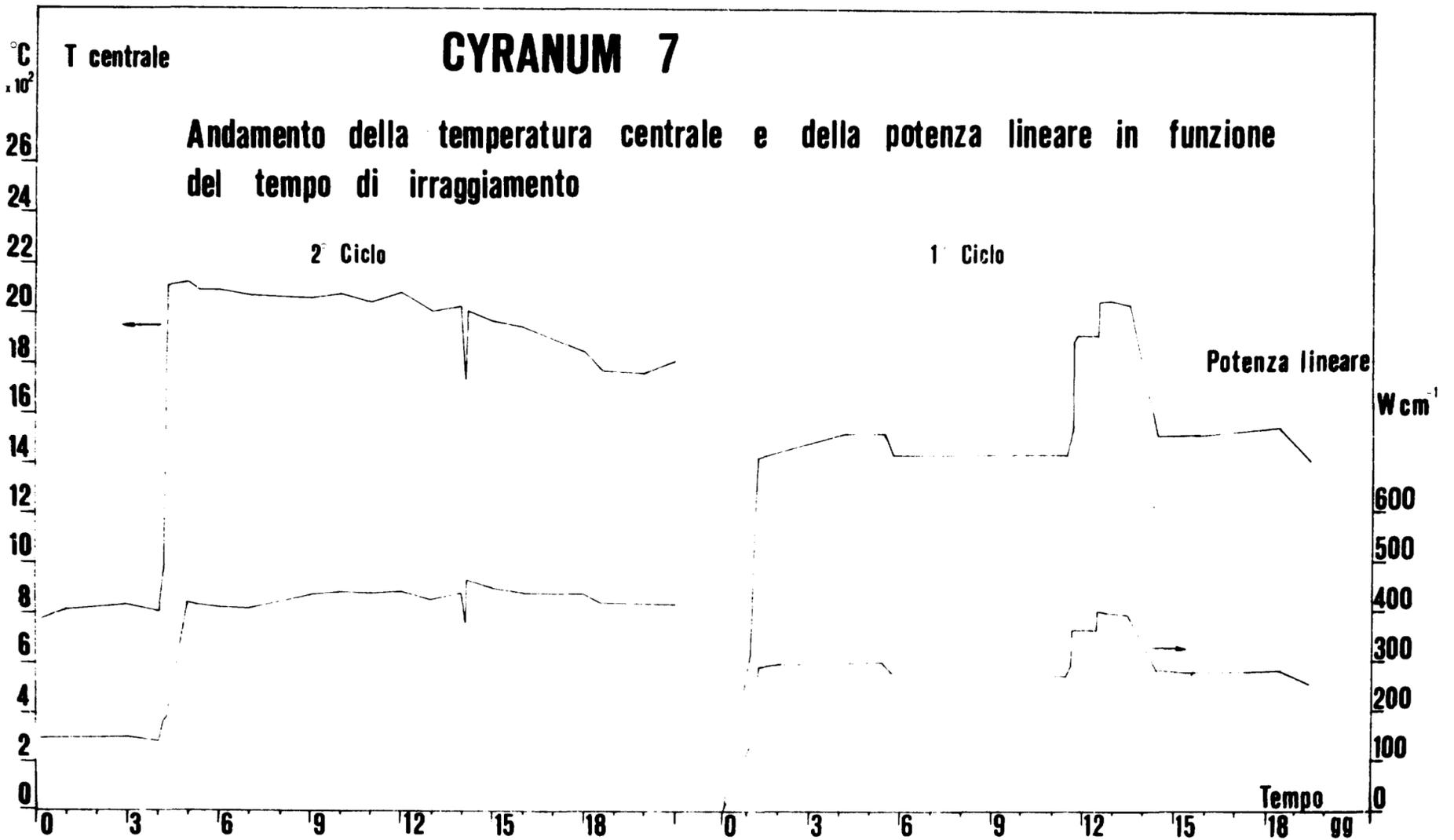


Fig.4.3.1

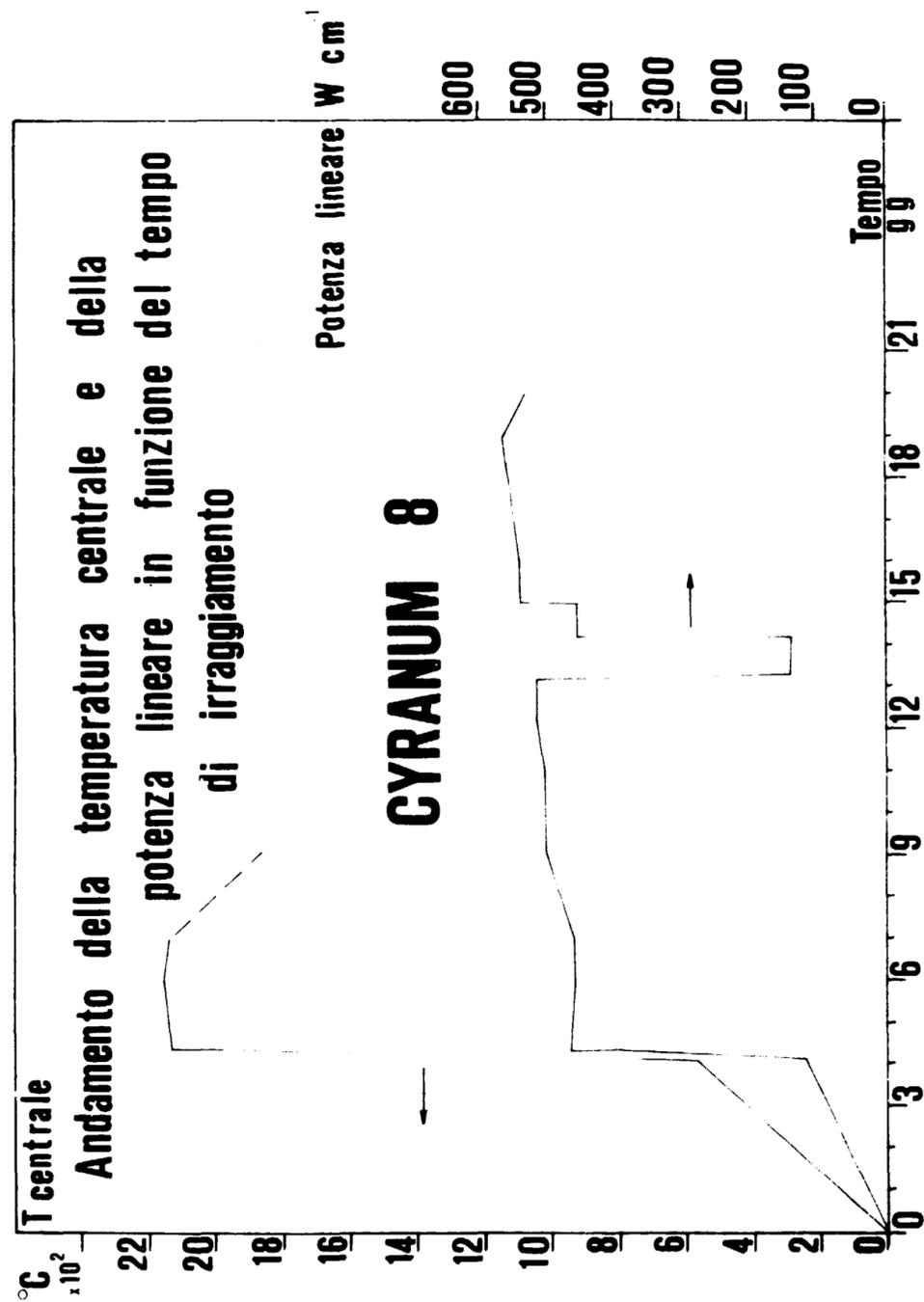


Fig. 4.3.2.

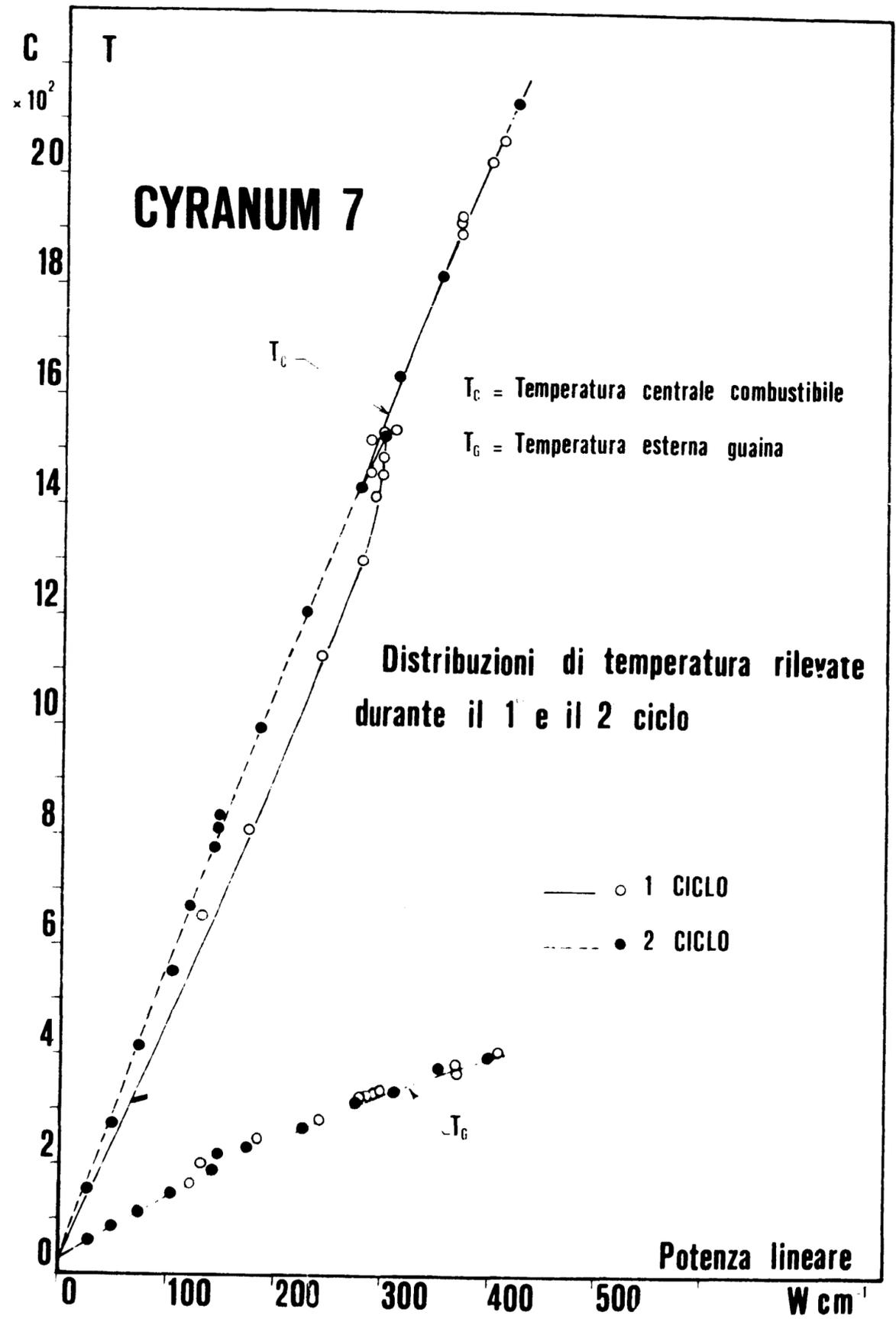


Fig.4.3.3.

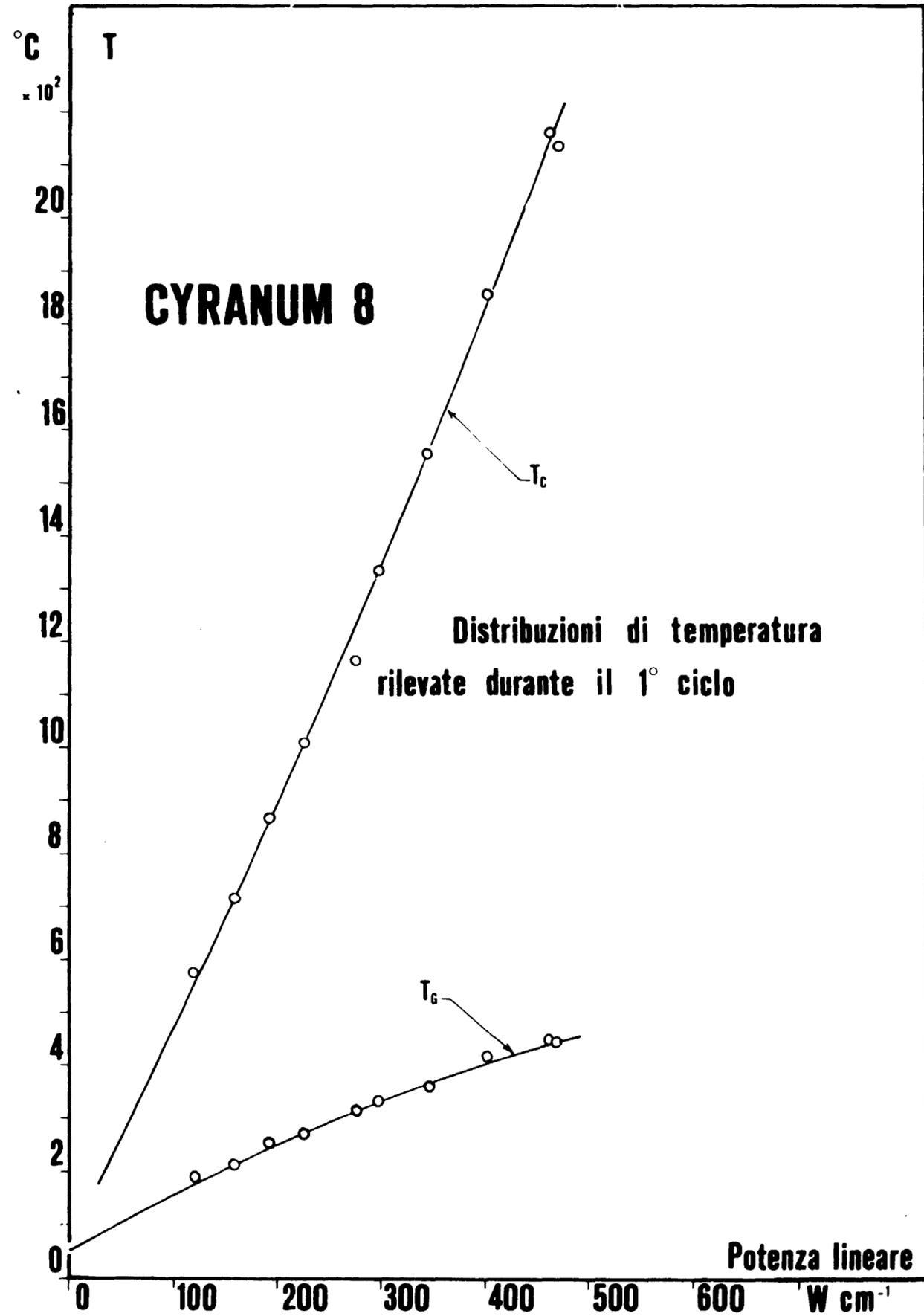


Fig. 4.3.4.

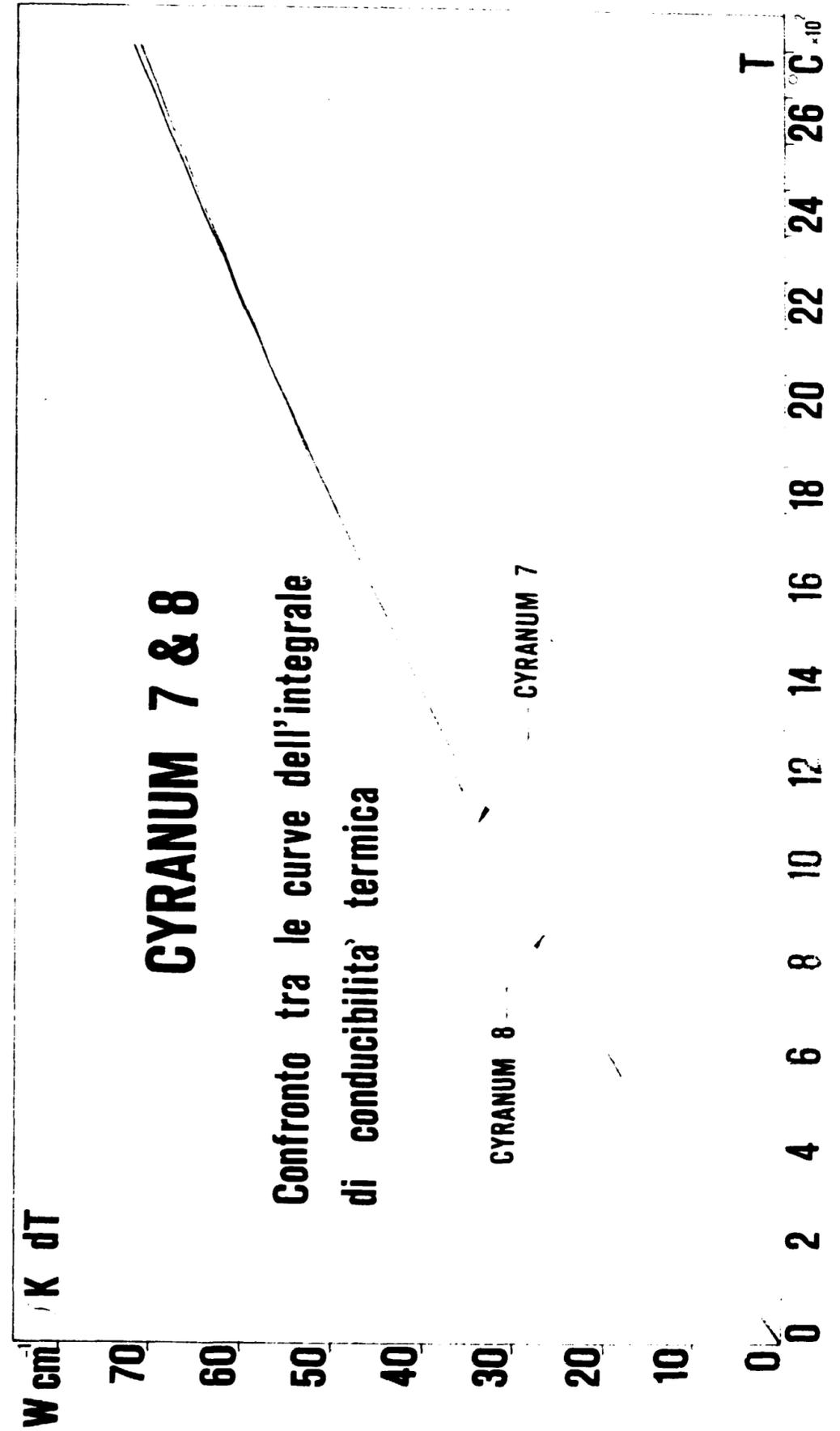


Fig. 4.3.5

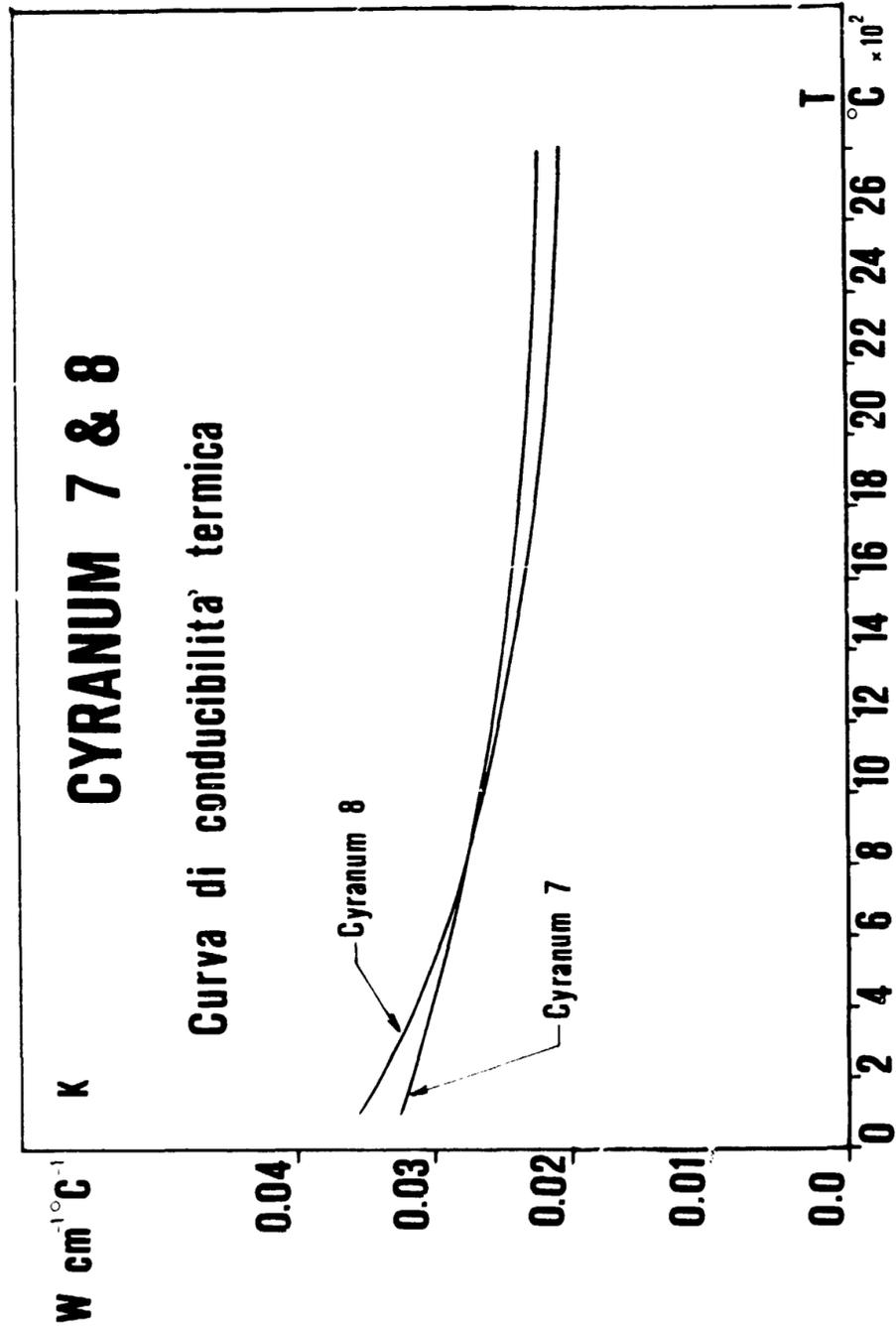
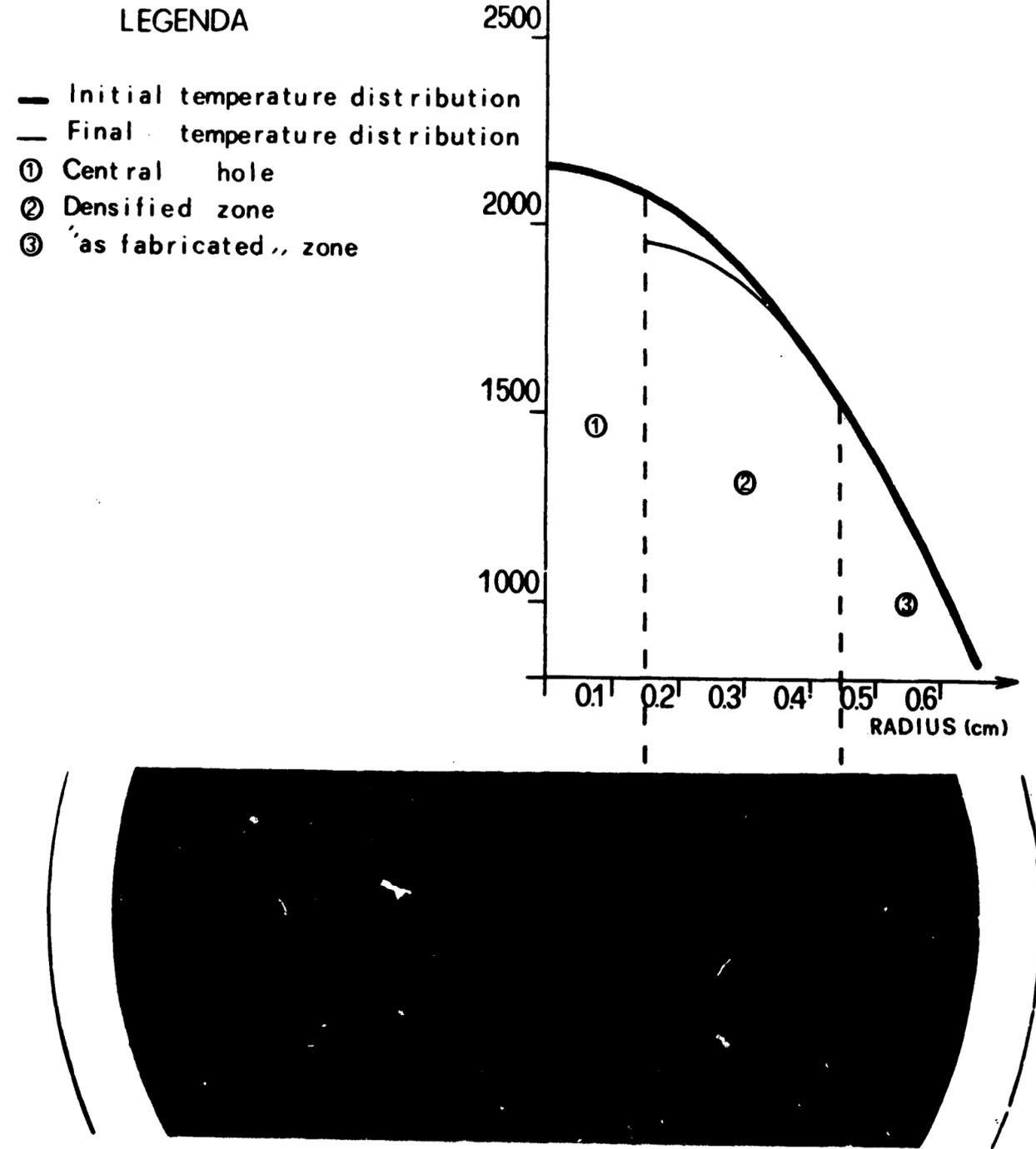


Fig.4.3.6.



CYRANUM 7 Initial and final temperature distribution

Fig.4.3.7.



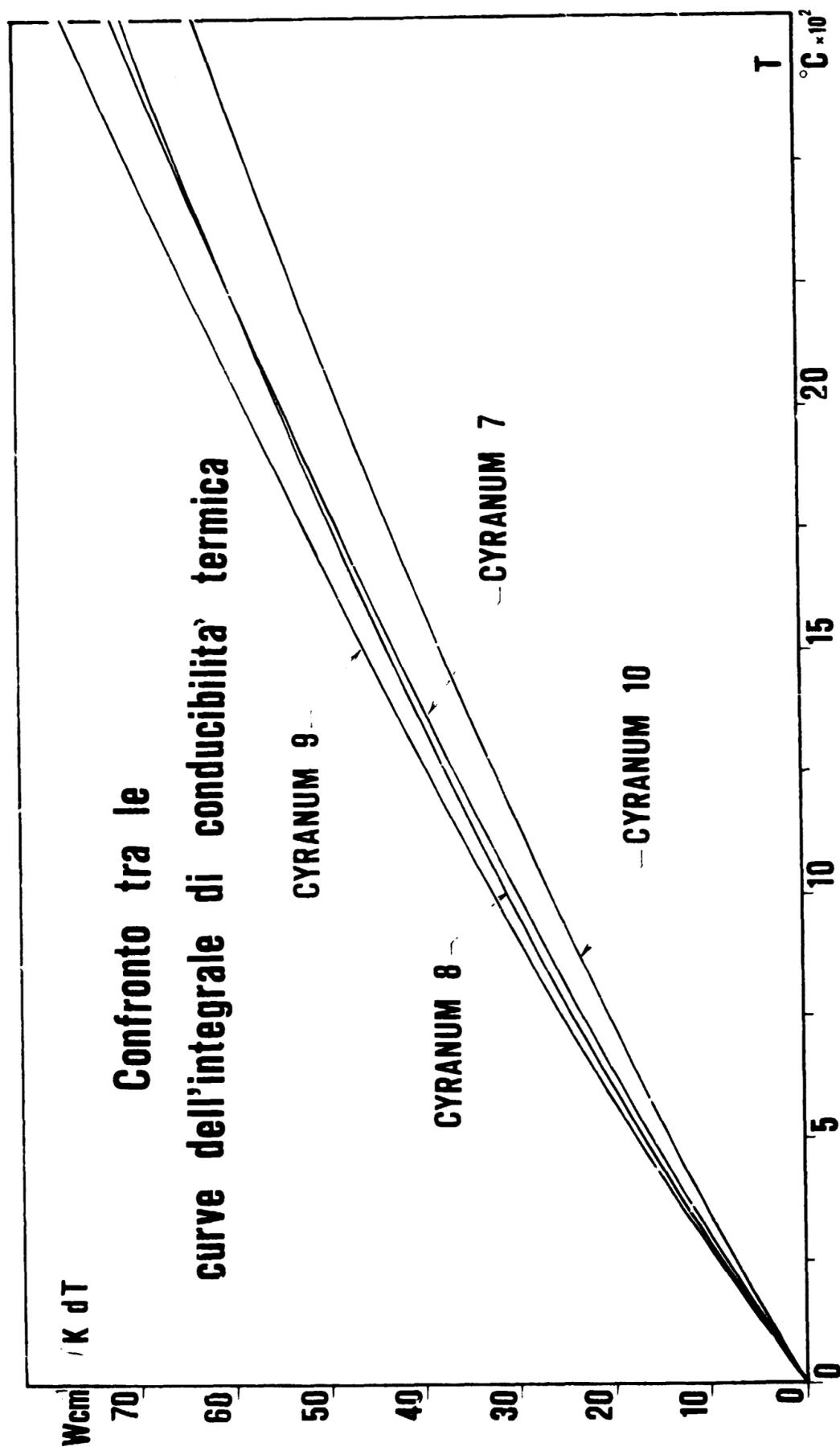


Fig. 5.1.1.

APPENDICE I

A - Descrizione del dispositivo

Per una descrizione sommaria del dispositivo di irraggiamento si rimanda all'Appendice A della ref. (1).

L'unica variazione consiste nella sostituzione delle rondelle di acciaio sinterizzato della barriera termica con rondelle di Alluminio, allo scopo di diminuire, a parità di potenza, la temperatura di guaina del campione.

B - Descrizione dei campioni

In Fig. A.I.1 è riportata la sezione longitudinale della barretta; una termocoppia W-Re 5%/W-Re 25% è posta sull'asse della barra mentre le due termocoppie periferiche di Chromel Alumel sono situate rispettivamente ad 1 mm ed a contatto della superficie interna di guaina.

B.1 - Guaina

Le caratteristiche del tubo di guaina sono riportate nella Tabella B.1 fornito dalla casa costruttrice, la JOLVERIDE TUBE Division.

TAB. B.1 - Caratteristiche dei tubi di Zr-2

Diametro esterno (mm)	15,06
Spessore (mm)	0,94
Lunghezza (mm)	200
Carico di snervamento ($\times 10^3$ PSI)	53,7 + 58,3
Carico di rottura ($\times 10^3$ PSI)	77,5 + 78,3
Elongazione % in 2"	34,0
Orientazione degli idruri (N° di Fm)	0,136 + 0,138
Durezza (BHN)	172 + 181

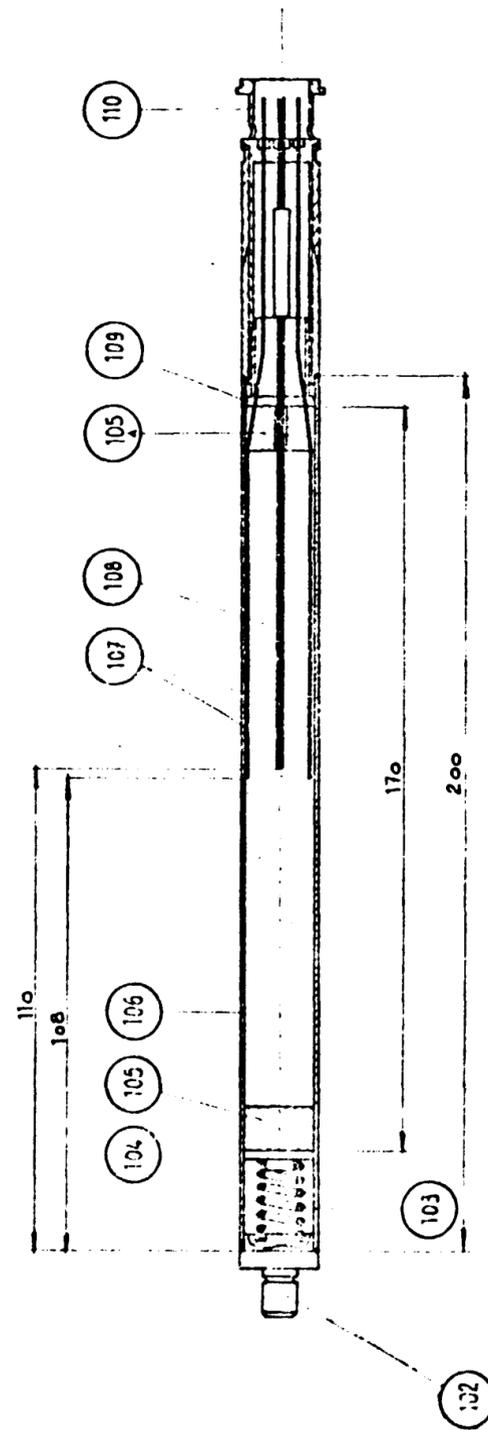


Fig.A.I.1 - Sezione longitudinale della barra

C.N.E.N. CS N. CASACCIA - ROMA	LABORATORIO Tecnologie Ceramiche	Scale 1/1
	Progetto RICERCA DI BASE	L.S. Accoppiati C.N.E.N.
Tit. Generali Materiale	Quantificazioni CYRANUM campione V1	Scale 14. 21. 68
Tratt.	C. int. AY 100 - 100	N.° Dis. GF 002
Lavorat.	File N.° Parti 1	Rev.

Proprietà di C.N.E.N. - Roma - B. produzione - C. ingegneri ed architetti ed ingegneri ed architetti di 110

B.2 - Combustibile

Il combustibile sol-gel fabbricato presso il Lab. Plutonio del C.S.N. Casaccia era composto di due frazioni: la fine di ossido di Uranio con granulometria $70+100 \mu\text{m}$ e la grossa di ossido misto di Uranio e Plutonio con una granulometria $707+840 \mu\text{m}$.

Il combustibile dei campioni CYRANUM 9 e 10 ad ossido di Uranio è stato ottenuto mediante frantumazione di pellets ottenute per mezzo del processo di riduzione termica di pellets di U_3O_8 .

La fabbricazione è avvenuta presso il Lab. Tecnologie Ceramiche del C.S.N. Casaccia.

B.3 - Barretta

I dati di riempimento delle barrette a sol-gel sono riportati nella Tabella B.3.1, mentre i dati relativi ai campioni a UO_2 sono riportati in Tabella B.3.2.

TAB. B.3.1 - Dati di riempimento delle barre vibracompatte

Campione	Barriera termica inf.		Barriera termica sup.		Combustibile			Frazione grossa		Frazione fine		Frazione grossa		Frazione fine		Frazione grossa		Frazione fine		Peso totale	Granulom. μm	Densità g/cm^3
	Peso (g.)	Altezza (mm.)	Diam. (mm.)	Peso (g.)	Altezza (mm.)	Diam. (mm.)	Peso Comp.	Frazione grossa	Peso Comp.	Frazione fine	Peso Comp.	Frazione grossa	Peso Comp.	Frazione fine	Peso Comp.	Frazione grossa	Peso Comp.	Frazione fine	Peso Comp.			
PV 3	15	11	12,88	13,1	9,9	12,88	135	(U,Pu) O_2	47	UO_2	18	74	707+840	74	707+840	74	707+840	74	707+840	187,5	1,1	1,1
PV 1	15	11	12,88	13,0	9,85	12,88	131,5	(U,Pu) O_2	56	UO_2	187,5	71	707+840	71	707+840	71	707+840	71	707+840	187,5	1,1	1,1

TAB. B.3.2 - Dati di riempimento relativi ai campioni a UO_2

Campione	Barriera termica inf.		Barriera termica sup.		Combustibile								Peso totale (g.)	Densità g/cm^3		
	Peso (g.)	Altezza (mm.)	Diam. (mm.)	Peso (g.)	Altezza (mm.)	Diam. (mm.)	Frazione grossa		Frazione media		Frazione fine				Altezza attiva (mm.)	Densità g/cm^3
							% Peso	Gran.	% Peso	Gran.	% Peso	Gran.				
CYRANUM 9	11,45	8,45	12,90	15,83	11,7	12,90	60	3360+2380	25	117+105	15	31	140	1,1	1,1	
CYRANUM 10	11,45	8,45	12,90	15,85	11,7	12,90	60	3360+2380	25	117+105	15	31	140	1,1	1,1	

APPENDICE II

Misura della potenza generata nell'ossido

Il valore della potenza generata nella capsula e quindi quella prodotta nel combustibile può essere determinata con due metodi: uno calorimetrico basato sulla variazione di resistività di una resistenza di misura posta all'interno del dispositivo di misura e uno dosimetrico basato sulle misure dei flussi neutronico e γ ai quali è sottoposta la capsula.

La resistenza di misura è inserita in un ponte di Wheatstone che viene azzerato quando la potenza generata nella capsula è nulla.

Quando si sviluppa potenza, si hanno variazioni della temperatura della resistenza di misura che provoca nel ponte una tensione di squilibrio proporzionale alla quantità di calore totale prodotto nella capsula per un tratto di altezza pari a quella della resistenza.

La taratura del dispositivo di misura si esegue utilizzando le resistenze riscaldanti come elementi che forniscano delle potenze definite, misurabili con il metodo vol tamperometrico.

Nelle Figure A.II.1,2,3,4 sono riportate le curve di taratura della resistenza di misura per le quattro capsule trattate.

Il metodo di misura dosimetrico è basato sulla determinazione del flusso neutronico e γ a cui è sottoposto la capsula.

Due emettitori β (collectrons) sono posti sulla superficie esterna della capsula in posizione diametrica in modo da misurare i valori massimo e minimo del flusso neutronico.

L'attività dell'emettitore β è proporzionale al flusso neutronico termico ed epitermico attraverso costanti che dipendono dalla geometria del collectron e dalle sezioni d'urto d'attivazione. Pertanto, la corrente emessa sarà:

$$i = 6,10^{-21} (1 + 2,3 r) \phi_{th}$$

dove r è il rapporto tra il flusso epitermico e termico visto dal collectron, che nel nostro caso è stato assunto pari a 0,032.

Considerando trascurabile l'effetto delle variazioni di r con la distanza dal core sul valore della corrente, i sarà proporzionale al flusso neutronico termico.

Se si suppone lineare la variazione del flusso neutronico in funzione della distanza dal core, almeno per intervalli dell'ordine del diametro della capsula, il flusso sulla superficie di essa può essere rappresentato come:

$$\phi(R, \theta) = \phi(R) (a + bR \cos \theta)$$

dove $\theta = 0$ corrisponde al punto di più alto flusso neutronico. Il valore medio sulla superficie della capsula sarà quindi dato da:

$$\overline{\phi(R)} = [\phi(R, 0) + \phi(R, \pi)] / 2$$

Il valore medio del flusso neutronico termico nel combustibile sarà proporzionale a $\phi(R)$ secondo fattori di proporzionalità indipendenti dalle distanze del dispositivo dal core del reattore.

Il flusso gamma che investe la capsula è misurato con un calorimetro che misura la potenza prodotta per assorbimento dei γ in un nucleo di grafite immerso in una ampolla di gas. La potenza in esso generata è accompagnata da un aumento di temperatura rivelata da una termocoppia inserita nella grafite. Ora la potenza è proporzionale al flusso γ e al coefficiente d'assorbimento della grafite. Supponendo trascurabile la depressione del flusso γ nella capsula, la potenza gamma generata in essa, proporzionale ai coefficienti d'assorbimento dei materiali che la compongono, sarà proporzionale al segnale emesso dal calorimetro di grafite.

La potenza, nucleare e γ , prodotta dalla barretta di combustibile può essere calcolata direttamente seguendo il metodo dosimetrico.

La distribuzione del flusso neutronico termico nella capsula può essere calcolata con il codice THERMOS⁽¹⁰⁾. Tale codice integra l'equazione del trasporto in geometria monodimensionale suddividendo lo spettro energetico dei neutroni in trenta gruppi. Calcola le sezioni d'urto medie dei

materiali che costituiscono la capsula e la distribuzione del flusso.

Indicando con ϕ_c il valore del flusso neutronico medio nel combustibile, dalla distribuzione radiale del flusso si calcola il rapporto ϕ_c/ϕ_s dove ϕ_s è il valore medio sulla superficie della capsula; avendo indicato con $\bar{\phi}(R)$ lo stesso valore misurato con i collectrons, la potenza specifica generata nel combustibile è:

$$\epsilon_n = \frac{\phi_c/\phi_s \cdot \bar{\phi}(R) \cdot \Sigma_f \cdot 3,2 \cdot 10^{-11}}{\delta} \quad (\text{W/g})$$

dove Σ_f è la sezione d'urto macroscopica di fissione, δ è la densità del combustibile. Analogamente, indicando con g_g i watt per grammo di grafite generati nel calorimetro, la potenza nel combustibile sarà, per quanto detto precedentemente:

$$\epsilon_\gamma = \epsilon_g \cdot E_c/E_g \quad (\text{W/g})$$

dove E_c e E_g sono rispettivamente i coefficienti d'assorbimento del combustibile e della grafite.

Questo metodo di misura è però gravato da una serie di incertezze, per cui si è ritenuto più opportuno determinare la potenza generata dal combustibile accoppiando entrambi i metodi, calorimetrico e dosimetrico.

La principale incertezza che pesa sul valore del flusso neutronico medio nel combustibile è dovuta alle schematizzazioni che occorre fare per utilizzare il codice THERMOS.

Tale codice, infatti, lavora in geometria monodimensionale; per cui, sebbene la capsula sia formata tutta di elementi a geometria cilindrica, essa è posta nel riflettore del reattore e la presenza del core del reattore è difficilmente rappresentabile nel calcolo. Un'altra fonte d'errore è rappresentata dalla incertezza sullo spettro energetico locale del flusso neutronico.

Per quanto concerne invece il valore della potenza gamma generata nel combustibile, gli errori di misura possibili dipendono sia dal calcolo di coefficienti di assorbimento che dalla interpretazione dei dati del calorimetro. Infatti il valore del coefficiente d'assorbimento dei γ nei materiali dipende dallo spettro energetico. Quindi occorrerebbe conoscere la distribuzione di energia dei γ nella regione d'interesse, o almeno l'energia media di essi. Invece, sia l'una che l'altra possono essere solo dedotte da quelle note per reattori analoghi, con una approssimazione quindi non sufficiente. Inoltre, e questa è la fonte principale d'errore, il valore della tensione misurata dalla termocoppia dipende dal flusso gamma nel nucleo di grafite e dalle costanti caratteristiche del calorimetro, in particolare il cosiddetto pseudoperiodo. La potenza P generata dal nucleo di grafite dipende dalla tensione della termocoppia secondo la formula:

$$P T_0 = f(V)$$

dove T_0 è lo pseudoperiodo e $f(V)$ una funzione tabulata. Noto T_0 , la potenza P è ricavabile in funzione di V dalle tabelle della $f(V)$. Generalmente T_0 è costante dopo un primo

periodo di funzionamento, mentre il valore assoluto non sempre è misurabile con una precisione sufficiente per il calcolo della potenza generata nel nucleo di grafite.

Come si è detto, per determinare la potenza prodotta nel combustibile, si è preferito utilizzare entrambi i metodi, calorimetrico e dosimetrico.

La potenza prodotta negli strati interni alla resistenza di misura R_m è la somma della potenza nucleare (prodotta dal combustibile) e gamma (prodotta in tutti gli strati interni alla R_m). Pertanto,

$$P = P_n + P_\gamma$$

La potenza nucleare è proporzionale al flusso neutronico medio nel combustibile che, come si è visto, è proporzionale al flusso neutronico sulla superficie della capsula secondo un fattore che non dipende dalla distanza dal core del reattore. Ora il flusso medio sulla superficie della capsula, per quanto detto prima, sarà proporzionale al valore medio I_n dei dati dei due collectrons, per cui

$$P_n = K_n \cdot I_n$$

Analogamente, per quanto detto prima, la potenza gamma prodotta nei materiali interni alla resistenza di misura, sarà proporzionale, se T_0 resta costante durante tutta una serie di misure, alla $f(V)$ per cui indicando con I_γ tale valore

$$P_\gamma = K_\gamma \cdot I_\gamma$$

Quindi la potenza misurata con la resistenza di misura sarà:

$$P = K_n \cdot I_n + K_\gamma \cdot I_\gamma$$

In una serie di misure, in cui la distanza della capsula dal core viene variata da una più arretrata ad una più ravvicinata, dette P_1 e P_2 i valori di potenza per le due posizioni estreme si avrà:

$$P_1 = K_n \cdot I_{n1} + K_\gamma \cdot I_{\gamma 1}$$

$$P_2 = K_n \cdot I_{n2} + K_\gamma \cdot I_{\gamma 2}$$

Le due equazioni saranno linearmente indipendenti essendo diverse le dipendenze di I_n e I_γ con la distanza dal core.

Dalle due equazioni, possono essere ricavati i valori di K_n e K_γ avendoli supposti costanti con la distanza dal core come detto precedentemente.

La potenza nucleare sarà quindi data da:

$$P_n = K_n \cdot I_n$$

La potenza gamma del combustibile sarà invece data da:

$$P_{\gamma UO_2} = P_\gamma \cdot G_{UO_2}$$

dove G_{UO_2} è la frazione del calore γ nel combustibile rispetto a quella totale. Tale valore, sulla base dei coefficienti d'assorbimento dei γ nei materiali, è stato valutato pari al 25%.

Per quanto riguarda l'elaborazione dei dati per determinare la potenza lineare prodotta dal combustibile si sono riscontrate delle discrepanze tra i valori di potenza misurati con la resistenza di misura, del flusso neutronico fornito dai collectrons e delle temperature di guaina.

Perciò i dati delle due capsule contenenti polvere di UO_2 vibrocompattata sono stati elaborati contemporaneamente per ridurre al minimo le incertezze sulla potenza lineare del combustibile dovuta alle discrepanze riscontrate.

Dal confronto dei dati forniti dalla strumentazione delle due capsule risulta che per pari valore dei due collectrons, la potenza misurata con la resistenza di misura relativamente alla capsula CYRANUM 10 è intermedia tra quella misurata nel CYRANUM 9 durante il primo ciclo e il secondo ciclo; la dispersione attorno al valore medio è di $\pm 5\%$. Per suddividere la potenza in nucleare e γ si sono scelti i dati del CYRANUM 10. I valori di K_n e K_γ trovati sono:

$$K_n = 3060 \quad ; \quad K_\gamma = 1780$$

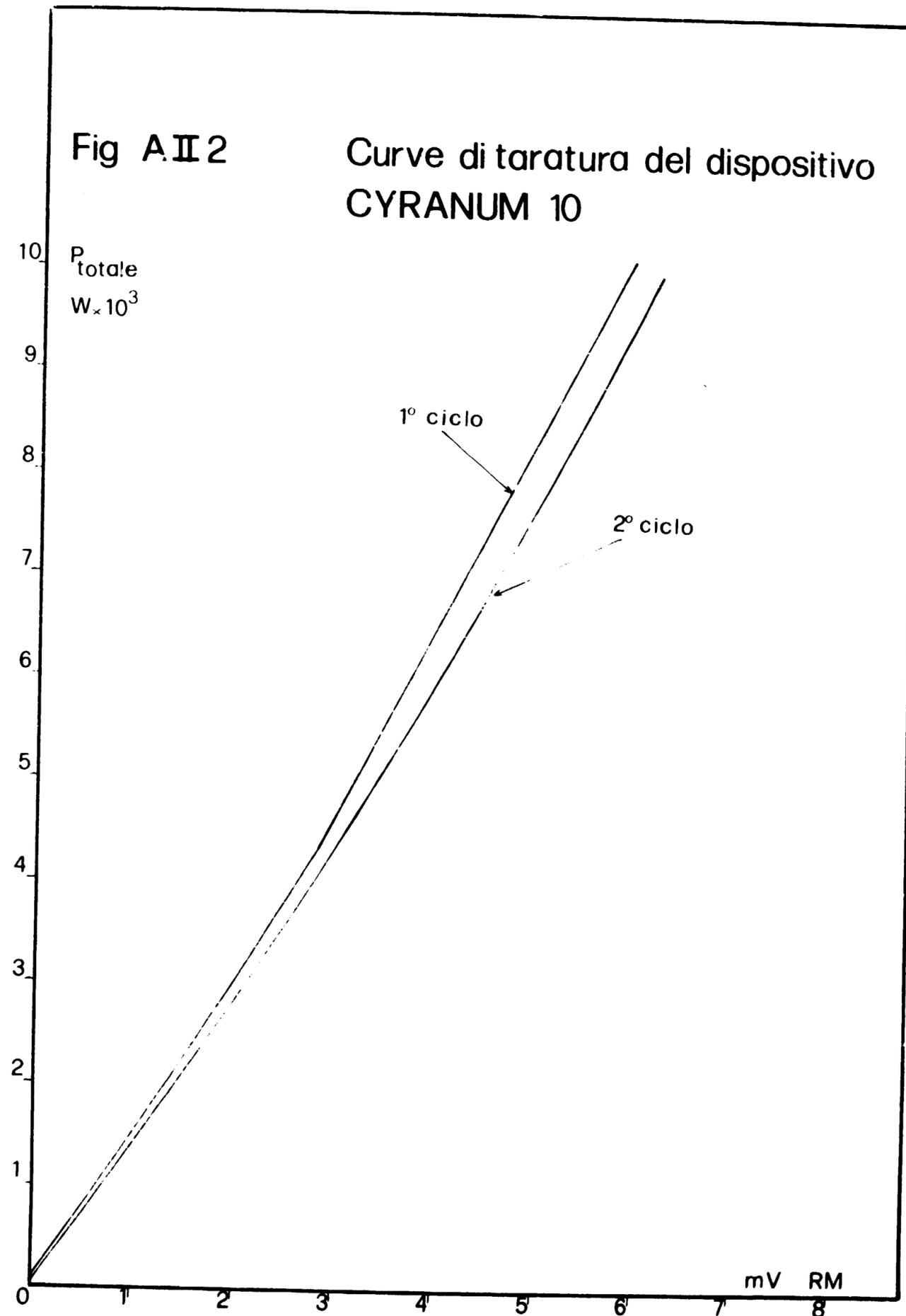
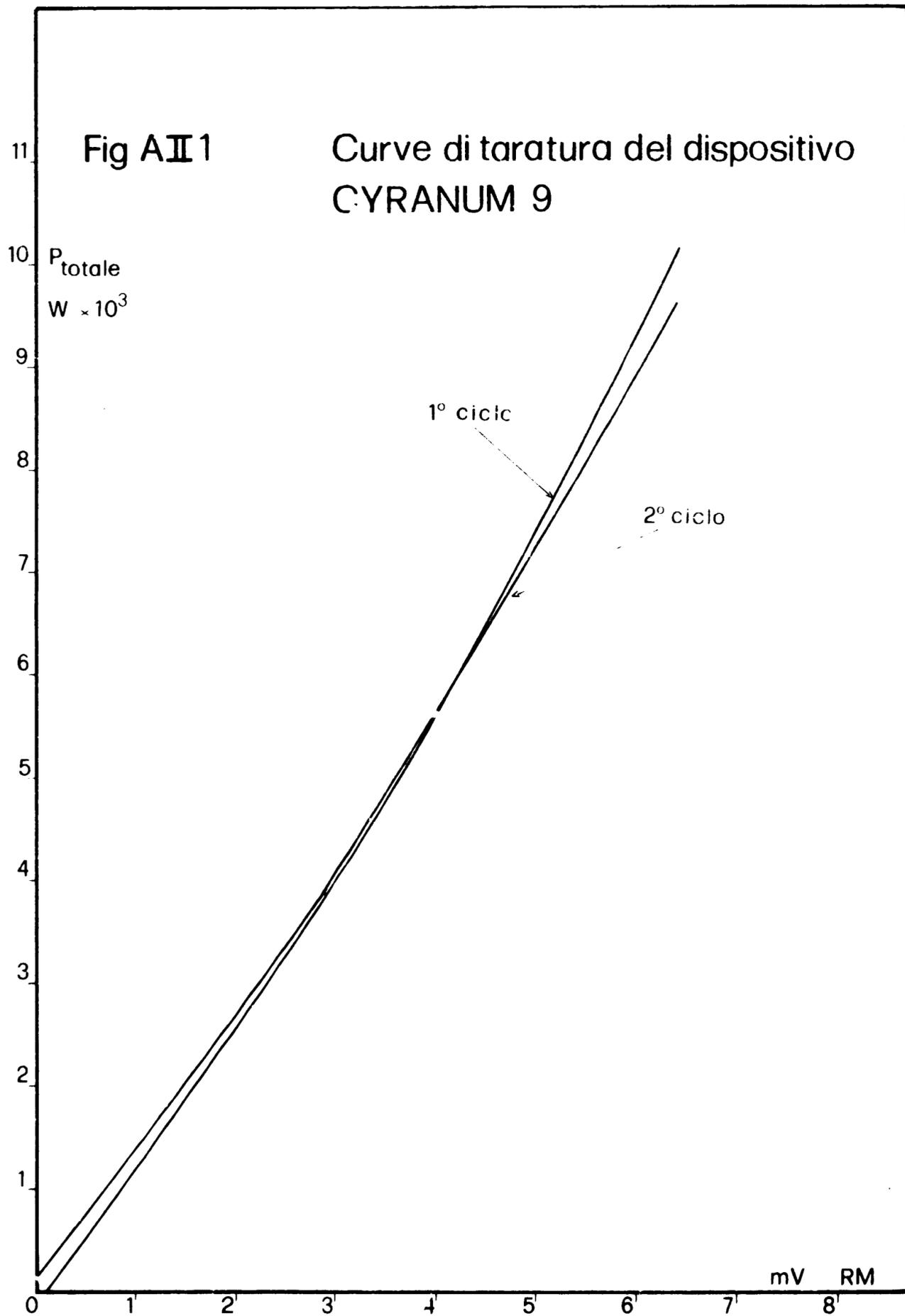
In Fig. A.II.5 è riportata la suddivisione delle potenze totali misurate. Giova osservare che applicando il metodo di calcolo di K_n e K_γ ai due cicli del CYRANUM 9 si ritrova ancora la suddivisione riportata in Fig. A.II.5, anche se per valori di K_γ ovviamente differenti.

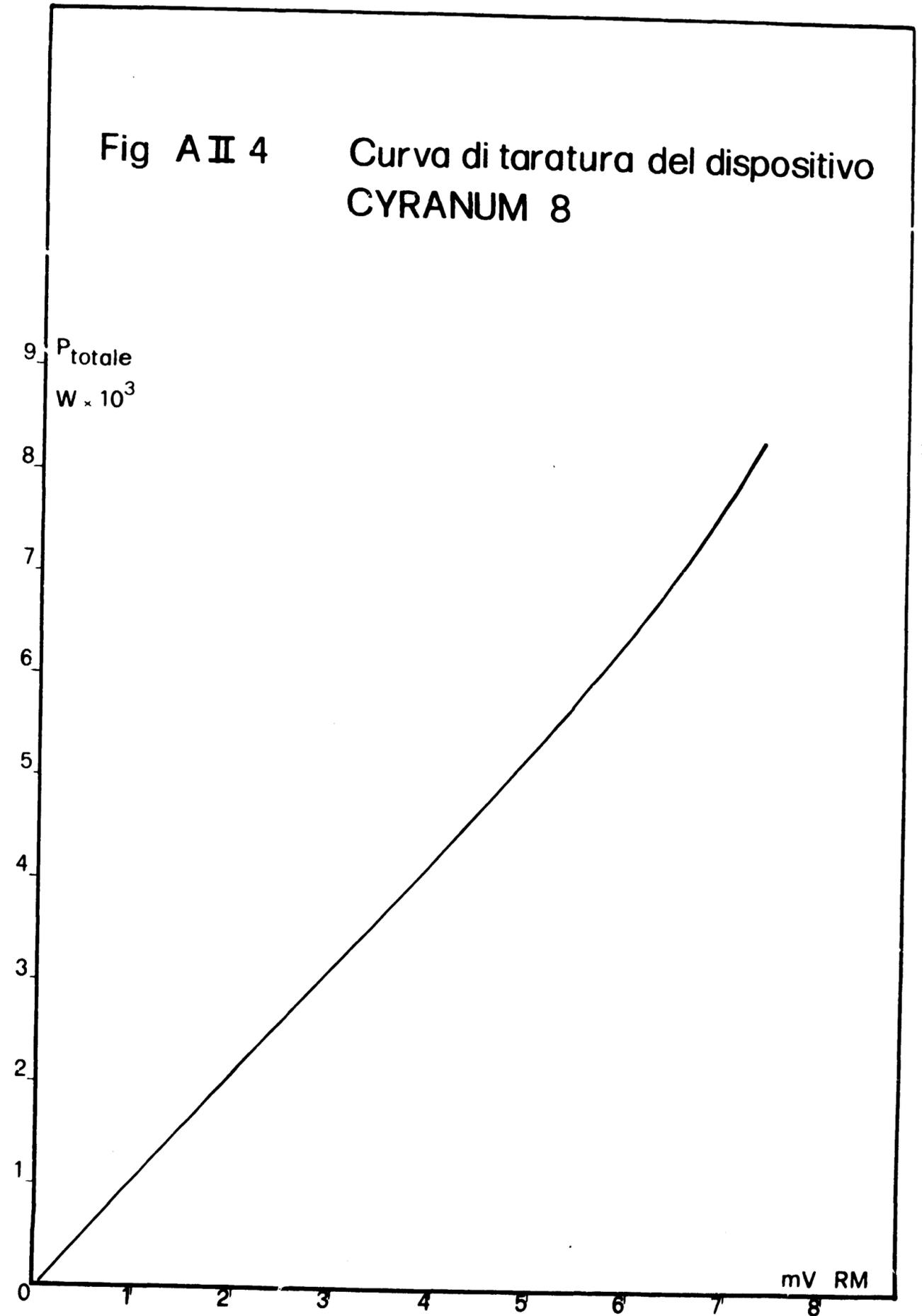
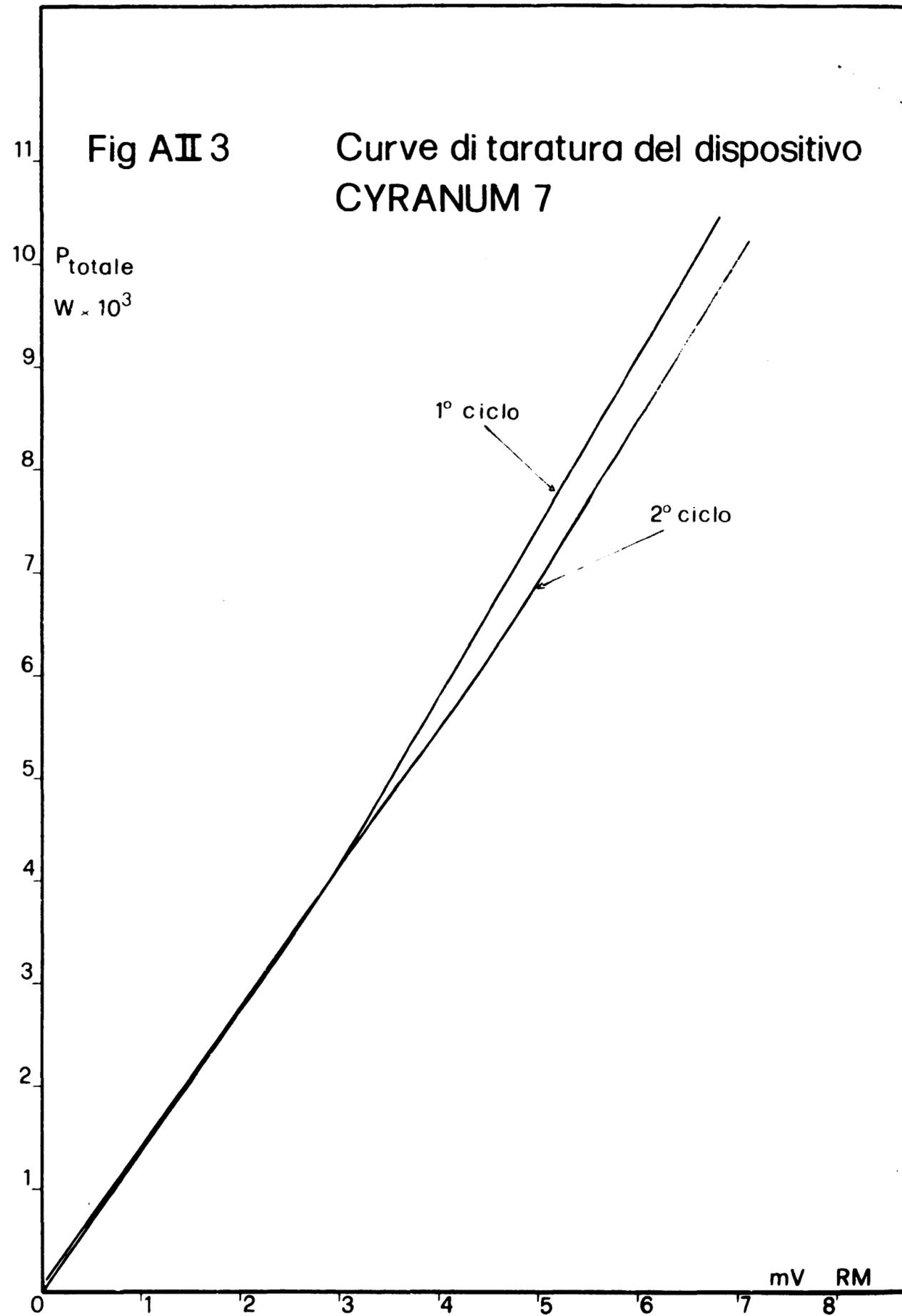
La potenza lineare è stata calcolata moltiplicando il valore di K_n trovato per il valore medio dei due collectrons e dividendo per l'altezza della parte attiva del combustibile (15 cm.).

La potenza lineare q'_γ generata dai γ nel combustibile è stata trovata nel seguente modo: ad un dato valore di F_n viene associato il valore di P_γ dato dal grafico di Fig. A.II.5. Il valore della q'_γ sarà perciò dato da:

$$q'_\gamma = \frac{P_\gamma \times G_{UO_2}}{17}$$

essendo l'altezza della colonna di UO_2 pari a 17 cm.





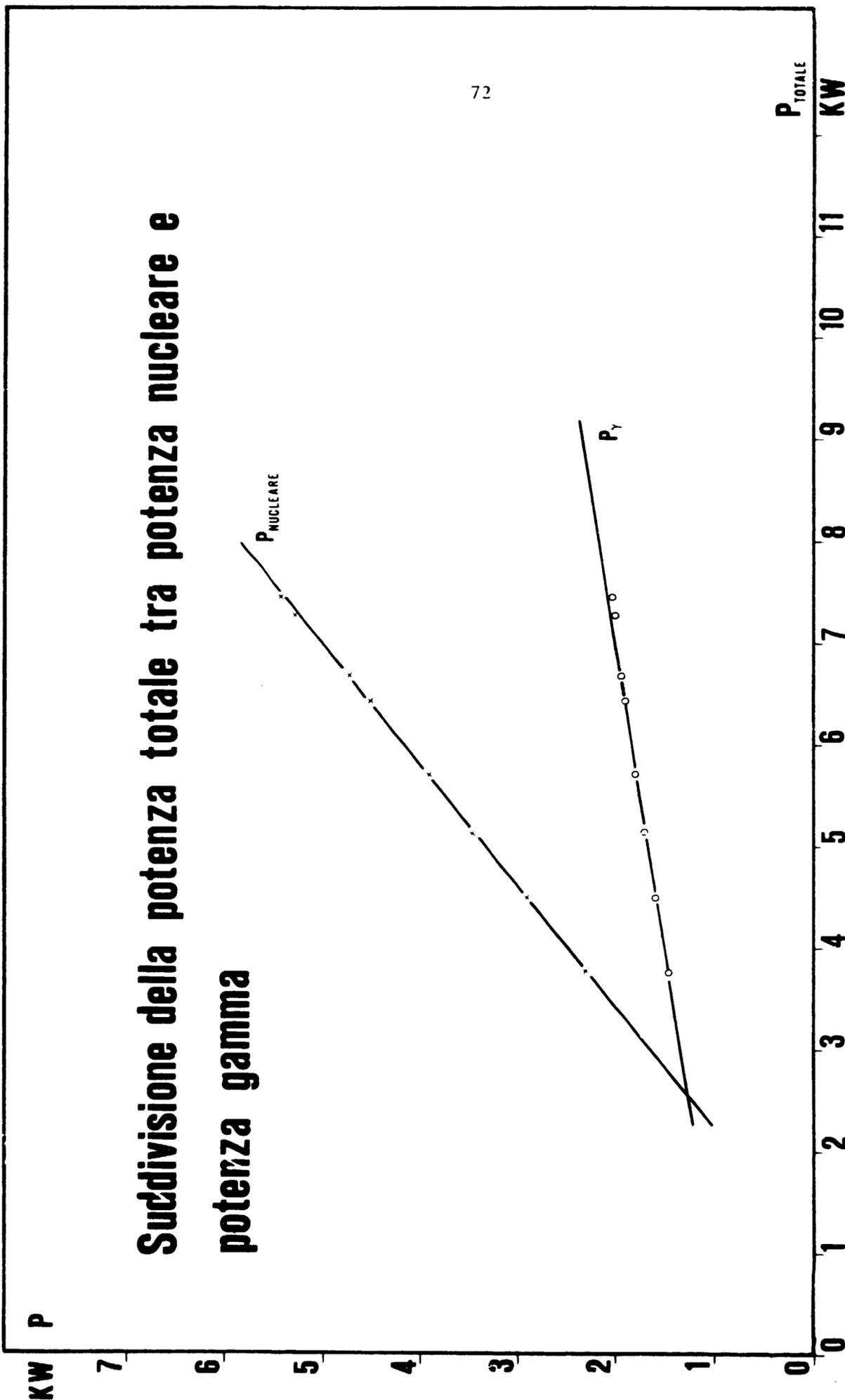


Fig. A.II.5.

BIBLIOGRAFIA

- (1) - A. Calza-Bini et al., "Esperienze d'irraggiamento di capsule CYRANUM per lo studio del comportamento termico delle barrette combustibili", C.N.E.N., RT/LNG(70)15.
- (2) - A. Calza-Bini et al., "Studio sperimentale del comportamento termico delle barre di combustibile. L'integrale della conducibilità di barre a pellets di UO_2-PuO_2 e la conduttanza dell'intercapedine combustibile/guaina", C.N.E.N., RT/LNG(73)18.
- (3) - J.F. Stora et al., "Programma CYRAMO", CEA-R-3618.
- (4) - A. Calza-Bini et al., "Esperienze d'irraggiamento a tempi brevi nel rabbit idraulico del reattore R2 di Studsvik: campioni ad ossido misto di UO_2-PuO_2 ", C.N.E.N., RT/LNG(73)9.
- (5) - T.H. Cetinkale et M. Fishenden, "Thermal conductance of metal surfaces in contact", Proc. Int. Conf. on Heat Transfer, London, Institution of Mechanical Engineers, 1951.
- (6) - A.M. Ross and R.L. Stoute, "Heat transfer coefficient between UO_2 and Zircaloy-2", AECL-1552.
- (7) - M.J.F. Kotley, A.S. Bain, J.A.L. Robertson, "The longitudinal and diametral expansion of UO_2 fuel elements", AECL-2143.

- (8) - R.G. Deissler et C.S. Eian, "Investigation of effective thermal conductivity of powders", NACA-RL-E32005 (1952).
- (9) - R.G.S. Skipper et K.J. Wootton, "Thermal Resistance between Uranium and Can", Proceedings of the Second United Nations International Conference on the Peaceful uses of Atomic Energy, 7, Paper P/87, 684-690, Sept.'58.
- (10) - H.C. Honeck, "A thermalization transport theory case for reactor lattice calculation", BNL-5826.

