



Ricerca di Sistema elettrico

Progettazione di SPND innovativi ottimizzati per la misura di flussi neutronici veloci e procedura sperimentale per prove di irraggiamento

L. Lepore, R. Remetti, M. Cappelli



PROGETTAZIONE DI SPND INNOVATIVI OTTIMIZZATI PER LA MISURA DI FLUSSI NEUTRONICI VELOCI E
PROCEDURA SPERIMENTALE PER PROVE DI IRRAGGIAMENTO

L. Lepore, R. Remetti (UNIROMA1/CIRTEN)
M. Cappelli (ENEA)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA
Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: Generazione di Energia Elettrica con Basse Emissioni di Carbonio

Progetto: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV Generazione.

Linea: Collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV Generazione

Obiettivo: Progettazione di sistema e analisi di sicurezza

Responsabile del Progetto: Mariano Tarantino, ENEA

Titolo

**PROGETTAZIONE DI SPND INNOVATIVI OTTIMIZZATI PER
LA MISURA DI FLUSSI NEUTRONICI VELOCI E PROCEDURA
SPERIMENTALE PER PROVE DI IRRAGGIAMENTO**

Descrittori

Tipologia del documento: Rapporto tecnico
Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE su sicurezza nucleare e reattori di IV generazione
Argomenti trattati: Fisica dei reattori nucleari
 Controllo dei reattori nucleari
 Neutronica

Sommario


Il presente lavoro affronta lo studio delle tematiche relative alla strumentazione neutronica di monitoraggio dei reattori LFR (Lead Fast Reactor) con particolare riferimento alla problematica di monitoraggio del flusso neutronico corrispondente alla potenza nominale, in posizioni vicine al nocciolo. Il modello MCNPX del reattore dimostrativo ALFRED, preso come riferimento, ha mostrato l'impossibilità dell'impiego di camere a fissione ad alta temperatura, evidenziando come i meno sensibili SPND-pronti possano rivestire un ruolo chiave nel controllo in sicurezza del reattore a potenza nominale. Nuovi materiali sensibili per tale classe di strumenti sono stati analizzati, insieme con lo studio del burnup d'irraggiamento e della loro risposta dinamica alle variazioni di flusso neutronico. È stato inoltre sviluppato un progetto concettuale di una sonda innovativa basata su SPND che consenta, oltre che misure di flusso neutronico integrale, anche una valutazione delle caratteristiche spettrali. La disponibilità del reattore TAPIRO di ENEA Casaccia può consentire lo studio delle principali caratteristiche di prestazione di tali strumenti, permettendo di acquisire una preziosa e unica esperienza sperimentale in tale ambito.

Note

Autori UNIROMA1/CIRTEN: L. Lepore, R. Remetti
 Autori ENEA: M. Cappelli



Copia n.
In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	20/9/2016	NOME	M. Cappelli	M. Tarantino	M. Tarantino
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA		REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 - 123	0	L	2	47

Sommario

1. INTRODUZIONE	3
2. VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI DELLA STRUMENTAZIONE COMMERCIALMENTE DISPONIBILE	4
3. VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI DI SPND ALIMENTATI CON MATERIALI ALTERNATIVI	24
4. STUDIO DELLE CARATTERISTICHE SPETTRALI DEI MATERIALI SENSIBILI PER SPND-PRONTI	36
5. PROPOSTA DI SVILUPPO FUTURO DI STRUMENTAZIONE DEDICATA PER REATTORI LFR	40
6. CONCLUSIONI	45
RINGRAZIAMENTI	45

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 - 123	0	L	3	47

1. Introduzione

Il presente lavoro si pone a proseguimento dei risultati raggiunti nella precedenti annualità [1][2], andando a raffinare e migliorare quanto già studiato nell'attività condotta.

Il tema centrale della trattazione riguarda l'ottimizzazione della strumentazione neutronica per il monitoraggio di flussi neutronici veloci in ambienti ostili per la tecnologia, in cui i fattori limitanti per i rivelatori risultano essere l'alta temperatura (mediamente 500 °C) e un alto rateo di dose gamma.

Lo strumento di lavoro principale è la simulazione Monte Carlo, qui realizzata per mezzo dei codici MCNPX.

Particolare attenzione è rivolta agli aspetti di monitoraggio neutronico di reattori veloci, in particolare LFR (Lead Fast Reactor), il cui riferimento assunto è il reattore dimostrativo ALFRED. A seguito dei risultati della precedente annualità, che ha mostrato una possibilità effettiva di utilizzazione di Self Powered Neutron Detectors (SPNDs) per le misure di flusso neutronico in-core nel regime di potenza ($10^{12} - 10^{15} \text{ n}/(\text{cm}^2\text{s})$) del reattore ALFRED, si vuole qui approfondire lo studio:

- dei rivelatori commerciali disponibili, identificando le caratteristiche ed il comportamento in fase di irraggiamento: dinamiche di risposta, burn-up del materiale sensibile e modificazione del segnale elettrico del rivelatore a lungo termine;
- di rivelatori innovativi, provvisti di nuovi materiali sensibili, con l'obiettivo di sfruttare le diverse caratteristiche di ciascuno (ovvero le sezioni d'urto) per implementare tecniche di *unfolding* dello spettro neutronico, così da ottenere non solo un rivelatore che misuri quantitativamente i neutroni in una certa posizione, ma anche la loro qualità energetica.

La validazione sperimentale del codice Monte Carlo MCNPX, condotta nella precedente annualità mediante la ricostruzione dell'esperienza d'irraggiamento di SPND in TAPIRO [3], ha consentito l'uso del codice come mezzo di ottimizzazione e progettazione di tali rivelatori, perseguendo gli obiettivi attesi.

Nel prossimo futuro, un SPND prototipo potrà esser costruito e testato, verificando l'effettiva possibilità tecnica per tale strumentazione di monitorare flussi neutronici veloci.

2. Valutazione delle prestazioni della strumentazione commercialmente disponibile

Si procederà ora a descrivere l'analisi condotta e mostrare i risultati dello studio effettuato sugli SPND commerciali attualmente disponibili, identificando:

- dinamiche di risposta,
- burn-up del materiale sensibile e build-up dei prodotti di reazione,
- modificazione del segnale elettrico del rivelatore a lungo termine.

I rivelatori individuati nella precedente annualità [2] risultavano:

- self powered neutron detector THERMOCOAX Co-type (^{59}Co -sensitive);
- self powered neutron detector THERMOCOAX Pt-type (^{195}Pt -sensitive).

La strumentazione elencata è pronta, cioè con un tempo di risposta inferiore ai 50 ms, risultando adatta al controllo d'impianto e alle operazioni di sicurezza.

Supplier	Product Code	External diameter [mm]	External length [mm]	Sensitive volume diameter [mm]	Sensitive volume length [mm]
Thermocoax	Co-type	2.5	250	1	200
Thermocoax	Pt-type	2.5	250	1	200

Supplier	Product Code	Neutron Sensitivity (to thermal neutrons)		
		Pulse [cps/nv]	MSV [$\text{A}^2\text{Hz}^{-1}/\text{nv}$]	Current [A/nv]
Photonis	CFUE32	0,001	$4 \cdot 10^{-29}$	$1 \cdot 10^{-16}$
Thermocoax	Co-type	-	-	$1.42 \cdot 10^{-21}$
Thermocoax	Pt-type	-	-	$1.8 \cdot 10^{-21}$

Tabella 1 - Caratteristiche dei SPND-pronti, commercialmente disponibili, analizzati nello studio.

A differenza delle precedenti annualità [1][2], si è qui proceduto a valutare le prestazioni della strumentazione indicata direttamente in campo neutronico veloce, senza utilizzare dati ottenuti alle energie termiche e, poi, corretti mediante procedure di correlazione con le sezioni d'urto dei materiali sensibili, come effettuato in prima analisi.

La sorgente neutronica veloce utilizzata nello studio è il reattore veloce TAPIRO di ENEA Casaccia, macchina caratterizzata da uno spettro neutronico di fissione da ^{235}U molto ben conosciuto, nella quale già sono stati effettuati test sperimentali con SPND [3] nell'ambito di ricerca della fusione.

2.1 Modellazione di prove sperimentali presso il reattore TAPIRO

La disponibilità del reattore veloce TAPIRO [4] presso ENEA Casaccia rende possibile concettualizzare e programmare prove sperimentali per le sonde in flussi neutronici veloci. Nell'ambito del lavoro condotto, l'interesse è effettuare irraggiamenti alle massime potenzialità della macchina, ricavando i più elevati valori di flusso neutronico, che siano in grado di far registrare dei segnali elettrici quantificabili nell'irraggiamento dei SPND. Nei reattori di potenza o dimostrativi in scala ridotta, infatti, i valori di flusso neutronico risulteranno 100-1000 volte superiori a quelli sperimentabili in TAPIRO, rendendo le risposte elettriche più significative. In ogni caso, la dimostrazione della possibilità di ottenere risposte 'leggibili' anche in TAPIRO elegge tale reattore a possibile banco di prova per questa strumentazione.

2.1.1 Irraggiamenti effettuabili nel reattore TAPIRO

TAPIRO è la sorgente neutronica veloce di ENEA Casaccia, operante dal 1971. Le sue principali specifiche tecniche e sperimentali sono riassunte in Tabella 2; in Figura 1 sono riportate una vista in pianta e in sezione. La principale peculiarità del reattore risiede nel suo spettro neutronico, praticamente da ^{235}U puro, la cui energia media risiede intorno ~ 1 MeV. Il reattore offre una serie di canali per diverse prove, in relazione alla magnitudo e all'energia del flusso neutronico, nonché allo spazio necessario alla prova. La posizione che consente di ottenere il massimo flusso e la maggiore energia media dello spettro neutronico è il canale diametrale, che risulta passante per il nocciolo, per cui la sonda in prova è posizionabile al centro della massa critica. A seguire, il canale che risulta maggiormente promettente per le prove previste è il canale radiale 1 che arriva a ridosso del bordo esterno del nocciolo: sebbene si attenda un minore flusso in magnitudo, con una inferiore energia media dello spettro, questo canale (~ 6 cm di diametro occupabile, distante 9,3 cm dall'asse verticale del nocciolo) si ritiene fondamentale a superare i limiti di quello diametrale che ha un diametro occupabile di appena ~ 1 cm.

Sebbene le sonde precedentemente discusse siano sperimentabili anche solo nel canale diametrale viste le loro dimensioni, può essere interessante effettuare una prova delle stesse annegate in piombo solido, al fine di verificare l'influenza sulle prestazioni di questo mezzo: difatti, data la sua notevole efficacia di schermaggio dei gamma, si pensa sia possibile andare a ridurre il limite inferiore statisticamente rappresentativo dei segnali elettrici delle sonde visto che l'interferenza gamma del campo di radiazione di reattore LFR è intrinsecamente attenuata dal refrigerante stesso.

Reactor Type	Fast reactor
First criticality	1971
Maximum thermal power	5 kW

Maximum neutron flux	4·10 ¹² n/cm ² s (at the core center)
Fuel layout	3 cylinders (2 fixed, 1 movable)
Fuel composition (metal alloy)	98,5% wt. U (U: 93,5% at. U ²³⁵ ; 5,6% at. U ²³⁸ 0,6 % at. U ²³⁴ ; 0,3 % at. U ²³⁶) 1,5% wt. Mo
Cooling system	Gas (Helium)
Reflector	Copper
Control system (based on leakage)	<ul style="list-style-type: none"> - 2 safety rods - 2 shim rods - 1 regulating rod
Test channels	<ul style="list-style-type: none"> - radial channel 1 (useful I.D. ~ 6 cm) - radial channel 2 (useful I.D. ~ 8 cm) - tangential channel (useful I.D. ~ 3 cm) - diametral channel (useful I.D. ~ 1 cm) - 2 vertical channel (useful I.D. ~12 cm) - thermal column (experimental cavity ~ 2 m³)

Tabella 2 - Principali caratteristiche tecniche e sperimentali del reattore TAPIRO.

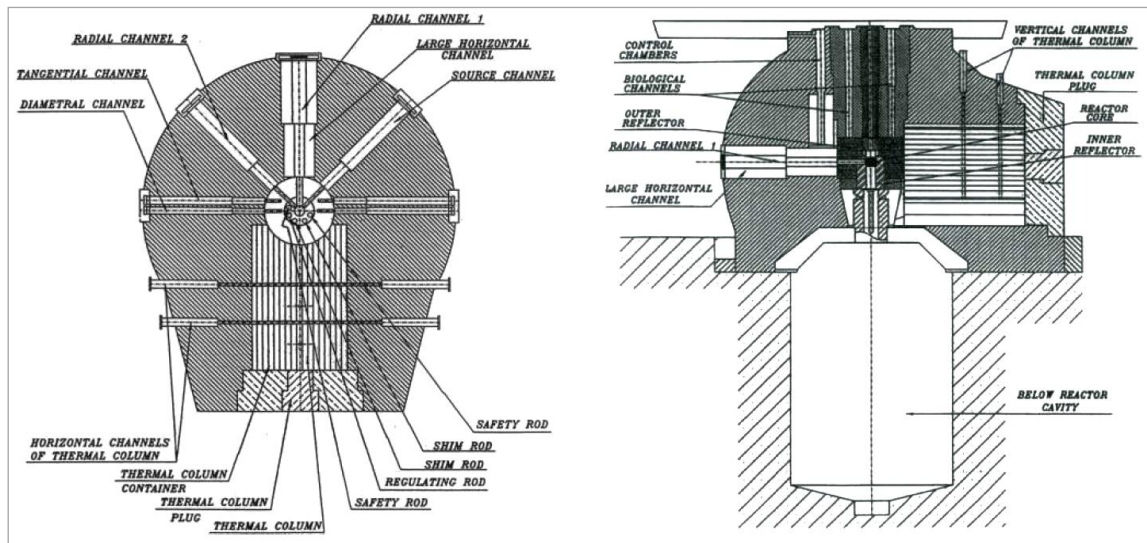


Figura 1 - A sinistra: vista in pianta del reattore TAPIRO in corrispondenza del piano mediano di nocciolo. A destra: sezione verticale del reattore sull'asse della canale radiale 1/colonna termica.

La disponibilità del modello MCNPX del reattore TAPIRO presso il Laboratorio FSN-FISS Reattori Nucleari di ENEA Casaccia, ha consentito una più fine elaborazione dello studio condotto, rendendo possibile la realizzazione di simulazioni integrali delle sonde inserite all'interno del canale diametrale. In Figura 2 sono mostrati alcuni screenshot estratti dal modello.

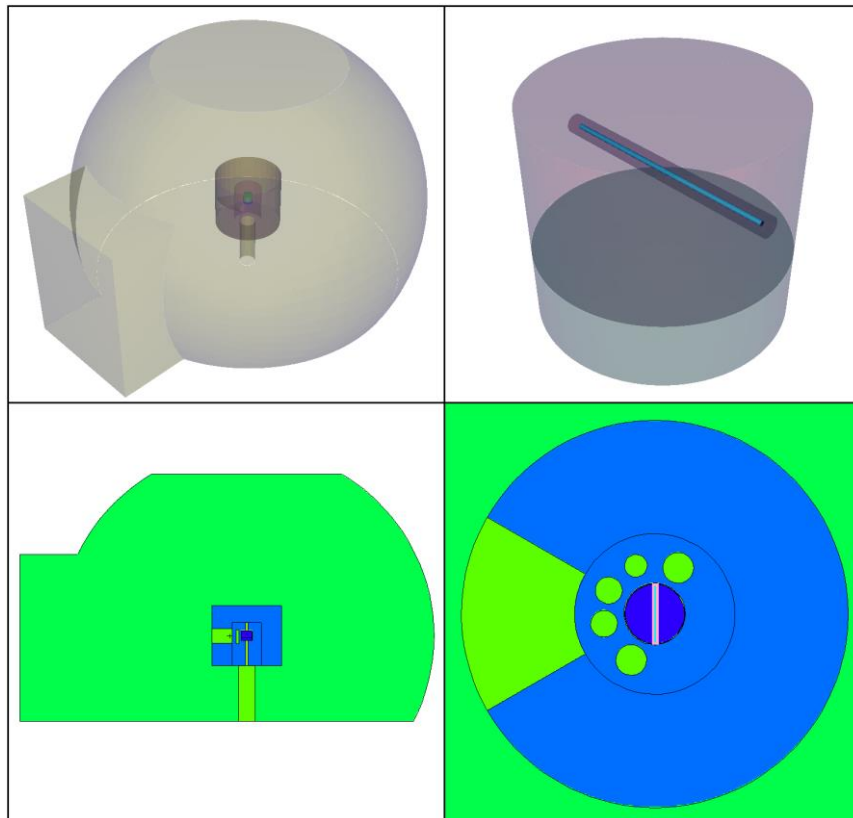


Figura 2 - Screenshot dal modello MCNPX del reattore TAPIRO. A sinistra, la visualizzazione integrale del reattore, in spaccato longitudinale e 3D. A destra, vista in pianta e 3D del nocciolo, con il canale diametrale passante e la sonda in prova (stiletto azzurro).

Il detto canale diametrale presenta un flusso neutronico massimo di $1.3 \cdot 10^{12} \text{ n}/(\text{cm}^2\text{s})$, quando il reattore è esercito alla potenza di 5 kW. In corrispondenza di tale flusso neutronico è presente anche un campo fotonico nell'ordine di $5.7 \cdot 10^{11} \text{ fotoni}/(\text{cm}^2\text{s})$. Gli spettri dei campi neutronico e fotonico precedentemente detti sono stati ricavati dalla simulazione e mostrati nelle figure sottostanti, Figura 3 e Figura 4, secondo la classificazione energetica identificata in Tabella 3.

L'energia media dello flusso neutronico risulta $\sim 820 \text{ keV}$.

L'energia media dello flusso fotonico risiede in $\sim 1.0 \div 1.5 \text{ MeV}$.

Le condizioni descritte sono quelle in cui sono stati condotti i test sulle sonde evidenziate in precedenza.

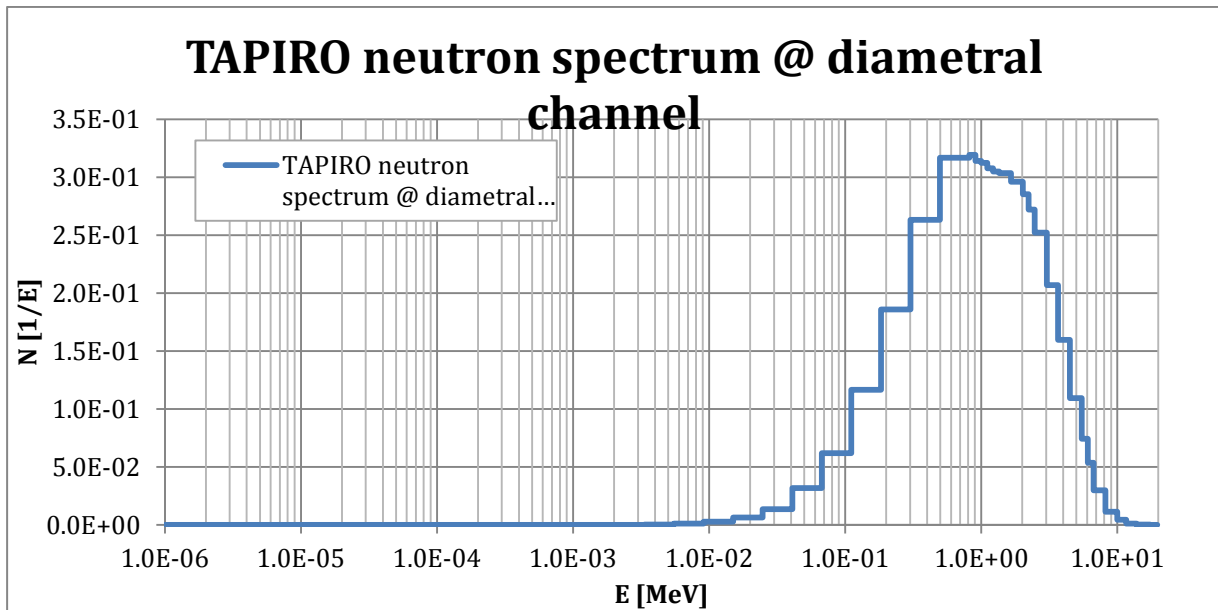


Figura 3 - Spettro neutronico in corrispondenza del canale diametrale del reattore TAPIRO.

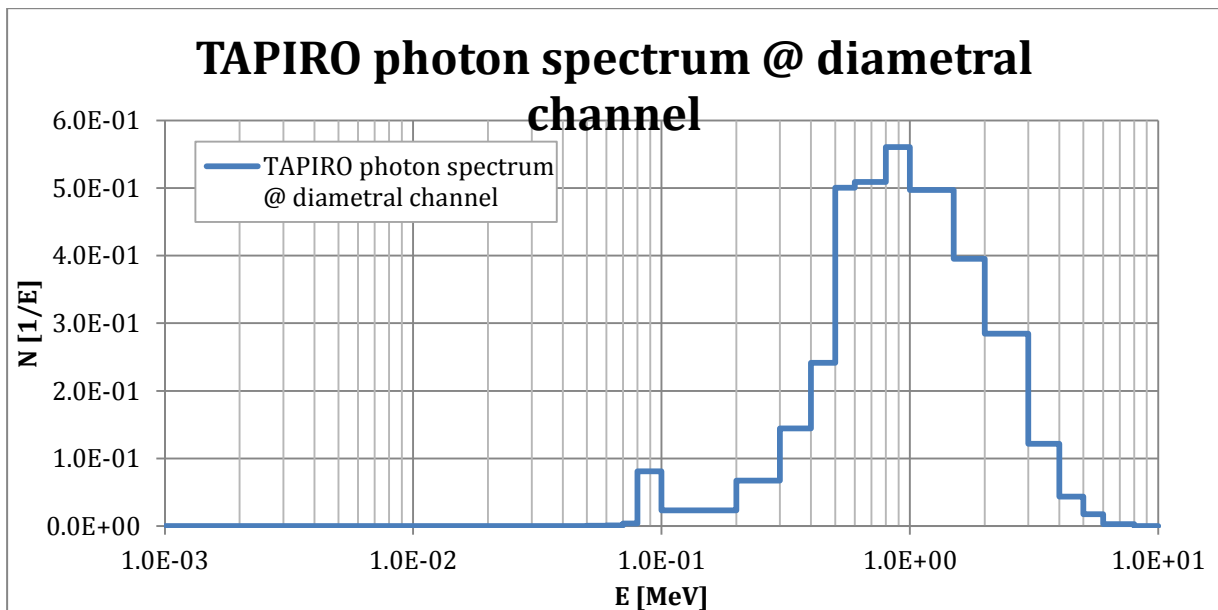


Figura 4 - Spettro fotonico in corrispondenza del canale diametrale del reattore TAPIRO.

Discretizzazione dello spettro neutronico		
group	Lower Energy [MeV]	Upper Energy [MeV]
1	1.000E+01	1.964E+01
2	6.065E+00	1.000E+01
3	3.679E+00	6.065E+00
4	2.231E+00	3.679E+00
5	1.353E+00	2.231E+00
6	8.209E-01	1.353E+00
7	4.979E-01	8.209E-01
8	3.020E-01	4.979E-01
9	1.832E-01	3.020E-01
10	1.111E-01	1.832E-01
11	6.738E-02	1.111E-01
12	4.087E-02	6.738E-02
13	2.479E-02	4.087E-02
14	1.503E-02	2.479E-02
15	9.119E-03	1.503E-02
16	5.531E-03	9.119E-03
17	3.355E-03	5.531E-03
18	2.035E-03	3.355E-03
19	1.234E-03	2.035E-03
20	7.485E-04	1.234E-03
21	4.540E-04	7.485E-04
22	3.043E-04	4.540E-04
23	1.486E-04	3.043E-04
24	9.166E-05	1.486E-04
25	6.790E-05	9.166E-05
26	4.017E-05	6.790E-05
27	2.260E-05	4.017E-05
28	1.371E-05	2.260E-05
29	8.315E-06	1.371E-05
30	4.000E-06	8.315E-06
31	5.400E-07	4.000E-06
32	1.000E-07	5.400E-07
33	3.355E-03	1.000E-07
34	2.035E-03	3.355E-03
35	1.234E-03	2.035E-03
36	7.485E-04	1.234E-03
37	4.540E-04	7.485E-04
38	3.043E-04	4.540E-04
39	1.486E-04	3.043E-04
40	9.166E-05	1.486E-04
41	6.790E-05	9.166E-05
42	4.017E-05	6.790E-05
43	2.260E-05	4.017E-05
44	1.371E-05	2.260E-05
45	8.315E-06	1.371E-05
46	4.000E-06	8.315E-06
47	5.400E-07	4.000E-06
48	1.000E-07	5.400E-07
49	0.000E+00	1.000E-07

Discretizzazione dello spettro fotonico		
group	Lower Energy [MeV]	Upper Energy [MeV]
1	8.00E+00	1.00E+01
2	6.00E+00	8.00E+00
3	5.00E+00	6.00E+00
4	4.00E+00	5.00E+00
5	3.00E+00	4.00E+00
6	2.00E+00	3.00E+00
7	1.50E+00	2.00E+00
8	1.00E+00	1.50E+00
9	8.00E-01	1.00E+00
10	6.00E-01	8.00E-01
11	5.00E-01	6.00E-01
12	4.00E-01	5.00E-01
13	3.00E-01	4.00E-01
14	2.00E-01	3.00E-01
15	1.00E-01	2.00E-01
16	8.00E-02	1.00E-01
17	7.00E-02	8.00E-02
18	6.00E-02	7.00E-02
19	5.00E-02	6.00E-02
20	4.00E-02	5.00E-02
21	3.00E-02	4.00E-02
22	2.00E-02	3.00E-02
23	1.00E-02	2.00E-02
24	1.00E-03	1.00E-02

Tabella 3 - Raggruppamento energetico utilizzato per la determinazione degli spettri neutronico (a sinistra) e gamma (a destra) nelle posizioni d'interesse.

2.1.2 Il modello del rivelatore SPND Thermocoax standard

Di seguito è presentato il modello del rivelatore SPND Thermocoax standard, ricostruito in MCNPX ed inserito nella simulazione integrale del reattore TAPIRO, al fine di ricavarne il comportamento in specifiche condizioni d’irraggiamento, diverse dalle caratteristiche standard fornite dalla casa costruttrice.

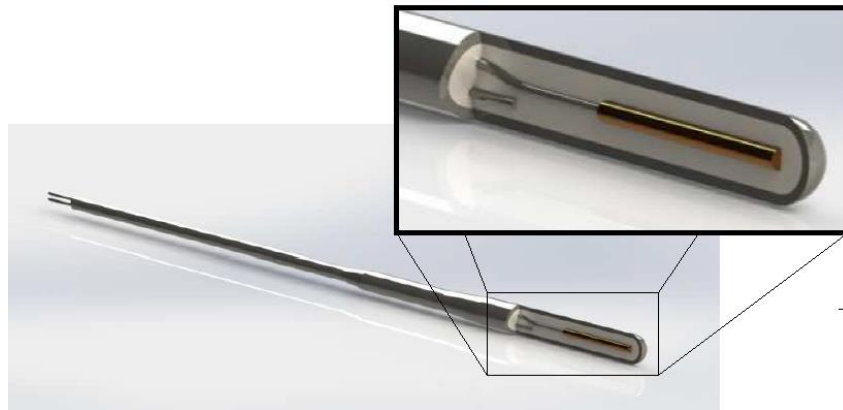


Figura 5 - Disegno concettuale del rivelatore SPND Thermocoax standard.

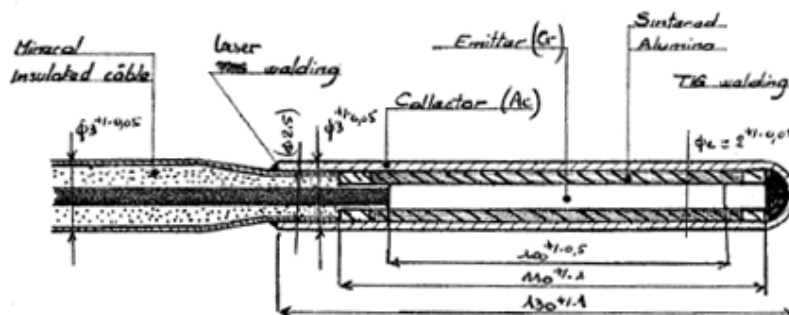


Figura 6 – Sezione di un rivelatore SPND Thermocoax standard (dimensioni in [mm]).

Il rivelatore, come mostrato in Figura 6, è stato ricostruito in MCNPX, con le specifiche di materiali e dimensioni presentate di seguito.

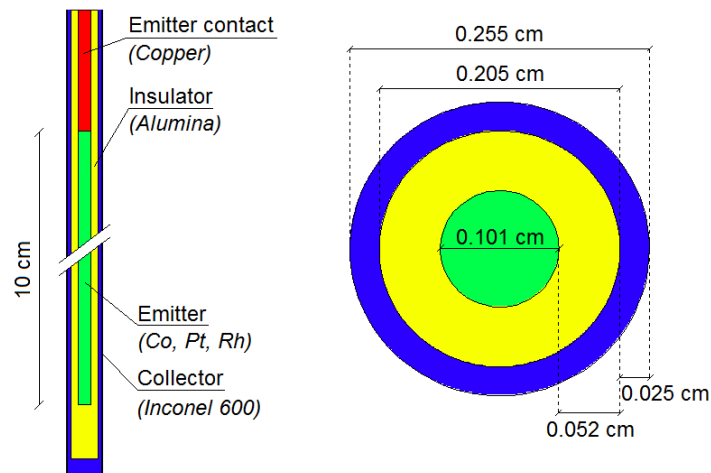


Figura 7 - Sezioni e specifiche del modello del SPND Thermocoax ricostruito in MCNPX.

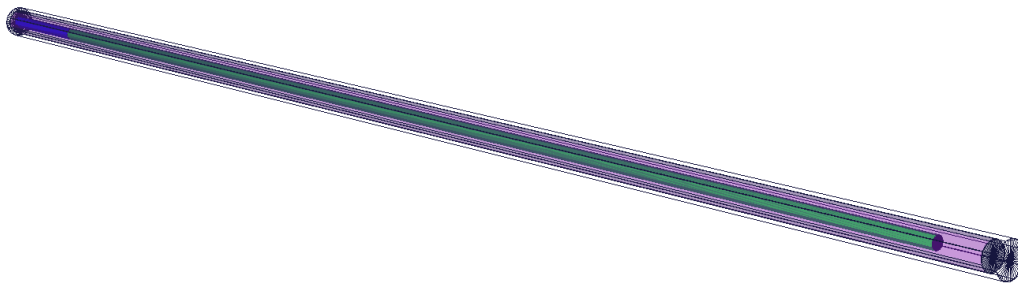


Figura 8 - Visualizzazione 3D del modello del SPND Thermocoax ricostruito in MCNPX.

Il modello geometrico presentato è quello utilizzato in tutte fasi dello studio condotto di seguito.

2.2 Studio di burn-up di SPND-pronti commercialmente disponibili in TAPIRO

Si riporta di seguito lo studio di burn-up degli SPND pronti, commercialmente disponibili, identificati in Tabella 1.

Le motivazioni principali che spingono allo studio del burn-up del materiale sensibile si riassumono:

- nella valutazione del rateo di consumo e del consumo effettivo del materiale sensibile in determinate condizioni d'irraggiamento, che –a lungo andare– comportano variazioni nella sensibilità dello strumento, fino alla necessità di sua sostituzione;
- nella modificazione attesa nella risposta elettrica dello strumento a causa dei disturbi innescati dalla creazione, all'interno del volume sensibile di specie radioattive,

inizialmente per attivazione neutronica, e poi per decadimento radioattivo delle specie prodotte.

Entrambi gli aspetti possono comportare esigenze di sostituzione dello strumento, nel lungo termine, identificando –quindi– un intervallo di vita utile della sonda.

Si precisa che, non avendo a disposizione tutte le librerie delle sezioni d’urto alla temperature 600-900 K, si è deciso di utilizzare le sezioni d’urto a $T=293$ K, presenti per tutti i nuclidi, al fine di fornire dei dati e dei risultati omogenei e confrontabili tra loro, senza comunque perdere di significatività. L’intera procedura, con dati di partenza più completi, potrà essere ripetuta anche con librerie più appropriate, appena disponibili.

Come si vedrà, le principali reazioni indotte da neutroni sui materiali sensibili sono, nell’ordine d’importanza:

- reazioni (n, γ);
- reazioni (n,p);
- reazioni (n, α);
- reazioni (n,2n);
- reazioni (n,3n).

Di esse, le prime tre mettono in modo, indirettamente o direttamente, particelle cariche, potendo contribuire in maniera significativa alla transizione di elettroni dall’emettitore al collettore. Le ultime due categorie di reazione, hanno capacità di produrre segnale solo per conseguente diseccitazione del nucleo, se esso viene lasciato, dal neutrone incidente, in uno stato metastabile a corta vita.

Come si vedrà, comunque, i ratei di reazione più significativi riguardano solo le prime due categorie.

2.2.1 Test su SPND al ^{59}Co

Un SPND come definito in §2.1.2, alimentato con un volume sensibile di ^{59}Co è stato sottoposto alle condizioni d’irraggiamento specificate in §2.1.1, all’interno di TAPIRO.

Le condizioni generali della prova sono riportate nella tabella sottostante.

Carica iniziale di ^{59}Co [g]	9.958000E-01
Carica finale di ^{59}Co [g]	9.957966E-01
Carica finale di ^{60}Co [g]	3.379102E-06
Flusso neutronico [$n/(cm^2s)$]	1.30E+12
Tempo d’esposizione [s]	315360000
Tempo d’esposizione [mesi]	120
Fluenza neutronica raggiunta [$n/(cm^2)$]	4.10E+20
burn-up medio [%/mese]	2.83E-06

Tabella 4 - Condizioni e risultati globali d’irraggiamento di un SPND Thermocoax-type, alimentato con ^{59}Co .

I tassi di reazione, nelle condizioni d'irraggiamento dette e diversificate per le specie presenti nel volume sensibile e le tipologie di reazione che possono verificarsi, risultano:

	Reaction rate [<i>reaction/s</i>]			
	(n, γ)	(n,2n)	(n, α)	(n,p)
⁵⁵ Mn	1.07E-01 (\pm 1.2%)	2.09E-03 (\pm 19%)	1.38E-03 (\pm 3.7%)	6.45E-03 (\pm 2.0%)
⁵⁶ Fe	6.15E+00 (\pm 1.8%)	3.63E-02 (\pm 28%)	3.15E-01 (\pm 2.9%)	7.45E-01 (\pm 2.7%)
⁵⁷ Fe	5.06E-02 (\pm 3.6%)	1.00E-02 (\pm 8.0%)	6.90E-03 (\pm 1.3%)	4.82E-03 (\pm 1.9%)
⁵⁸ Fe	1.93E+01 (\pm 1.8%)	7.48E-01 (\pm 17%)	1.65E-01 (\pm 5.2%)	2.39E-02 (\pm 7.8%)
⁵⁹ Co	1.88E+08 (\pm 0.7%)	1.95E+06 (\pm 20%)	1.95E+06 (\pm 3.5%)	1.86E+07 (\pm 1.5%)
⁶⁰ Ni	3.91E+02 (\pm 1.7%)	1.10E+00 (\pm 30%)	4.99E+01 (\pm 2.1%)	5.77E+01 (\pm 2.2%)
⁶¹ Ni	1.47E-03 (\pm 1.6%)	7.37E-05 (\pm 9.0%)	1.99E-04 (\pm 1.1%)	2.41E-04 (\pm 1.4%)
⁶² Ni	2.59E-09 (\pm 0.4%)	2.02E-11 (\pm 20%)	6.27E-12 (\pm 4.1%)	4.16E-12 (\pm 6.4%)
⁶³ Cu	5.66E-17 (\pm 3.3%)	1.10E-19 (\pm 26%)	9.25E-19 (\pm 2.4%)	3.72E-17 (\pm 0.7%)

Tabella 5 - Ratei di reazione per le specie presenti all'interno del volume sensibile del SPND alimentato con ⁵⁹Co.

Come risulta evidente, i valori maggiormente significativi riguardano il solo ⁵⁹Co, essendo quantitativamente l'isotopo predominante. Tutte gli altri isotopi presenti in Tabella 5 sono prodotti di attivazione e successivo decadimento a partire da quest'ultimo, quindi è ragionevole supporre che i quantitativi presenti siano ordini di grandezza più bassi. A titolo di esempio, si riportano le dinamiche di creazione ed accumulo delle specie maggiori nel grafico sottostante:

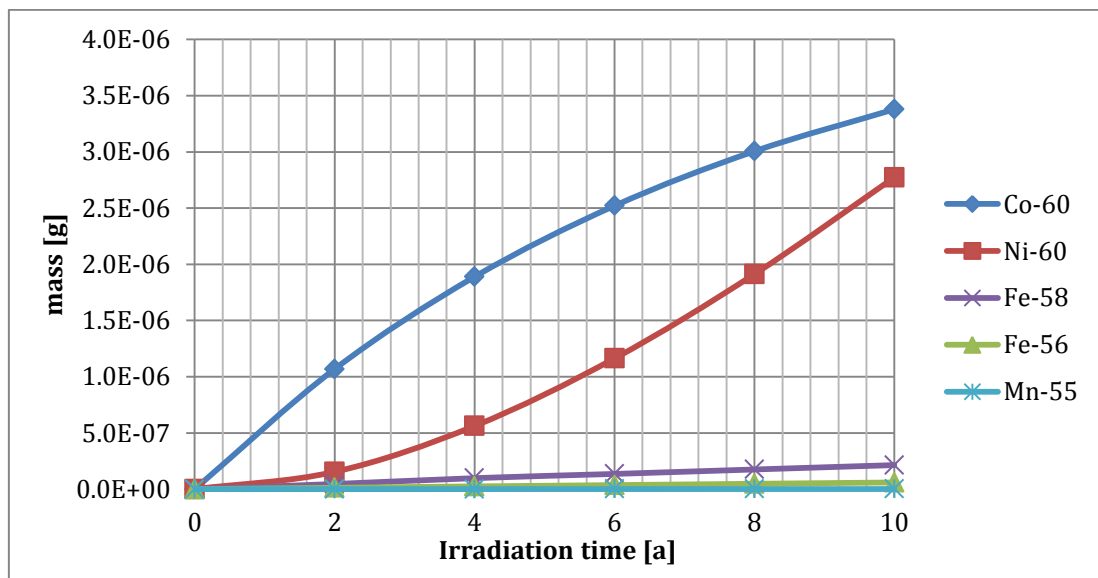


Figura 9 – Accumulo delle maggiori specie venutesi a creare durante l'irraggiamento di un SPND alimentato con ⁵⁹Co. Come risulta evidente, anche per valori di fluensa nell'ordine di $4E+20$ n/cm², i prodotti di attivazione dell'isotopo originale sono, in quantitativo, ordini di grandezza inferiore alla massa del materiale sensibile.

Come risulta evidente da Tabella 4, Tabella 5 e Figura 9, sebbene siano raggiunte fluenze considerevoli, nell'ordine di $4E+20$ n/cm², il consumo del materiale sensibile è davvero esiguo, con un riduzione in massa di $\sim 3.4E - 5$ %/anno. Ne segue che anche ipotizzando di incrementare la fluenza di un fattore 1000 ÷ 2000, per tener conto dell'esposizione a flussi neutronici veloci più intensi di quelli ottenibili in TAPIRO, il SPND al ⁵⁹Co presenterebbe una vita utile più che longeva, rendendo ipotizzabile anche un'installazione fissa dello strumento all'interno della struttura dell'elemento di combustibile.

È da notare, comunque, che tali considerazioni valgono a parità di qualità energetica dello spettro neutronico. L'esposizione a spettri più attenuati in energia comporterebbero ratei di reazione (e quindi di consumo del materiale sensibile) superiori dovuti all'andamento inversamente proporzionale con l'energia delle sezioni d'urto di cattura radiativa, la reazione principale su cui si basano i SPND-pronti. Si conferma, quindi, una variazione della sensibilità dello strumento a seconda dello spettro neutronico monitorato, o equivalentemente, della posizione d'installazione all'interno del reattore.

2.2.2 Test su SPND al ¹⁹⁵Pt

Le librerie di sezioni d'urto a disposizione della versione di MCNPX in uso non sono provviste di dati diversificati per gli isotopi del platino, quindi non è stato possibile effettuare uno studio di burn-up dettagliato come per il ⁵⁹Co. La libreria disponibile considera il solo platino in composizione isotopica naturale, di seguito indicato come ⁰Pt.

Un SPND come definito in §2.1.2, alimentato con un volume sensibile di ⁰Pt (che contiene ¹⁹⁵Pt nella misura del 33.8%) è stato sottoposto alle condizioni d'irraggiamento specificate in §2.1.1, all'interno di TAPIRO.


Le condizioni generali della prova sono riportate nella tabella sottostante.

Carica iniziale di ⁰ Pt [g]	1.721000E+00
Carica finale di ⁰ Pt [g]	1.720805E+00
Consumo di ⁰ Pt [g]	1.946654E-04
Flusso neutronico [$n/(cm^2s)$]	1.30E+12
Tempo d'esposizione [s]	315360000
Tempo d'esposizione [mesi]	120
Fluenza neutronica raggiunta [$n/(cm^2)$]	4.10E+20
burn-up medio [%/mese]	9.4E-05

Tabella 6 - Condizioni e risultati globali d'irraggiamento di un SPND Thermocoax-type, alimentato con platino in composizione isotopica naturale ⁰Pt.

	Reaction rate [$reaction/s$]		
	(n, γ)	(n,2n)	(n,3n)
⁰ Pt	1.47E+09 ($\pm 0.4\%$)	1.02E+08 ($\pm 4.0\%$)	4.57E+05 ($\pm 52\%$)

Tabella 7 - Ratei di reazione per le specie presenti all'interno del volume sensibile del SPND alimentato con ⁰Pt.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 - 123	0	L	15	47

Anche in questo caso, sebbene siano raggiunte fluenze considerevoli, nell'ordine di $4E+20$ n/cm², il consumo del materiale sensibile è esiguo, con un riduzione in massa di $\sim 1.1E - 3$ %/anno. Ne segue che anche ipotizzando di incrementare la fluenza di un fattore 1000 ÷ 2000, per tener conto dell'esposizione a flussi neutronici veloci più intensi di quelli ottenibili in TAPIRO, il SPND al ¹⁹⁵Pt presenterebbe una vita utile più corta di quella che corrisponderebbe al ⁵⁹Co, ma comunque più che longeva, rendendo ipotizzabile anche per esso un'installazione fissa all'interno della struttura dell'elemento di combustibile.

È da notare, comunque, che tali considerazioni valgono a parità di qualità energetica dello spettro neutronico. L'esposizione a spettri più attenuati in energia comporterebbero ratei di reazione (e quindi di consumo del materiale sensibile) superiori dovuti all'andamento inversamente proporzionale con l'energia delle sezioni d'urto di cattura radiativa, la reazione principale su cui si basano i SPND-pronti. Si conferma, quindi, una variazione della sensibilità dello strumento a seconda dello spettro neutronico monitorato, o equivalentemente, della posizione d'installazione all'interno del reattore.


2.3 Studio della risposta dinamica di SPND-pronti commercialmente disponibili in TAPIRO

L'interesse verso i Self Powered Neutron Detectors per ambienti reattoristici nasce dall'idea di utilizzarli come strumentazione di controllo in-core, specie in quei reattori in sperimentazione (come i Lead Fast Reactors), le cui dinamiche non sono ancora ben conosciute e strumentazione di monitoraggio 'vicina' al processo di fissione si rende, pertanto, necessaria per questioni di studio e di sicurezza nelle operazioni condotte.

In altre parole, la strumentazione di monitoraggio e controllo del reattore deve essere 'pronta', il che tecnicamente si traduce nell'ottenere variazioni delle risposte elettriche riportanti informazioni sul flusso neutronico con ritardi inferiori ai 50 ms, rispetto all'istante di variazione nel flusso neutronico. Tipicamente, nel campo dei reattori veloci sono utilizzate, in-core, camere a fissione, ma la loro principale problematica risiede nel "esaurimento" troppo rapido della sonda all'aumentare del flusso neutronico, sia per consumo del materiale sensibile che per accumulo di prodotti di fissione che costituiscono un disturbo significativo al segnale elettrico.

I SPND-pronti possono superare questo inconveniente, ma le loro caratteristiche dinamiche devono essere necessariamente testate in esperienze che dimostrino l'effettiva monitorabilità del flusso neutronico da parte di queste sonde.

In passato, attività di ricerca sono state condotte sulle caratteristiche dinamiche di SPND-ritardati in flussi neutronici termici, epitermici e veloci [3][5][6] o SPND-pronti in flussi neutronici termici ed epitermici[7][8][9]. Difficilmente sono stati sperimentati, nel passato, SPND-pronti in flussi neutronici veloci, perché l'ottenimento da tali rivelatori di segnali

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 - 123	0	L	16	47

elettrici statisticamente significativi richiede valori di flusso neutronico elevati ($> 10^{12} \text{ n/cm}^2\text{s}$), a causa degli andamenti delle sezioni d'urto di reazione.

Considerando una trattazione generale, la corrente misurabile attraverso un rivelatore SPND-pronto può essere suddivisa nei seguenti contributi:

- corrente da reazioni (n, γ);
- corrente dal fondo gamma-pronto di reattore;
- corrente da accumulo di prodotti di attivazione nel volume sensibile del rivelatore;
- corrente dovuta al cavo o agli effetti ambientale (es. fenomeni di agitazione termica degli, accumulo di prodotti di fissione nel reattore, ecc).

$$I_{TOT} = I_{(n,\gamma)} + I_{fondo \gamma} + I_{decay} + I_{noise} \quad (1)$$

Di essi, il primo porta effettivamente informazioni circa il flusso neutronico, gli altri costituiscono degli effetti di disturbo, che possono essere caratterizzati preliminarmente così da poter scorporare dalla corrente misurata dal SPND il segnale direttamente collegato alla grandezza finale oggetto della misura, ovvero il flusso neutronico.


Esperienze circa la prontezza di risposta alle variazioni del flusso neutronico sono state condotte in precedenza, con risultati più che soddisfacenti [7] [9].

Di seguito è analizzato l'andamento della corrente totale, secondo l'equazione (1), per il SPND commerciale al ^{59}Co , nelle condizioni d'irraggiamento descritte in §2.1.1. Non risulta possibile effettuare sul rivelatore al ^{195}Pt l'analisi che includa il contributo alla corrente per decadimento radioattivo, per la mancanza di dati sulle sezioni d'urto, come detto in precedenza.

2.3.1 Test su SPND al ^{59}Co

Attraverso il modello di simulazione descritto in §2.1.2, è stato possibile effettuare delle prove dinamiche attraverso il codice MCNPX, ipotizzando che il flusso neutronico di TAPIRO, ed il conseguente campo gamma, sia pulsato secondo una certa dinamica. La prova intende verificare se il comportamento della corrente misurata in output al rivelatore segue la forzante neutronica.

Si è ipotizzato un impulso di sorgente della durata di 1 s, un repentino azzeramento, ed una seguente risalita: entrambe i contributi $I_{(n,\gamma)}$ e $I_{fondo \gamma}$ sono proporzionali al flusso neutronico di sorgente, quindi è ragionevole supporre che tali contributi seguiranno il medesimo l'andamento dei flussi neutronico e gamma. Per quanto concerne, invece, il contributo al segnale di corrente dovuto ai prodotti di reazione creatisi all'interno del volume sensibile, I_{decay} , è chiaro che tale valore dipende dalla storia d'irraggiamento della sonda, visto che l'accumulo di specie radioattive incrementa via via che aumenta la fluenza di esposizione della sonda. In particolare, per un SPND alimentato con ^{59}Co , l'isotopo

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 - 123	0	L	17	47

radioattivo più significativo è il prodotto d'attivazione diretto, ovvero il ^{60}Co , come è evidente da §2.2.1.

Si considerano quindi due casi.

1. Sorgente pulsata e materiale sensibile della sonda "vergine", ovvero attività di ^{60}Co nulla inizialmente.

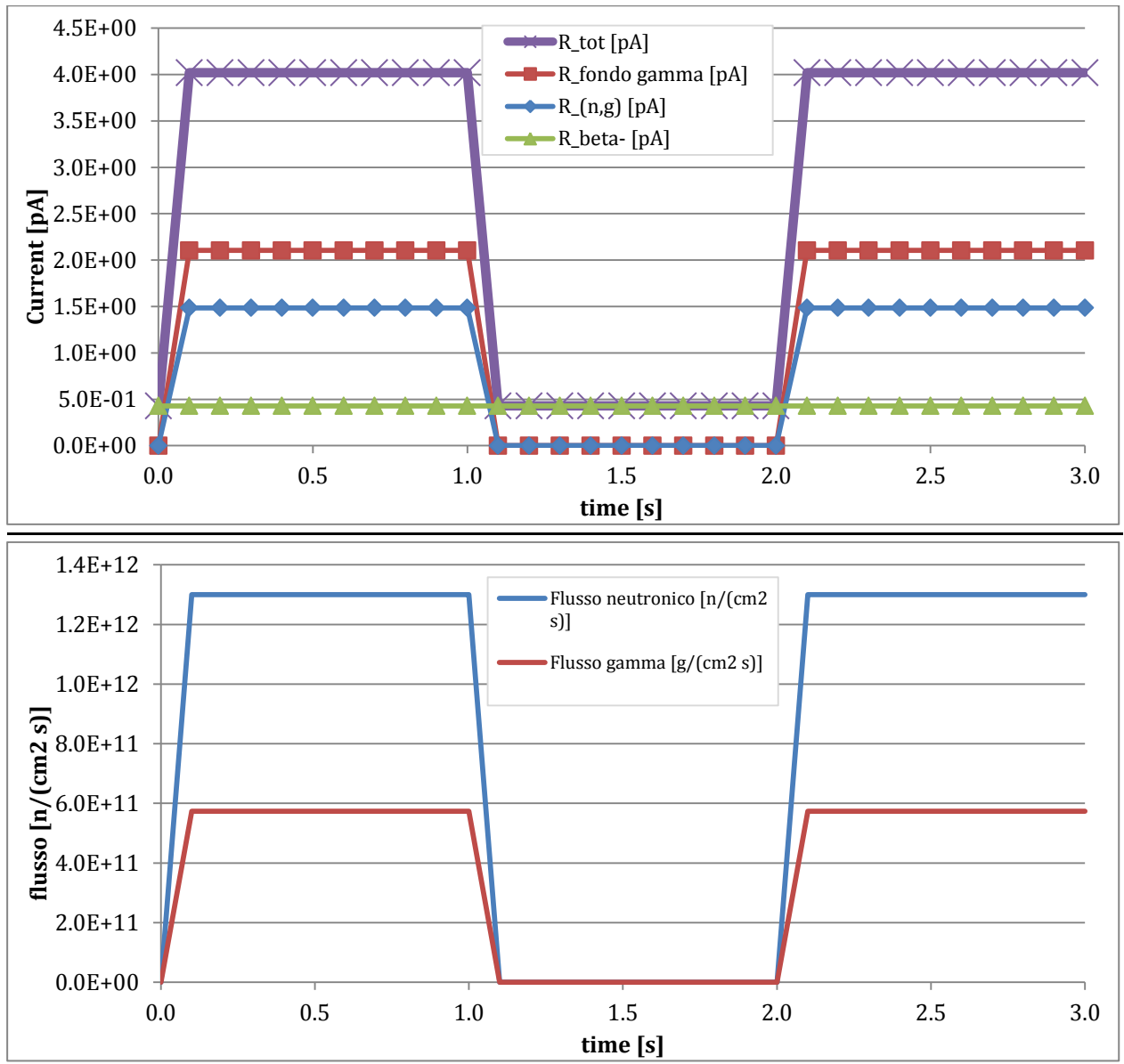


Figura 10 - Risposta dinamica del SPND alimentato con ^{59}Co all'interno del canale diametrico di TAPIRO al variare del flusso neutronico (e variazione del conseguente flusso gamma), nel caso di sonda "vergine", ovvero attività iniziale di ^{60}Co nulla.

Come risulta evidente, la risposta della sonda segue la dinamica di variazione del flusso neutronico nel tempo, per cui si conferma la prontezza di risposta e di monitoraggio della grandezza d'interesse.

Nel caso particolare del canale diametrico di TAPIRO, la sonda risulta presentare le risposte al campo neutronico, $I_{(n,\gamma)}$, e al campo gamma $I_{fondo\ \gamma}$, confrontabili tra loro. Per quanto concerne la corrente dovuta al decadimento radioattivo del materiale sensibile della sonda, I_{decay} , nel caso della sonda vergine, è chiaro che tale contributo è nullo.



2. *Sorgente pulsata e materiale sensibile della sonda già irraggiato, con attività iniziale di ^{60}Co corrispondente ad 10 MBq (ovvero a ~5 mesi d'irraggiamento continuo in TAPIRO)*

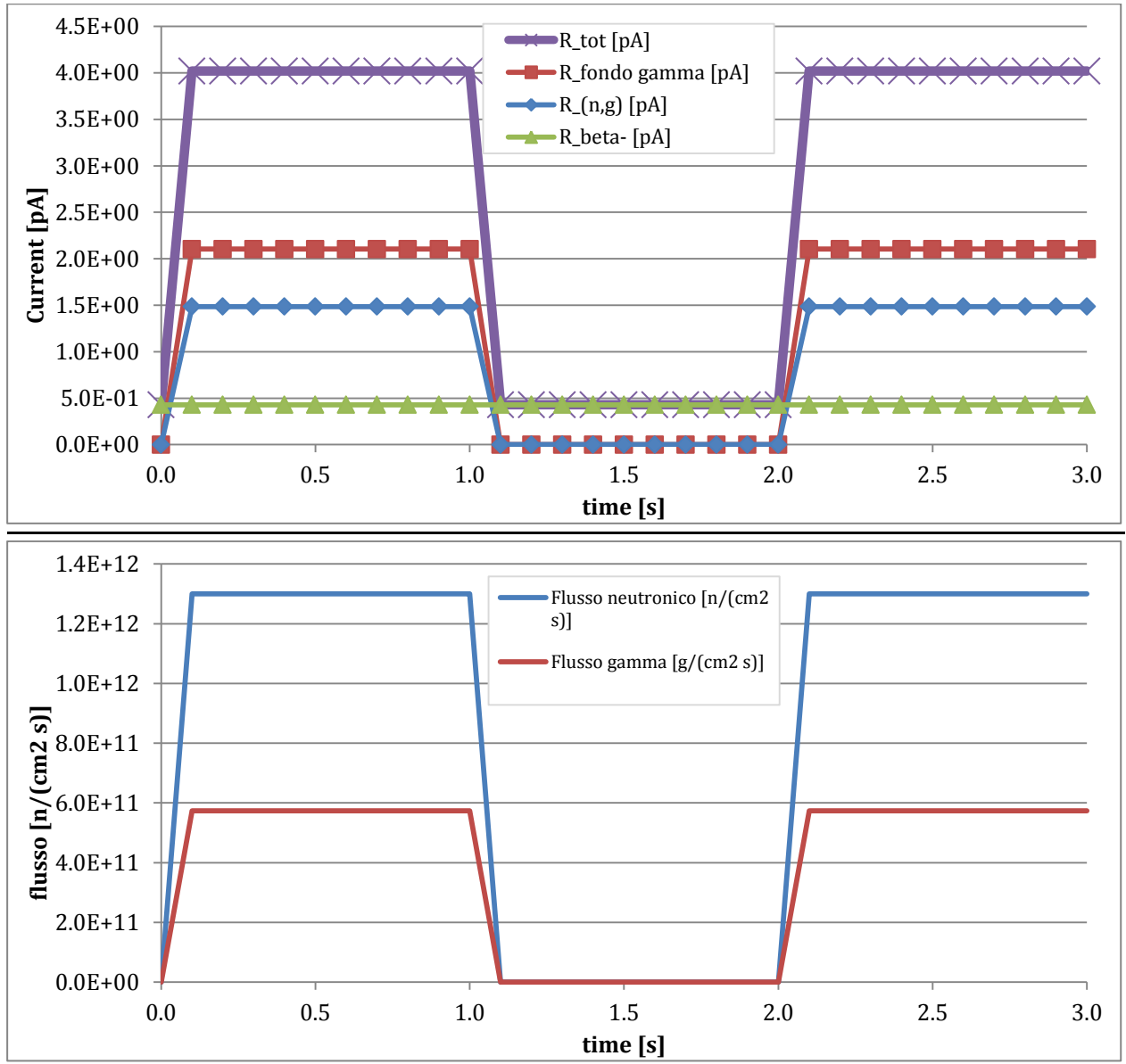



Figura 11 - Risposta dinamica del SPND alimentato con ^{59}Co all'interno del canale diametrico di TAPIRO al variare del flusso neutronico (e variazione del conseguente flusso gamma), nel caso di sonda già irraggiata, con attività iniziale di ^{60}Co pari a 10 MBq (attività che si raggiungerebbe dopo cinque mesi di irraggiamento continuo a piena potenza in TAPIRO).

Si conferma, come in precedenza, la prontezza di risposta e di monitoraggio della grandezza d'interesse. Anche in questo caso, le risposte al campo neutronico, $I_{(n,\gamma)}$, e al campo gamma $I_{fondo\ \gamma}$, confrontabili tra loro. Per quanto concerne la corrente dovuta al decadimento radioattivo del materiale sensibile della sonda, I_{decay} , nel caso della sonda contenente un'attività pari 10 MBq, esisterà un contributo di corrente "di fondo" che risulta costante

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 - 123	0	L	21	47

poiché la dinamica di variazione dell'attività è molto più "lenta" della dinamica di variazione del flusso neutronico proposta: in altre parole, nell'arco di 3 secondi, l'attività di ^{60}Co contenuta nella sonda non varia e, quindi, neanche il contributo I_{decay} . È chiaro che all'aumentare della fluensa cui è esposta la sonda, tale contributo crescerà nel tempo, e sarà necessaria una compensazione a lungo termine che tenga conto del burn-up della sonda. Considerando che, in ogni caso risulta necessario tarare periodicamente la strumentazione mediante misure assolute di flusso neutronico (a mezzo di attivazione indotta su campioni opportuni), è possibile, oltre che calcolare matematicamente il burn-up ed una seguente previsione, anche effettuare delle misure in vivo per monitorare questi effetti di disturbo a lungo termine.

2.3.2 Test su SPND al ^{195}Pt

Attraverso il modello di simulazione descritto in §2.1.2, è stato possibile effettuare delle prove dinamiche attraverso il codice MCNPX, ipotizzando che il flusso neutronico di TAPIRO, ed il conseguente campo gamma, sia pulsato secondo una certa dinamica. La prova intende verificare se il comportamento della corrente misurata in output al rivelatore segue la forzante neutronica.

Si è ipotizzato un impulso di sorgente della durata di 1 s, un repentino azzeramento, ed una seguente risalita: entrambe i contributi $I_{(n,\gamma)}$ e $I_{fondo\ \gamma}$ sono proporzionali al flusso neutronico di sorgente, quindi è ragionevole supporre che tali contributi seguiranno il medesimo andamento dei flussi neutronico e gamma. Per quanto concerne, invece, il contributo al segnale di corrente dovuto ai prodotti di reazione creatisi all'interno del volume sensibile, I_{decay} , è chiaro che tale valore dipende dalla storia d'irraggiamento della sonda, visto che l'accumulo di specie radioattive incrementa via via che aumenta la fluensa di esposizione della sonda. Per quanto riguarda il SPND al ^{195}Pt , non è possibile tenere in considerazione tale contributo per la mancanza di dati circa le sezioni d'urto isotopo per isotopo. Si ricorda, difatti, che i risultati presentati di seguito riguardano un emettitore di ^{190}Pt , ovvero platino in composizione isotopica naturale.

1. *Sorgente pulsata e materiale sensibile della sonda "vergine".*

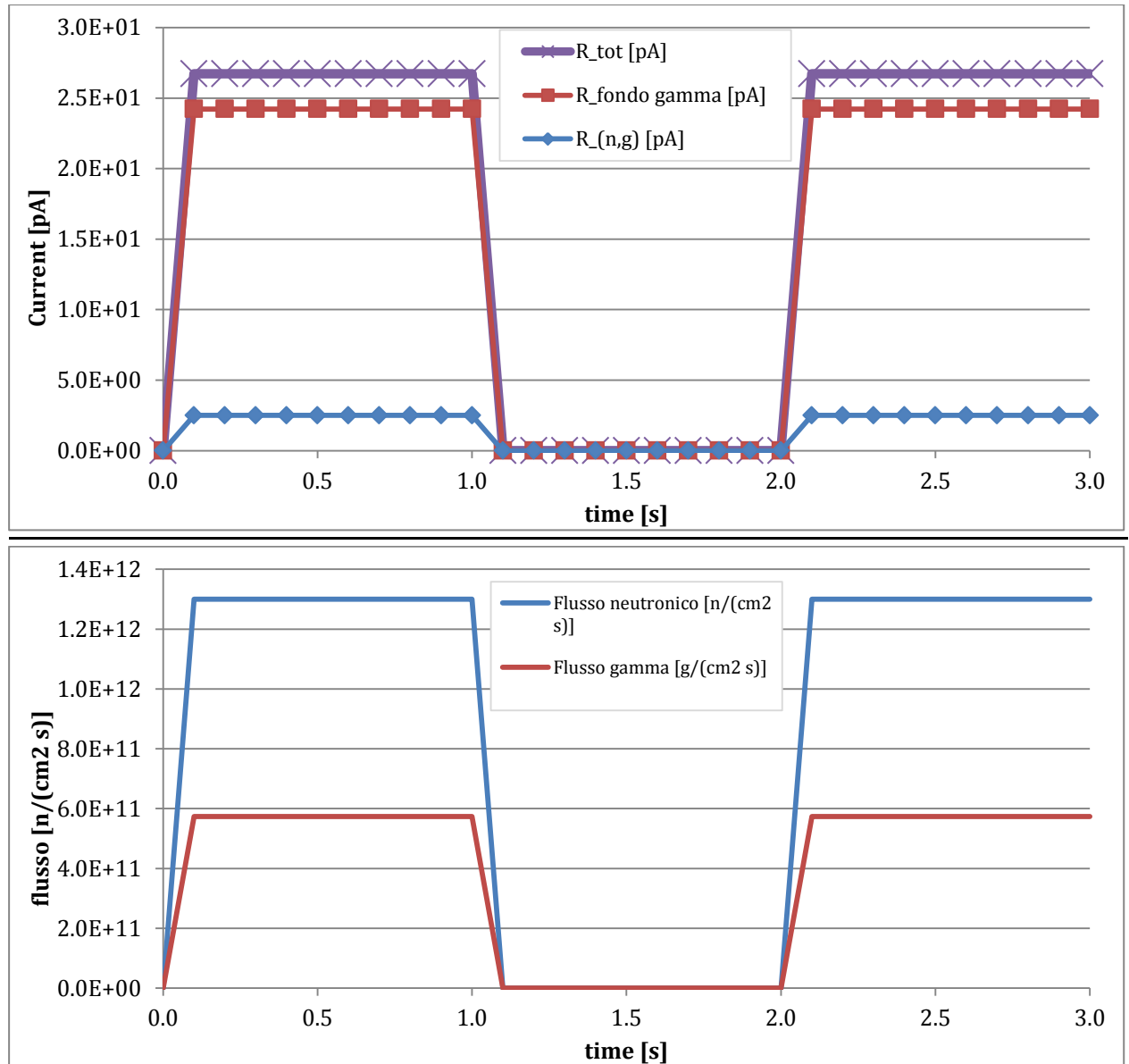



Figura 12 - Risposta dinamica del SPND alimentato con ¹⁹⁰Pt (platino in composizione isotopica naturale) all'interno del canale diametrale di TAPIRO al variare del flusso neutronico (e variazione del conseguente flusso gamma), nel caso di sonda "vergine".

Come risulta evidente, la risposta della sonda segue la dinamica di variazione del flusso neutronico nel tempo, per cui si conferma la prontezza di risposta e di monitoraggio della grandezza d'interesse.

Nel caso particolare del canale diametrale di TAPIRO, la sonda risulta presentare la risposta al campo gamma, $I_{fondo \gamma}$, più significativa della risposta neutronica, $I_{(n,\gamma)}$, con un fattore circa 10 tra i due contributi. Tale risultato era atteso, essendo già verificato sperimentalmente [8][9].

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 - 123	0	L	23	47

La maggiore sensibilità di tale sonda al campo gamma di reattore può essere superata mediante compensazione in tempo reale, quindi sottraendo un segnale di corrente prodotto da una sonda con emettitore simile al platino e sensibile al “solo” campo gamma, oppure mediante correzioni matematiche. Come detto, in questo caso non è possibile calcolare il contributo d’attivazione, I_{decay} , che va comunque tenuto in considerazione e trattato come proposto precedentemente.

3. Valutazione delle prestazioni di SPND alimentati con materiali alternativi

Nel presente paragrafo è analizzato il comportamento di alcuni isotopi alternativi come materiali sensibili applicabili alla tecnologia degli SPND-pronti.

3.1 Studio di burn-up di SPND-pronti alimentati con materiali alternativi in TAPIRO

Si riporta di seguito lo studio di burn-up degli SPND pronti, provvisti di materiali sensibili diversi da quelli che più frequentemente si trovano in uno presso i costruttori di tali strumenti.

La motivazioni principali che spingono allo studio del burn-up del materiale sensibile si riassumono:

- nella valutazione del rateo di consumo e del consumo effettivo del materiale sensibile in determinate condizioni d'irraggiamento, che –a lungo andare– comportano variazioni nella sensibilità dello strumento, fino alla necessità di sua sostituzione;
- nella modificazione attesa nella risposta elettrica dello strumento a causa dei disturbi innescati dalla creazione, all'interno del volume sensibile di specie radioattive, inizialmente per attivazione neutronica, e poi per decadimento radioattivo delle specie prodotte.

Entrambi gli aspetti possono comportare esigenze di sostituzione dello strumento, nel lungo termine, identificando –quindi– un intervallo di vita utile della sonda.

Si precisa che, non avendo a disposizione tutte le librerie delle sezioni d'urto alla temperature 600-900 K, si è deciso di utilizzare le sezioni d'urto a $T=293$ K, presenti per tutti i nuclidi, al fine di fornire dei dati e dei risultati omogenei e confrontabili tra loro, senza comunque perdere di significatività. L'intera procedura, con dati di partenza più completi, potrà essere ripetuta anche con librerie più appropriate, appena disponibili.

3.1.1 Test su SPND al ^{180}Hf

Un SPND come definito in §2.1.2, alimentato con un volume sensibile di ^{180}Hf , ovvero afnio in composizione isotopica naturale, è stato sottoposto alle condizioni d'irraggiamento specificate in §2.1.1, all'interno di TAPIRO.

Le condizioni generali della prova sono riportate nella tabella sottostante.

Carica iniziale di ^{180}Hf [g]	3.7830000E-01
Carica finale di ^{180}Hf [g]	3.7828625E-01
Carica finale di ^{181}Ta [g]	1.3751224E-05

Flusso neutronico [$n/(cm^2s)$]	1.30E+12
Tempo d'esposizione [s]	315360000
Tempo d'esposizione [mesi]	120
Fluenza neutronica raggiunta [$n/(cm^2)$]	4.10E+20
burn-up medio [%/mese]	3.03E-05

Tabella 8 - Condizioni e risultati globali d'irraggiamento di un SPND Thermocoax-type, alimentato con ^{180}Hf , ovvero afnio in composizione isotopica naturale. È preso a riferimento, in questo caso, l'isotopo maggiormente occorrente, il ^{180}Hf .

I tassi di reazione, nelle condizioni d'irraggiamento dette e diversificati per le specie presenti nel volume sensibile e le tipologie di reazione che possono verificarsi, risultano:

	Reaction rate [$reaction/s$]			
	(n, γ)	(n,2n)	(n, α)	(n,p)
^{174}Lu	2.86E+02 ($\pm 0.4\%$)	2.93E+00 ($\pm 6.7\%$)	9.8E-05 ($\pm 45.2\%$)	3.21E-01 ($\pm 0.5\%$)
^{176}Lu	1.02E+00 ($\pm 0.4\%$)	2.61E-02 ($\pm 3.9\%$)	2.5E-07 ($\pm 45.2\%$)	8.24E-04 ($\pm 0.5\%$)
^{176}Hf	6.48E+07 ($\pm 0.4\%$)	1.50E+06 ($\pm 6.8\%$)	-	1.86E+03 ($\pm 15\%$)
^{177}Hf	5.26E+08 ($\pm 1.1\%$)	1.83E+07 ($\pm 4.0\%$)	-	3.72E+03 ($\pm 13\%$)
^{178}Hf	2.33E+08 ($\pm 0.4\%$)	1.19E+07 ($\pm 5.7\%$)	-	1.61E+03 ($\pm 28\%$)
^{179}Hf	2.54E+08 ($\pm 0.4\%$)	1.95E+07 ($\pm 3.2\%$)	-	3.83E+02 ($\pm 24\%$)
^{180}Hf	1.44E+08 ($\pm 0.4\%$)	1.48E+07 ($\pm 6.0\%$)	-	4.26E+02 ($\pm 41\%$)
^{181}Ta	1.77E+04 ($\pm 0.5\%$)	3.38E+02 ($\pm 6.5\%$)	-	4.87E+00 ($\pm 0.6\%$)
^{182}Ta	9.07E-02 ($\pm 0.6\%$)	4.73E-03 ($\pm 3.8\%$)	1.1E-07 ($\pm 35.7\%$)	-
^{182}W	4.36E-01 ($\pm 1.5\%$)	9.21E-03 ($\pm 7.7\%$)	5.2E-07 ($\pm 51.9\%$)	1.24E-06 ($\pm 39\%$)
^{183}W	8.85E-06 ($\pm 0.7\%$)	7.79E-07 ($\pm 3.7\%$)	1.0E-11 ($\pm 51.9\%$)	2.73E-11 ($\pm 33\%$)
^{184}W	4.83E-11 ($\pm 0.7\%$)	3.17E-12 ($\pm 5.9\%$)	5.6E-17 ($\pm 51.9\%$)	1.51E-16 ($\pm 45\%$)

Tabella 9 - Tassi di reazione per le specie presenti all'interno del volume sensibile del SPND alimentato con ^{180}Hf , ovvero afnio in composizione isotopica naturale.

Come risulta evidente, i valori maggiormente significativi riguardano gli isotopi maggiormente presenti, ovvero quelli in composizione isotopica naturale dell'afnio, essendo quantitativamente predominanti. Tutti gli altri isotopi presenti in Tabella 9 sono prodotti di attivazione e successivo decadimento, a partire da quest'ultimo, quindi è ragionevole supporre che i quantitativi presenti siano ordini di grandezza più bassi. Inoltre, le reazioni di cattura radiativa sugli isotopi ^{176}Hf , ^{177}Hf , ^{178}Hf e ^{179}Hf , producono isotopi stabili dello stesso materiale sensibile, il che "auto fertilizza" la sonda, allungandone la "vita" in merito al minor consumo di materiale sensibile.

Si riportano, nel grafico sottostante, le dinamiche di creazione ed accumulo delle specie maggiori estranee al materiale sensibile, venutesi a creare per attivazione neutronica e successivo decadimento:

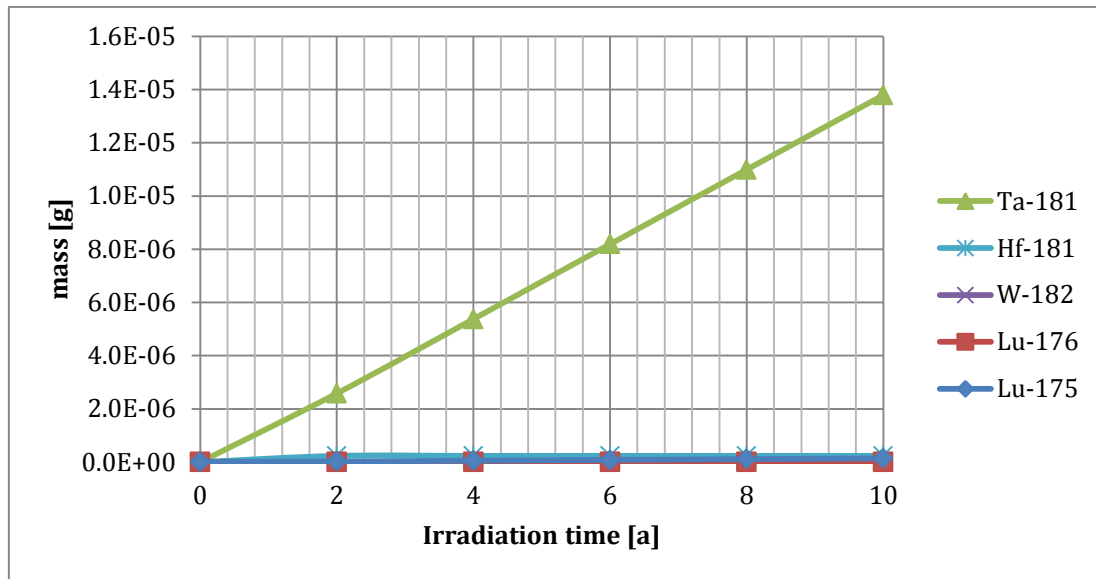


Figura 13 – Accumulo delle maggiori specie venutesi a creare durante l’irraggiamento di un SPND alimentato con ^{180}Hf . Come risulta evidente, anche per valori di fluensa nell’ordine di $4\text{E}+20 \text{ n/cm}^2$, i prodotti di attivazione della composizione isotopica originale sono, in quantitativo, ordini di grandezza inferiore alla massa del materiale sensibile. Inoltre, l’unico isotopo maggiormente significativo è il ^{181}Ta , che risulta stabile.

Come risulta evidente da Tabella 8, Tabella 9 e Figura 13 – Accumulo delle maggiori specie venutesi a creare durante l’irraggiamento di un SPND alimentato con ^{180}Hf . Come risulta evidente, anche per valori di fluensa nell’ordine di $4\text{E}+20 \text{ n/cm}^2$, i prodotti di attivazione della composizione isotopica originale sono, in quantitativo, ordini di grandezza inferiore alla massa del materiale sensibile. Inoltre, l’unico isotopo maggiormente significativo è il ^{181}Ta , che risulta stabile., sebbene siano raggiunte fluense considerevoli, nell’ordine di $4\text{E}+20 \text{ n/cm}^2$, il consumo del materiale sensibile è davvero esiguo, con un riduzione in massa di $\sim 3.6\text{E} - 4 \text{ \%/anno}$. Ne segue che anche ipotizzando di incrementare la fluensa di un fattore $1000 \div 2000$, per tener conto dell’esposizione a flussi neutronici veloci più intensi di quelli ottenibili in TAPIRO, anche il SPND al ^{180}Hf presenterebbe una vita utile più che longeva, rendendo ipotizzabile anche un’installazione fissa dello strumento all’interno della struttura dell’elemento di combustibile.

È da notare, comunque, che tali considerazioni valgono a parità di qualità energetica dello spettro neutronico. L’esposizione a spettri più attenuati in energia comporterebbero ratei di reazione (e quindi di consumo del materiale sensibile) superiori dovuti all’andamento inversamente proporzionale con l’energia delle sezioni d’urto di cattura radiativa, la reazione principale su cui si basano i SPND-pronti. Si conferma, quindi, una variazione della sensibilità dello strumento a seconda dello spettro neutronico monitorato, o equivalentemente, della posizione d’installazione all’interno del reattore.

3.1.2 Test su SPND al ^{63}Cu

Un SPND come definito in §2.1.2, alimentato con un volume sensibile di ^{63}Cu , è stato sottoposto alle condizioni d'irraggiamento specificate in §2.1.1, all'interno di TAPIRO.

Le condizioni generali della prova sono riportate nella tabella sottostante.

Carica iniziale di ^{63}Cu [g]	7.17300000E-01
Carica finale di ^{63}Cu [g]	7.17290911E-01
Carica finale di ^{64}Cu [g]	9.08884771E-06
Flusso neutronico [$n/(cm^2s)$]	1.30E+12
Tempo d'esposizione [s]	315360000
Tempo d'esposizione [mesi]	120
Fluenza neutronica raggiunta [$n/(cm^2)$]	4.10E+20
burn-up medio [%/mese]	1.06E-05

Tabella 10 - Condizioni e risultati globali d'irraggiamento di un SPND Thermocoax-type, alimentato con ^{63}Cu .

I ratei di reazione, nelle condizioni d'irraggiamento dette e diversificati per le specie presenti nel volume sensibile e le tipologie di reazione che possono verificarsi, risultano:

	Reaction rate [<i>reaction/s</i>]			
	(n, γ)	(n,2n)	(n, α)	(n,p)
⁵⁹ Co	1.38E+00 ($\pm 1.4\%$)	2.48E-02 ($\pm 20\%$)	1.57E-02 ($\pm 3.7\%$)	1.35E-01 ($\pm 1.5\%$)
⁶⁰ Ni	1.61E+01 ($\pm 2.5\%$)	1.09E-01 ($\pm 31\%$)	2.08E+00 ($\pm 2.2\%$)	2.44E+00 ($\pm 2.4\%$)
⁶¹ Ni	1.12E-02 ($\pm 1.8\%$)	7.11E-04 ($\pm 8.7\%$)	1.48E-03 ($\pm 1.2\%$)	1.81E-03 ($\pm 1.5\%$)
⁶² Ni	4.05E+01 ($\pm 0.4\%$)	5.70E-01 ($\pm 21\%$)	1.14E-01 ($\pm 4.5\%$)	8.44E-02 ($\pm 7.7\%$)
⁶⁴ Ni	7.34E+02 ($\pm 0.5\%$)	4.50E+01 ($\pm 14\%$)	7.95E-01 ($\pm 7.0\%$)	1.03E-01 ($\pm 26\%$)
⁶³ Cu	2.64E+08 ($\pm 0.7\%$)	1.23E+06 ($\pm 28\%$)	4.81E+06 ($\pm 2.5\%$)	1.83E+08 ($\pm 0.7\%$)
⁶⁵ Cu	6.75E-03 ($\pm 0.8\%$)	1.67E-04 ($\pm 17\%$)	5.80E-06 ($\pm 6.7\%$)	2.10E-04 ($\pm 1.5\%$)

Tabella 11 - Ratei di reazione per le specie presenti all'interno del volume sensibile del SPND alimentato con ⁶³Cu.

Come risulta evidente, i valori maggiormente significativi riguardano il solo ⁶³Cu, isotopo principale del volume sensibile. Tutti gli altri isotopi presenti in Tabella 11 sono prodotti di reazione e successivo decadimento, a partire da quest'ultimo, quindi è ragionevole supporre che i quantitativi presenti siano ordini di grandezza più bassi.

Si riportano, nel grafico sottostante, le dinamiche di creazione ed accumulo delle specie maggiori estranee al materiale sensibile, venutesi a creare per attivazione neutronica e successivo decadimento:

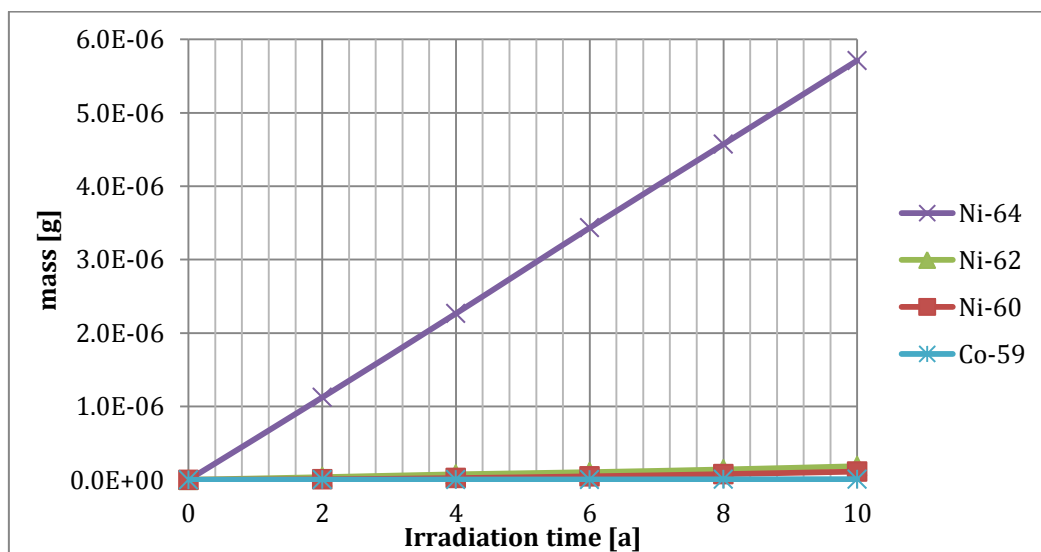


Figura 14 – Accumulo delle maggiori specie venutesi a creare durante l'irraggiamento di un SPND alimentato con ⁶³Cu. Come risulta evidente, anche per valori di fluensa nell'ordine di $4E+20$ n/cm², i prodotti di attivazione della composizione isotopica originale sono, in quantitativo, ordini di grandezza inferiori alla massa del materiale sensibile: l'unico isotopo maggiormente significativo è il ⁶⁴Ni, che risulta stabile.

Come risulta evidente da Tabella 10, Tabella 11 e Figura 14, sebbene siano raggiunte fluense considerevoli, nell'ordine di $4E+20$ n/cm², il consumo del materiale sensibile è davvero esiguo, con un riduzione in massa di $\sim 1.3E - 4$ %/anno. Ne segue che anche ipotizzando di incrementare la fluensa di un fattore 1000 ÷ 2000, per tener conto dell'esposizione a flussi neutronici veloci più intensi di quelli ottenibili in TAPIRO, anche il SPND al ⁶³Cu

presenterebbe una vita utile più che longeva, rendendo ipotizzabile anche un’installazione fissa dello strumento all’interno della struttura dell’elemento di combustibile.

Come in precedenza, tali considerazioni valgono a parità di qualità energetica dello spettro neutronico. L’esposizione a spettri più attenuati in energia comporterebbero ratei di reazione (e quindi di consumo del materiale sensibile) superiori dovuti all’andamento inversamente proporzionale con l’energia delle sezioni d’urto di cattura radiativa, la reazione principale su cui si basano i SPND-pronti. Si conferma, quindi, una variazione della sensibilità dello strumento a seconda dello spettro neutronico monitorato, o equivalentemente, della posizione d’installazione all’interno del reattore.

3.1.3 Test su SPND al ^{115}In

Un SPND come definito in §2.1.2, alimentato con un volume sensibile di ^{115}In , è stato sottoposto alle condizioni d’irraggiamento specificate in §2.1.1, all’interno di TAPIRO.

Le condizioni generali della prova sono riportate nella tabella sottostante.

Carica iniziale di ^{115}In [g]	5.857000E-01
Carica finale di ^{115}In [g]	5.855946E-01
Carica finale di ^{116}Sn [g]	1.054452E-04
Flusso neutronico [$n/(cm^2s)$]	1.30E+12
Tempo d’esposizione [s]	315360000
Tempo d’esposizione [mesi]	120
Fluenza neutronica raggiunta [$n/(cm^2)$]	4.10E+20
burn-up medio [%/mese]	1.50E-04

Tabella 12 - Condizioni e risultati globali d’irraggiamento di un SPND Thermocoax-type, alimentato con ^{115}In .

I ratei di reazione, nelle condizioni d’irraggiamento dette e diversificati per le specie presenti nel volume sensibile e le tipologie di reazione che possono verificarsi, risultano:

	Reaction rate [<i>reaction/s</i>]			
	(n, γ)	(n,2n)	(n, α)	(n,p)
^{112}Cd	4.35E-01 ($\pm 0.4\%$)	2.04E-03 ($\pm 14\%$)	1.66E-06 ($\pm 13\%$)	1.63E-05 ($\pm 15\%$)
^{113}Cd	9.90E-02 ($\pm 0.4\%$)	2.49E-03 ($\pm 4.9\%$)	1.06E-06 ($\pm 5.7\%$)	2.94E-06 ($\pm 8.2\%$)
^{114}Cd	1.73E+01 ($\pm 1.3\%$)	2.01E-01 ($\pm 13\%$)	2.67E-05 ($\pm 19\%$)	2.03E-04 ($\pm 20\%$)
^{116}Cd	2.15E-06 ($\pm 0.6\%$)	6.55E-08 ($\pm 11\%$)	1.43E-12 ($\pm 30\%$)	1.66E-11 ($\pm 29\%$)
^{115}In	1.69E+09 ($\pm 0.4\%$)	4.23E+06 ($\pm 13\%$)	6.16E+03 ($\pm 9.6\%$)	3.31E+04 ($\pm 7.4\%$)
^{115}Sn	3.82E+03 ($\pm 0.5\%$)	6.12E+01 ($\pm 7.2\%$)	5.20E-01 ($\pm 1.5\%$)	8.85E-01 ($\pm 4.3\%$)
^{116}Sn	9.17E+04 ($\pm 0.5\%$)	7.07E+02 ($\pm 14\%$)	2.46E+00 ($\pm 8.2\%$)	8.39E+00 ($\pm 12\%$)
^{117}Sn	1.98E+00 ($\pm 0.5\%$)	1.03E-01 ($\pm 5.3\%$)	5.09E-05 ($\pm 4.7\%$)	1.34E-04 ($\pm 9.4\%$)
^{118}Sn	9.61E-06 ($\pm 0.8\%$)	1.49E-07 ($\pm 13\%$)	3.68E-11 ($\pm 21\%$)	3.17E-10 ($\pm 19\%$)

Tabella 13 - Ratei di reazione per le specie presenti all’interno del volume sensibile del SPND alimentato con ^{115}In .

Come risulta evidente, i valori maggiormente significativi riguardano il solo ^{115}In , isotopo principale del volume sensibile. Tutti gli altri isotopi presenti in Tabella 13 sono prodotti di reazione e successivo decadimento, a partire da quest'ultimo, quindi è ragionevole supporre che i quantitativi presenti siano ordini di grandezza più bassi.

Si riportano, nel grafico sottostante, le dinamiche di creazione ed accumulo delle specie maggiori estranee al materiale sensibile, venutesi a creare per reazioni neutroniche e successivo decadimento:

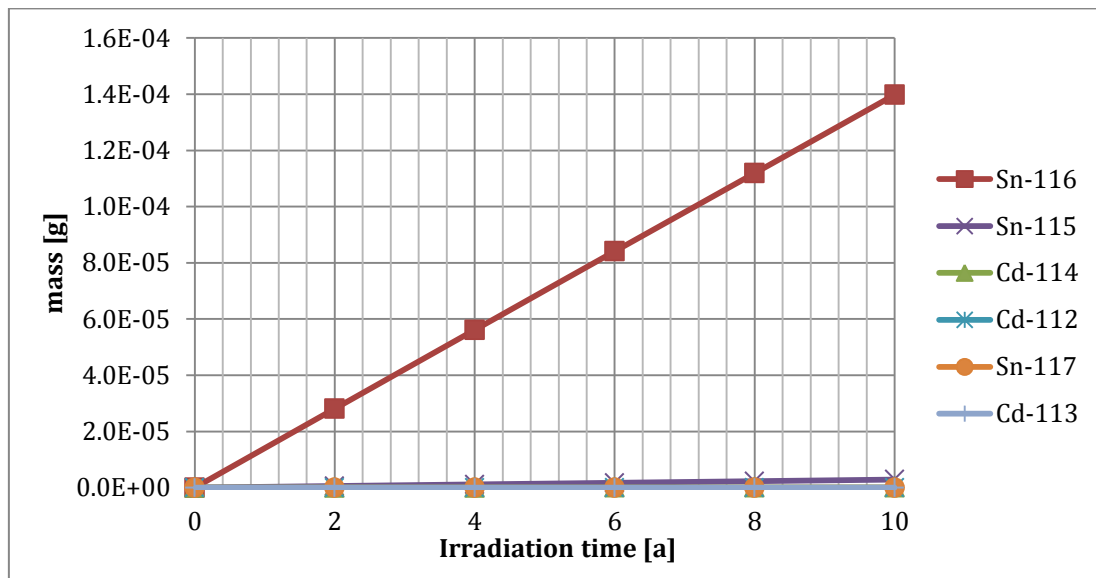


Figura 15 – Accumulo delle maggiori specie venutesi a creare durante l’irraggiamento di un SPND alimentato con ^{115}In . Come risulta evidente, anche per valori di fluensa nell’ordine di $4\text{E}+20 \text{ n/cm}^2$, i prodotti di attivazione della composizione isotopica originale sono, in quantitativo, ordini di grandezza inferiore alla massa del materiale sensibile: l’unico isotopo maggiormente significativo è lo ^{116}Sn , diretto prodotto di attivazione del ^{115}In , che risulta stabile.

Come risulta evidente da Tabella 12, Tabella 13 e Figura 15, sebbene siano raggiunte fluense considerevoli, nell’ordine di $4\text{E}+20 \text{ n/cm}^2$, il consumo del materiale sensibile è davvero esiguo, con un riduzione in massa di $\sim 1.8\text{E} - 3 \text{ \%/anno}$. Ne segue che anche ipotizzando di incrementare la fluensa di un fattore $1000 \div 2000$, per tener conto dell’esposizione a flussi neutronici veloci più intensi di quelli ottenibili in TAPIRO, anche il SPND al ^{115}In presenterebbe una vita utile più che longeva, rendendo ipotizzabile anche un’installazione fissa dello strumento all’interno della struttura dell’elemento di combustibile.

Come in precedenza, tali considerazioni valgono a parità di qualità energetica dello spettro neutronico. L’esposizione a spettri più attenuati in energia comporterebbero ratei di reazione (e quindi di consumo del materiale sensibile) superiori dovuti all’andamento inversamente proporzionale con l’energia delle sezioni d’urto di cattura radiativa, la reazione principale su cui si basano i SPND-pronti. Si conferma, quindi, una variazione della sensibilità

dello strumento a seconda dello spettro neutronico monitorato, o equivalentemente, della posizione d'installazione all'interno del reattore.

3.1.4 Test su SPND al ^{209}Bi

Un SPND come definito in §2.1.2, alimentato con un volume sensibile di ^{209}Bi , è stato sottoposto alle condizioni d'irraggiamento specificate in §2.1.1, all'interno di TAPIRO.

Le condizioni generali della prova sono riportate nella tabella sottostante.

Carica iniziale di ^{209}Bi [g]	7.847000E-01
Carica finale di ^{209}Bi [g]	7.846965E-01
Carica finale di ^{206}Pb [g]	1.084000E-06
Flusso neutronico [$n/(cm^2s)$]	1.30E+12
Tempo d'esposizione [s]	315360000
Tempo d'esposizione [mesi]	120
Fluenza neutronica raggiunta [$n/(cm^2)$]	4.10E+20
burn-up medio [%/mese]	3.73E-06

Tabella 14 - Condizioni e risultati globali d'irraggiamento di un SPND Thermocoax-type, alimentato con ^{209}Bi .

I ratei di reazione, nelle condizioni d'irraggiamento dette e diversificati per le specie presenti nel volume sensibile e le tipologie di reazione che possono verificarsi, risultano:

	Reaction rate [<i>reaction/s</i>]				
	(n, γ)	(n,2n)	(n,3n)	(n, α)	(n,p)
^{206}Pb	3.64E+01 ($\pm 2.6\%$)	1.32E+01 ($\pm 8.2\%$)	8.86E-03 ($\pm 71\%$)	2.25E-03 ($\pm 7.1\%$)	8.37E-03 ($\pm 20\%$)
^{207}Pb	5.83E-03 ($\pm 1.3\%$)	7.44E-03 ($\pm 5.6\%$)	5.68E-06 ($\pm 70\%$)	8.76E-07 ($\pm 7.3\%$)	1.83E-06 ($\pm 21\%$)
^{208}Pb	2.59E-03 ($\pm 3.9\%$)	6.56E-03 ($\pm 7.0\%$)	8.10E-06 ($\pm 70\%$)	1.21E-06 ($\pm 8.7\%$)	1.61E-07 ($\pm 44\%$)
^{209}Bi	1.61E+07 ($\pm 0.5\%$)	1.60E+07 ($\pm 6.6\%$)	2.30E+04 ($\pm 69\%$)	2.14E+04 ($\pm 1.0\%$)	1.52E+04 ($\pm 2.7\%$)

Tabella 15 - Ratei di reazione per le specie presenti all'interno del volume sensibile del SPND alimentato con ^{209}Bi .

Come risulta evidente, i valori maggiormente significativi riguardano il solo ^{209}Bi , isotopo principale del volume sensibile. Tutti gli altri isotopi presenti in Tabella 15 sono prodotti di reazione e successivo decadimento, a partire da quest'ultimo, quindi è ragionevole supporre che i quantitativi presenti siano ordini di grandezza più bassi.

Si riportano, nel grafico sottostante, le dinamiche di creazione ed accumulo delle specie maggiori estranee al materiale sensibile, venutesi a creare per reazioni neutroniche e successivo decadimento:



Figura 16 – Accumulo delle maggiori specie venutesi a creare durante l’irraggiamento di un SPND alimentato con ^{209}Bi . Come risulta evidente, anche per valori di fluensa nell’ordine di $4\text{E}+20 \text{ n/cm}^2$, i prodotti di attivazione della composizione isotopica originale sono, in quantitativo, ordini di grandezza inferiore alla massa del materiale sensibile: l’unico isotopo maggiormente significativo è lo ^{206}Pb , principale prodotto della catena di decadimento del ^{210}Bi prodotto per attivazione del ^{209}Bi , che risulta stabile.

Come risulta evidente da Tabella 14, Tabella 15 e Figura 18, sebbene siano raggiunte fluense considerevoli, nell’ordine di $4\text{E}+20 \text{ n/cm}^2$, il consumo del materiale sensibile è davvero esiguo, con un riduzione in massa di $\sim 4.5\text{E} - 5 \text{ \%/anno}$. Ne segue che anche ipotizzando di incrementare la fluensa di un fattore $1000 \div 2000$, per tener conto dell’esposizione a flussi neutronici veloci più intensi di quelli ottenibili in TAPIRO, anche il SPND al ^{209}Bi presenterebbe una vita utile più che longeva, rendendo ipotizzabile anche un’installazione fissa dello strumento all’interno della struttura dell’elemento di combustibile.

Come in precedenza, tali considerazioni valgono a parità di qualità energetica dello spettro neutronico. L’esposizione a spettri più attenuati in energia comporterebbero ratei di reazione (e quindi di consumo del materiale sensibile) superiori dovuti all’andamento inversamente proporzionale con l’energia delle sezioni d’urto di cattura radiativa, la reazione principale su cui si basano i SPND-pronti. Si conferma, quindi, una variazione della sensibilità dello strumento a seconda dello spettro neutronico monitorato, o equivalentemente, della posizione d’installazione all’interno del reattore.

3.1.5 Test su SPND al ^{152}Gd

Un SPND come definito in §2.1.2, alimentato con un volume sensibile di Gd in composizione isotopica naturale, è stato sottoposto alle condizioni d’irraggiamento specificate in §2.1.1, all’interno di TAPIRO.

Le condizioni generali della prova sono riportate nella tabella sottostante.

Carica iniziale di ⁰ Gd [g]	5.158867E-01
Carica finale di ⁰ Gd [g]	5.158206E-01
Carica finale di ¹⁵⁹ Tb [g]	8.647000E-06
Flusso neutronico [$n/(cm^2 s)$]	1.30E+12
Tempo d'esposizione [s]	315360000
Tempo d'esposizione [mesi]	120
Fluenza neutronica raggiunta [$n/(cm^2)$]	4.10E+20
burn-up medio [%/mese]	1.07E-04

Tabella 16 - Condizioni e risultati globali d'irraggiamento di un SPND Thermocoax-type, alimentato con ⁰Gd.

I tassi di reazione, nelle condizioni d'irraggiamento dette e diversificate per le specie presenti nel volume sensibile e le tipologie di reazione che possono verificarsi, risultano:

	Reaction rate [<i>reaction/s</i>]				
	(n,γ)	(n,2n)	(n,3n)	(n,α)	(n,p)
¹⁵² Gd	3.72E+06 ($\pm 0.3\%$)	9.39E+03 ($\pm 11\%$)	9.95E+00 ($\pm 74\%$)	6.31E+02 ($\pm 0.5\%$)	1.72E+01 ($\pm 10\%$)
¹⁵⁴ Gd	2.87E+07 ($\pm 0.8\%$)	8.85E+04 ($\pm 12\%$)	2.88E+01 ($\pm 85\%$)	1.50E+02 ($\pm 5.4\%$)	1.01E+02 ($\pm 13\%$)
¹⁵⁵ Gd	2.99E+08 ($\pm 0.5\%$)	2.76E+06 ($\pm 5.4\%$)	1.27E+03 ($\pm 73\%$)	9.50E+02 ($\pm 4.8\%$)	1.24E+03 ($\pm 8.8\%$)
¹⁵⁶ Gd	1.67E+08 ($\pm 4.3\%$)	1.11E+06 ($\pm 11\%$)	2.13E+03 ($\pm 73\%$)	5.98E+02 ($\pm 17\%$)	5.56E+02 ($\pm 18\%$)
¹⁵⁷ Gd	1.63E+08 ($\pm 0.5\%$)	3.77E+06 ($\pm 5.0\%$)	1.27E+03 ($\pm 73\%$)	3.78E+02 ($\pm 10\%$)	5.89E+02 ($\pm 17\%$)
¹⁵⁸ Gd	9.90E+07 ($\pm 0.9\%$)	2.14E+06 ($\pm 9.0\%$)	1.85E+03 ($\pm 74\%$)	4.17E+02 ($\pm 19\%$)	3.34E+02 ($\pm 27\%$)
¹⁶⁰ Gd	3.53E+07 ($\pm 0.6\%$)	3.03E+06 ($\pm 7.2\%$)	7.39E+03 ($\pm 69\%$)	2.03E+02 ($\pm 28\%$)	1.32E+02 ($\pm 31\%$)

Tabella 17 - Tassi di reazione per le specie presenti all'interno del volume sensibile del SPND alimentato con ⁰Gd.

Come risulta evidente, i valori maggiormente significativi riguardano i soli isotopi del gadolinio, presenti dal principio nel volume sensibile. Tutti gli altri isotopi presenti e non riportati in Tabella 17 sono prodotti di reazione e successivo decadimento, quindi è ragionevole supporre quantitativi di ordini di grandezza inferiori. Il maggiore accumulo riguarda il ¹⁵⁹Tb, come riportato nel grafico seguente.

Si riportano, nel grafico sottostante, le dinamiche di creazione ed accumulo delle specie maggiori estranee al materiale sensibile, venutesi a creare per reazioni neutroniche e successivo decadimento:

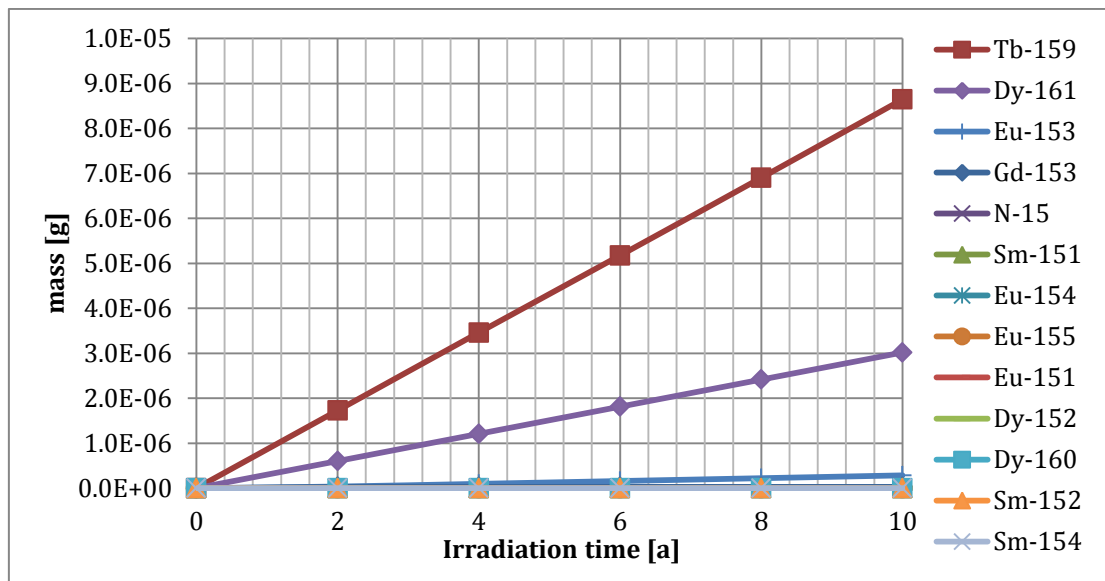



Figura 17 – Accumulo delle maggiori specie venutesi a creare durante l’irraggiamento di un SPND alimentato con ^{159}Gd . Come risulta evidente, anche per valori di fluensa nell’ordine di $4\text{E}+20 \text{ n/cm}^2$, i prodotti di attivazione della composizione isotopica originale sono, in quantitativo, ordini di grandezza inferiore alla massa del materiale sensibile: l’unico isotopo maggiormente significativo è lo ^{159}Tb , derivante dal principale prodotto di attivazione ^{159}Gd .

Come risulta evidente da Tabella 16, Tabella 17 e Figura 17, sebbene siano raggiunte fluense considerevoli, nell’ordine di $4\text{E}+20 \text{ n/cm}^2$, il consumo del materiale sensibile è davvero esiguo, con un riduzione in massa di $\sim 1.3\text{E} - 3 \text{ \%/anno}$. Ne segue che anche ipotizzando di incrementare la fluensa di un fattore $1000 \div 2000$, per tener conto dell’esposizione a flussi neutronici veloci più intensi di quelli ottenibili in TAPIRO, anche il SPND al ^{159}Gd presenterebbe una vita utile più che longeva, rendendo ipotizzabile anche un’installazione fissa dello strumento all’interno della struttura dell’elemento di combustibile.

Come in precedenza, tali considerazioni valgono a parità di qualità energetica dello spettro neutronico. L’esposizione a spettri più attenuati in energia comporterebbero ratei di reazione (e quindi di consumo del materiale sensibile) superiori dovuti all’andamento inversamente proporzionale con l’energia delle sezioni d’urto di cattura radiativa, la reazione principale su cui si basano i SPND-pronti. Si conferma, quindi, una variazione della sensibilità dello strumento a seconda dello spettro neutronico monitorato, o equivalentemente, della posizione d’installazione all’interno del reattore.

3.2 Studio della risposta dinamica di SPND-pronti alimentati con materiali alternativi in TAPIRO

Per motivi di brevità non si riportano dati e grafici relativi alla risposta dinamica di SPND alimentati con ^{63}Cu , ^{176}Yb , ^{115}In , ^{209}Bi e ^{159}Gd essendo i comportamenti confrontabili e sovrapponibili con quanto già riportato in §2.3.1 e §2.3.2.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 - 123	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 35	di 47
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

4. Studio delle caratteristiche spettrali dei materiali sensibili per SPND-pronti

Notoriamente, i Self Powered Neutron Detectors producono in output solo segnali di corrente, rivelando tali sonde solo ratei di reazione e non informazioni energetiche circa le particelle che innescano le reazioni dette. Come per la maggior parte dei rivelatori per neutroni, quindi, non risulta –a priori– possibile effettuare una discriminazione energetica delle particelle rivelate misurando operativamente uno spettro direttamente con lo strumento.

L'informazione energetica circa i neutroni che innescano le reazioni cui risulta sensibile il rivelatore è racchiusa nelle sezioni d'urto di reazione, che associano a ciascuna energia del neutrone incidente, un valore di probabilità d'innescio di una specifica reazione o di una serie di reazioni.

Avendosi, quindi, il rateo di reazione, R,

$$R = N \cdot V \int_0^{\infty} \varphi(E) \sigma(E) dE [=] \left[\frac{\text{reazioni}}{s} \right] \quad (2)$$

dove:

N è la densità atomica del materiale emettitore;

V, il volume dell'emettitore;

φ , il flusso neutronico di irraggiamento;

σ , la sezione d'urto di una specifica reazione o di una serie di reazioni,

la risposta del SPND (1) risulta proporzionale al rateo di reazione, R, e quindi

$$I_{TOT} \propto R = N \cdot V \int_0^{\infty} \varphi(E) \sigma(E) dE \quad (3)$$

L'equazione (3) può essere riformulata anche in una forma più semplice e di immediata comprensione, secondo quanto segue.

$$I_{(n,\gamma)} = C \cdot \int_0^{\infty} \varphi(E) S(E) dE \quad (4)$$

dove:

$C = I_{(n,\gamma)} / I_{TOT}$ è la frazione della corrente misurata effettivamente correlata al solo flusso neutronico;

$\varphi(E)$ è il flusso neutronico in funzione dell'energia $[n/cm^2s]$;

$S(E)$ è la sensibilità della sonda in funzione dell'energia del neutrone incidente $\left[\frac{pA}{n/cm^2s} \right]$.

Questa formulazione semplificata è perfettamente equivalente alla (3), e lascia chiaramente intendere che la misura rivelata dalla sonda SPND è direttamente collegata alla grandezza che s'intende misurare, φ , a mezzo della sensibilità spettrale del materiale sensibile, parametro che può essere caratterizzato a priori, perché caratteristica specifica dello strumento. È evidente, quindi, che il valor misurato di corrente porta informazioni anche dello spettro neutronico che lo ha prodotto. Questa caratteristica, opportunamente sfruttata, può dar luogo alla possibilità –sfruttando le sensibilità spettrali caratteristiche di diversi materiali sensibili esposti al medesimo flusso neutronico– di ricostruire il flusso neutronico da misure combinate con diversi SPND, applicando una deconvoluzione “parallela”. La formulazione teorica sarà spiegata nel paragrafo seguente.

La ricostruzione spettrale appena suggerita necessita che siano caratterizzate preliminarmente le sensibilità spettrali, $S(E)$, che –come detto– sono caratteristiche specifiche degli strumenti. Sfruttando il modello del rivelatore descritto in §2.1.2, e la suddivisione del range energetico suggerita in Tabella 3, mediante il codice MCNPX sono state ricavate le caratteristiche dette, che sono riportate graficamente come segue:

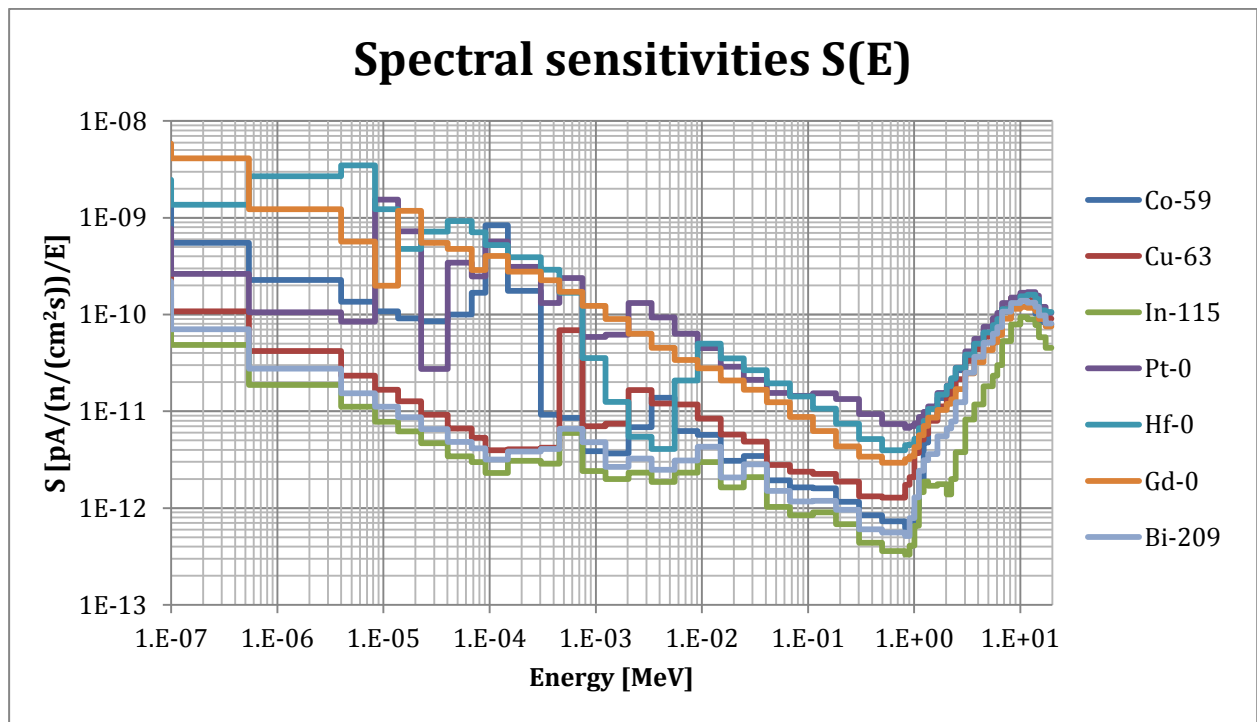



Figura 18 - Sensibilità spettrali delle sonde SPND secondo il modello geometrico esplicitato in §2.1.2, alimentate con i diversi materiali sensibili analizzati nel corso di questo rapporto.

Risulta evidente che:

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 - 123	0	L	38	47

- al fine di poter ottenere dei valori di corrente significativi in output ai SPND, sono necessari flussi neutronici di entità notevoli $>10^{11}-10^{12}$ n/(cm² s), a seconda delle fasce energetiche monitorate;
- seguendo gli andamenti delle sensibilità spettrali, ciascun materiale emettitore risulta sensibile in maniera differenziale in alcune finestre energetiche piuttosto che in altra, il che equivarrebbe a dire che potrebbe seguirne un'ottimizzazione finestre energetiche-materiali, utile a ricostruire lo spettro d'irraggiamento.

4.1 Basi teoriche per la valutazione dello spettro neutronico a partire da misure con SPND

L'equazione (4), presa in considerazione per $i=1\dots N$ materiali, risulta avere la struttura di un'equazione di Fredholm del primo tipo:

$$\begin{aligned}
 I_{(n,\gamma)}(i) &= C(i) \cdot \int_0^{\infty} S(m, E) \varphi(E) dE \\
 \tilde{I}_{(n,\gamma)}(i) &= \int_0^{\infty} S(i, E) \varphi(E) dE
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

dove:

(i) è il riferimento all' i -simo materiale;

$$\tilde{I}_{(n,\gamma)}(i) = I_{(n,\gamma)}(i) / C(i).$$

La seconda equazione della (5) presenta l'insieme della variabile i discreto mentre la variabile E è continua. Si impone, quindi, una discretizzazione della (5), che conduce – necessariamente– anche ad una discretizzazione della variabile E , al fine di ottenere un sistema di equazioni che abbia una soluzione determinata. Si considerino N sonde SPND, esposte allo stesso flusso neutronico, contenenti N materiali sensibili diversi e si abbiano W finestre energetiche in cui poter scomporre l'integrale in equazione (5). Per il generico rivelatore i , potrà scriversi

$$\tilde{I}_{(n,\gamma)}(i) = \sum_{j=1}^W S_{W_j}(i) \varphi_{W_j}
 \tag{6}$$

dove:

φ_{W_j} è il flusso neutronico nella finestra energetica W_j ;

S_{W_j} è la sensibilità del rivelatore nella finestra energetica W_j .

Scrivendo un sistema di equazioni in forma matriciale,

$$\begin{array}{ccccccc}
 \varphi_{W_1,1} S_{W_1,1} & \varphi_{W_2,1} S_{W_2,1} & \varphi_{W_3,1} S_{W_3,1} & \cdot & \varphi_{W_W,1} S_{W_W,1} & \tilde{I}_{(n,\gamma),1} \\
 \varphi_{W_1,2} S_{W_1,2} & \varphi_{W_2,2} S_{W_2,2} & \varphi_{W_3,2} S_{W_3,2} & \cdot & \varphi_{W_W,2} S_{W_W,2} & \tilde{I}_{(n,\gamma),2} \\
 \varphi_{W_1,3} S_{W_1,3} & \varphi_{W_2,3} S_{W_2,3} & \varphi_{W_3,3} S_{W_3,3} & \cdot & \varphi_{W_W,3} S_{W_W,3} & \tilde{I}_{(n,\gamma),3} \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 \varphi_{W_1,N} S_{W_1,N} & \varphi_{W_2,N} S_{W_2,N} & \varphi_{W_3,N} S_{W_3,N} & \cdot & \varphi_{W_W,N} S_{W_W,N} & \tilde{I}_{(n,\gamma),N}
 \end{array} \quad (7)$$


ovvero

$$\left[\begin{array}{c} S_W \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c} \varphi_W \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} I_{(n,\gamma)} \end{array} \right] \quad (8)$$

Per $W > N$ il sistema risulta indeterminato, quindi non esiste una soluzione univoca. Se $W \equiv N$, il sistema risulta determinato. La soluzione è –tuttavia– dipendente da come vengono selezionate le larghezze di banda delle W finestre. In ogni caso, la soluzione per $W \equiv N$ risulta

$$\left[\begin{array}{c} \varphi_W \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} S_W \end{array} \right]^{-1} \cdot \left[\begin{array}{c} I_{(n,\gamma)} \end{array} \right] \quad (9)$$

per cui dalla misura simultanea, nella stessa posizione, con N SPND collocati in un unico assembly, è possibile calcolare il flusso neutronico d'interesse spettralmente suddiviso in $W \equiv N$ finestre energetiche. La particolarità della soluzione numerica dipendente da come vengono selezionate le W finestre può essere risolta con una scelta opportuna di esse, attraverso algoritmi “intelligenti” che ottimizzino le finestre energetiche caso per caso.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 - 123	0	L	40	47

5. Proposta di sviluppo futuro di strumentazione dedicata per reattori LFR

Quanto esaminato nei precedenti lavori può riassumersi come segue:


- La camera a fissione Photonis CFUE32 è adatta a monitorare il reattore dall'avviamento fino a circa 0.1% della potenza nominale, ed esiste un problema di durabilità per potenze >10% della potenza nominale, perché l'elevata sensibilità "brucia" la camera troppo in fretta.
 Il massimo rateo di esposizione gamma obbliga lo strumento a dover essere allontanato dalla parte attiva del combustibile quando per potenze >0.1% della potenza nominale.
Sistemi di movimentazione durante il funzionamento del reattore si rendono necessari, così da seguire efficacemente e 'da vicino' l'avviamento di reattore, per poter poi rimuovere la sonda quando i limiti di flusso neutronico e gamma lo impongono.
 Una possibilità di ridurre la sensibilità delle camere a fissione e renderle più durevoli nel tempo sta nella variazione del materiale sensibile, la cui scelta potrebbe ricadere su un isotopo fissile avente una sezione d'urto di fissione (pesata sullo spettro neutronico) di valore inferiore rispetto all'²³⁵U.
- I Self Powered Neutron Detector presentano incapacità nel monitoraggio delle basse potenze, visto che la loro usabilità richiede almeno valori nell'ordine dei MW. Sono, tuttavia, strumenti molto robusti, completamente a stato solido, e non richiedono una alimentazione elettrica per poter operare. Con qualche accorgimento, quindi, si può pensare di utilizzare questo strumento per monitorare il reattore agli alti livelli di potenza, vista anche la durabilità nel tempo.

Il monitoraggio del reattore dalla potenza zero fino a circa il 10% della potenza nominale (cioè fino a 300 kW_{th}) può esser realizzato efficacemente con camere a fissione in-vessel commercialmente disponibili. Oltrepassando questo valore di potenza, gli strumenti devono essere riposizionati ed allontanati dal combustibile.

Esiste una criticità significativa per il monitoraggio neutronico del reattore alla potenza nominale (300 MW_{th}), poiché allo stato attuale non esiste una strumentazione in-vessel provata che sia in grado di monitorare efficacemente gli elevati flussi neutronici in gioco, con tempi di dismissione dello strumento compatibili con le tempistiche del ciclo del combustibile.

I SPND si dimostrano essere una tecnologia molto adatta al controllo del reattore ALFRED nel regime di potenza nominale, ma mai nessun SPND-pronto è stato testato a tale scopo, al fine di stabilire se –effettivamente– tali sonde possano essere adeguate ad attivare le funzioni di sicurezza di un reattore veloce.

Modifiche alla strumentazione SPND corrente, confortate da esperienza sperimentale, possono essere effettuate, al fine di raggiungere i detti obiettivi di monitoraggio del reattore. È chiaro che l'ottimizzazione precisa degli strumenti dipenderà anche dalla strategia di controllo che esigenze neutroniche o obiettivi di sicurezza richiedono.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 - 123	0	L	41	47

5.1 Proposta di sonde basate su SPND

I SPND a risposta pronta possono rivestire un ruolo chiave nei reattori LFR. Nei reattori LFR, il campo di radiazione gamma (che naturalmente si accompagna alla fissione e al decadimento dei prodotti di fissione) è intrinsecamente attenuato dal piombo stesso, pertanto il campo di radiazione che interagisce con lo strumento di misura è costituito per lo più dal flusso neutronico. In termini numerici, questa constatazione vuol significare che si riduce il valor minimo del segnale di corrente statisticamente significativo, e ciò va ad ampliare la finestra di applicazione della sonda, che può essere in grado di monitorare anche regimi di potenza inferiori e, più efficacemente, il range di potenza nominale.

Nelle installazioni in vicinanza del combustibile, si è riscontrato, -difatti- un maggiore flusso gamma rispetto alle posizioni 'più lontane', comparabile con l'entità del flusso neutronico: sono da non preferire, quindi, le installazioni di questo tipo, per contenere il disturbo alle sonde in misura. Alternativamente, possono prevedersi sistemi e tecniche di misura del contributo gamma al fine di sottrarlo alla risposta 'lorda' degli strumenti ed ottenere la sola risposta neutronica.

Ottimizzazioni dei SPND in termini di sensibilità possono essere ottenute:

- variando le masse dei materiali sensibili di cui è fatto l'emettitore, utilizzando quindi sonde più lunghe o di diametro maggiore;
- utilizzando fasci di strumenti in parallelo, preservando le dimensioni del singolo strumento;
- utilizzando materiali innovativi diversi da quelli tradizionalmente¹ usati;
- verificando le prestazioni di nuovi layout delle sonde diversi dalla tradizionale geometria a cilindro coassiale.

In questo lavoro si è preferito assumere le caratteristiche geometriche tipiche degli SPND (§2.1.2), concentrandosi sull'analisi di:

- burn-up ed accumulo di prodotti di reazione a valle di irraggiamento in spettri neutronici veloci;
- risposta dinamica e prontezza di rivelazione delle variazioni di flusso neutronico;
- materiali sensibili diversi da quelli convenzionali.

5.2 Concettualizzazione di una sonda basata su SPND per misure integrali e spettrali di flussi neutronici veloci

L'idea concettuale proposta nell'annualità precedente riguardo uno strumento costituito da un assembly di SPND, è stata rivisitata come segue.

¹ I materiali comunemente usati per i SPND sono ottimizzati per l'uso in reattori LWR. L'esigenza di monitoraggio di flussi neutronici veloci con tali strumenti può eleggere nuovi materiali sensibili che diano migliori prestazioni nelle condizioni dette.

L'obiettivo iniziale di un assembly di rivelatori di medesimo tipo all'interno di un unico strumento di misura era quello di incrementare la statistica del segnale rivelabile (a seconda delle posizioni di installazione), assumendo anche la ridondanza locale come dispositivo di sicurezza.

La proposta corrente conserva le caratteristiche di sicurezza della ridondanza, ma presuppone l'utilizzo di SPND alimentati con materiali diversi, al fine di poter applicare la procedura matematica delineata in §4.1, al fine di ottenere dalla sonda anche informazioni spettrali riguardo il flusso neutronico monitorato.

Con riferimento alla Figura 19, si è pensato di costruire l'assembly con 7 SPND, alimentati con i materiali sensibili precedentemente analizzati: ^{59}Co , ^{190}Pt , ^{63}Cu , ^{190}Hf , ^{115}In , ^{209}Bi e ^{150}Gd . Come mostrato in Figura 18, ciascuno presenta una propria caratteristica spettrale in merito alla corrente rivelabile, a seconda dello spettro neutronico incidente sulla sonda.

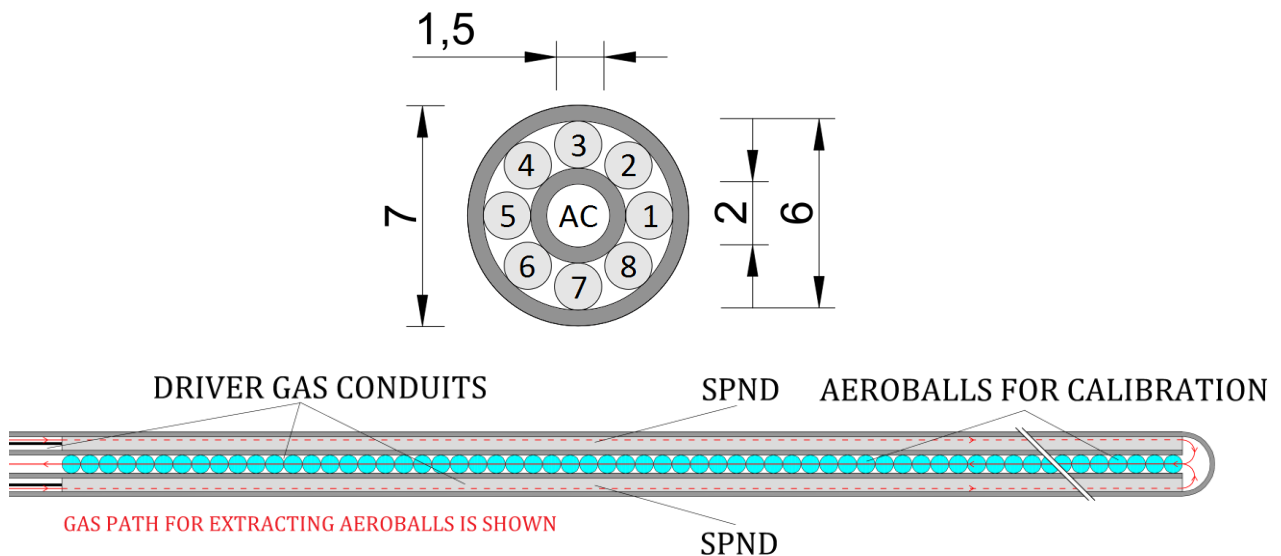


Figura 19 - Struttura della sonda in-core proposta, costituita da 8 SPND disposti radialmente attorno ad un canale centrale ricavato per la taratura della sonda stessa mediante attivazione neutronica di opportuno materiale. Tutte le dimensioni sono in [mm].

Nelle condizioni d'irraggiamento specificate in §2.1.1, ciascun SPND misurerà un segnale di corrente proprio, legato unicamente alla forma che assume la sua curva $S(E)$ in Figura 18.

	Corrente rivelata nelle condizioni d'irraggiamento in §2.1.1 [pA]
^{59}Co	14.19
^{190}Pt	23.52
^{63}Cu	13.38
^{190}Hf	19.66
^{115}In	3.45

²⁰⁹ Bi	13.33
¹⁵⁰ Gd	9.43

Tabella 18 - Corrente rivelata (risposta ai soli neutroni) per singolo SPND nelle condizioni d'irraggiamento in §2.1.1 in TAPIRO.

Conoscendo le sensitività integrali di ciascun SPND, $S[pA/(n/(cm^2 s))]$ (derivabili sperimentalmente dalla taratura degli strumenti mediante una misura assoluta di flusso, ad esempio mediante attivazione neutronica), dai valori in Tabella 18 si ottiene una misura quantitativa del flusso neutronico integrale che ha originato la risposta misurata.

A partire dalle misure di corrente per singolo SPND (Tabella 18) risulta possibile, inoltre, iniziare il procedimento di *unfolding* matematico dello spettro neutronico che ha originato i segnali di corrente, come teorizzato in §4.1. Avendo N=7 materiali sensibili diversi, il procedimento di *unfolding* matematico presenta soluzione determinata se vengono selezionate W=7 finestre energetiche in cui condensare l'insieme continuo della variabile energia, E.

Come detto, tuttavia, la soluzione del sistema lineare proposto è numericamente dipendente da come si scelgono le larghezze delle W finestre energetiche. Con riferimento alla Figura 18, le sensitività spettrali $S(E)$ sono state calcolate, attraverso MCNPX, in 49 gruppi energetici, secondo la classificazione in Tabella 3. Selezionare la migliore condensazione possibile da 49 a 7 gruppi energetici al fine di rendere il sistema di equazioni (9) compatibile e determinato, richiede un'analisi comparata e contemporanea di tutte le possibili combinazioni:

$$\tilde{I}_{(n,\gamma)}(i) = \sum_{j=1}^W S_{W_j}(i) \phi_{W_j}$$

che condurrebbero ai segnali di corrente misurati.

Una procedura di selezione ed ottimizzazione delle larghezze delle 7 finestre energetiche è stata implementata in un algoritmo matlab, che opera come segue:

1. calcolo di tutte le possibili combinazioni delle larghezze delle 7 finestre energetiche in cui suddividere lo spettro;
2. condensazione delle sensitività spettrali (per tutti i materiali) in tutte le combinazioni individuate al punto precedente;
3. risoluzione del sistema lineare (9) per tutte le combinazioni individuate;
4. analisi in frequenza della matrice dei risultati di flusso neutronico al fine di individuare le distribuzioni spettrali e le suddivisioni del range energetico più verosimili.

Il detto algoritmo è ancora in fase di sviluppo ed ottimizzazione.

I primi risultati della sua applicazione a partire dai dati disponibili in Tabella 18 sono presentati di seguito.

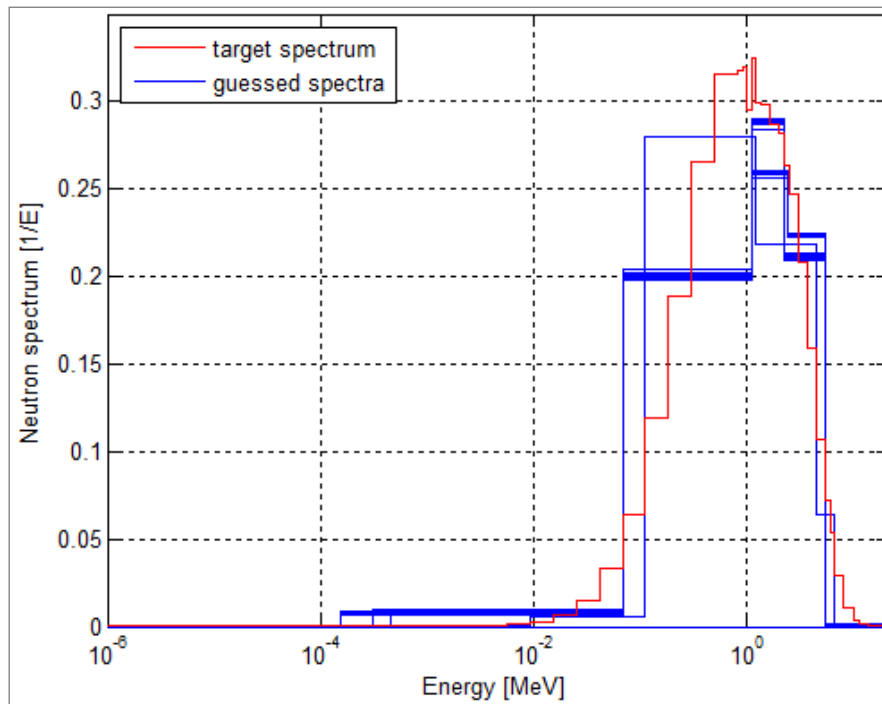



Figura 20 - Risultati dell'algorithm di unfolding realizzato in Matlab, a partire dalle correnti misurate dai 7 SPND in Tabella 18.

Sebbene l'algorithm detto sia ancora in fase di sviluppo, i risultati preliminari mostrano l'effettiva possibilità di misurare sperimentalmente, con i SPND-pronti, anche la qualità energetica del flusso neutronico nella posizione di installazione.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 - 123	0	L	45	47

6. Conclusioni

Nel presente lavoro si è studiata in dettaglio l'applicazione di SPND-pronti alla misura integrale e spettrale di flussi neutronici veloci, analizzando:

- burn-up ed accumulo di prodotti di reazione a valle di irraggiamento in spettri neutronici veloci;
- risposta dinamica e prontezza di rivelazione delle variazioni di flusso neutronico;
- materiali sensibili diversi da quelli convenzionali;
- il disegno di una sonda costituita di un assembly di SPND che consenta misure integrali e spettrali di flussi neutronici veloci.


Lo studio si orienta verso il progetto del reattore LFR ALFRED, con attenzione particolarmente rivolta a tematiche di strumentazione e controllo. Come mostrato nelle precedenti annualità, vi è la necessità di provvedere a condurre ulteriori studi circa la strumentazione da applicare al reattore, perché quella commercialmente disponibile al momento risulta applicabile, ma non completamente adeguata. In particolare il monitoraggio della potenza nominale in posizioni vicine al nocciolo, in-core e out-of-core richiede miglioramenti della strumentazione da applicare, di cui la tecnologia unicamente utilizzabile sembra essere quella degli SPND-pronti.

I SPND-pronti si dimostrano, tecnologicamente, strumenti semplici, efficaci, resistenti e sicuri per il monitoraggio della potenza nominale; sono da investigare, tuttavia, ottimizzazioni di tali strumenti per le condizioni di reattore LFR, al fine di ottenere migliori prestazioni in termini di rapporto segnale/rumore nel range delle alte potenze.

In particolare, non esiste una provata esperienza operativa di tale classe di strumenti, il che rende il campo della R&D fertile in tale direzione. Il reattore TAPIRO di ENEA Casaccia può risultare una possibilità concreta di test di sonde commercialmente disponibili o prototipi innovativi, al fine di colmare la mancanza di dati sperimentali. Tale studio sarebbe funzionale alla verifica dell'applicabilità della tecnologia detta ai reattori veloci di tipo LFR (o, più in generale, l'intera classe dei reattori veloci), nonché di enorme ausilio allo sviluppo di disegni innovativi ai fini della realizzazione di nuovi prototipi.


Ringraziamenti

Si ringrazia il Dott. Mario Carta per la preziosa collaborazione ed il sempre valido consiglio. Si ringraziano i tecnici di ENEA\UTICT, ed in particolare l'Ing. Guido Guarnieri per il supporto costantemente fornito alla risoluzione dei problemi legati all'installazione ed al corretto funzionamento dei codici di calcolo sull'infrastruttura CRESCO4.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 - 123	0	L	46	47

Bibliografia

- [1] L. Lepore, R. Remetti e M. Cappelli, «Studio di fattibilità di sonde per la misura dei flussi neutronici di un reattore LFR - Concettualizzazione di test sperimentali nel reattore TAPIRO,» ENEA, 2013.
- [2] L. Lepore, R. Remetti e M. Cappelli, «Verifica di fattibilità di sonde commerciali per la misura dei flussi neutronici in reattori raffreddati al piombo. Proposta di studio teorico-sperimentale di SPND innovativi ottimizzati per reattori LFR.,» 2014.
- [3] M. Angelone, A. Klix, M. Pillon, P. Batistoni, U. Fischer e A. Santagata, «Development of self-powered neutron detectors for neutron fluxmonitoring in HCLL and HCPB ITER-TBM,» *Fusion Engineering and Design*, vol. 89, p. 2194–2198, 2014.
- [4] R. Bove, “Nuclear Research Reactor: TAPIRO,” [Online]. Available: http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/nucleare/TAPIROBove.pdf.
- [5] G. Bignan, J. Guyard, C. Blandin e H. Petitcolas, «Direct Experimental Tests and Comparison between Sub-miniature Fission Chambers and SPND for Fixed In-core Instrumentation of LWR,» in *In-core instrumentation and core assessment*, Mito-shi, Japan, 14-17 October, 1996.
- [6] S. Guru e D. Wehe, «INSTANTANEOUS FLUX MEASUREMENTS USING THE BACKGROUND SIGNAL OF THE RHODIUM SELF-POWERED NEUTRON DETECTOR,» *Annals of Nuclear Energy*, vol. 19, n. 4, pp. 203-215, 1992.
- [7] C. Blandin e S. Breaud, «Selective and prompt self-powered neutron detectors for characterization of mixed radiation fields in reactors,» in *Reactor Dosimetry: Radiation Metrology and Assessment*, Philadelphia, Jan 2001.
- [8] W. Todt, «Characteristics of Self-powered Neutron Detectors Used in Power Reactors,» in *In-core instrumentation and core assessment*, Mito-shi, Japan, , 14-17 October, 1996.
- [9] T. Seidenkranz, K. Bohme, U. Kagemann, R. Maletti e H. Stein, «EXPERIENCES WITH PROMPT SELF-POWERED DETECTORS IN NUCLEAR REACTORS OP WWER TYPE,» [Online]. Available: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/18/009/18009870.pdf. [Consultato il giorno agosto 2016].
- [10] E. Bubelis, K. Mikitjuk, W. Hering and A. Alemberti, “PLANT DATA FOR THE SAFETY ANALYSIS OF THE ETDR (ALFRED),” 2012.
- [11] F. Manni, L. Mansani and A. Alemberti, “DESCRIPTION, FUNCIONAL SIZING AND DRAWING OF THE MAIN COMPONENTS OF THE ETDR CONTROL AND SHUTDOWN RODS,” 2013.
- [12] J. C. Gauthier, G. Granget e M. Martini, «Techniques de mesures neutroniques au demarrage de SPX2,» in *Proceedings of a Specialists' Meeting on IN CORE INSTRUMENTATION AND REACTOR ASSESSMENT*, Cadarache, 1989.
- [13] J. C. Perrigreur, C. Berlin, J. C. Gauthier e J. Gourdon, «In core neutronic measurements in an industrial environment. Assessment of the performances of the in-vessel neutronic measurements chains of SUPER-PHENIX 1,» in *Proceedings of the Specialists' Meeting on IN CORE INSTRUMENTATION AND REACTOR ASSESSMENT*, 1989.
- [14] J. C. Nervi, P. Marmonier, A. Eyraud, J. C. Perrigreur, P. Rouches e L. Verset, «Experimental Devices used for Start-up Operations of the SUPER-PHENIX core,» in *International Conference*, Richland, USA, 1987.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 - 123	0	L	47	47

Workgroup

Luigi Lepore (UNIROMA1)

Nato a Napoli il 12 maggio 1987, consegue la laurea triennale in Ingegneria Energetica presso “La Sapienza” nel novembre 2010 con il massimo dei voti. Proseguendo alla magistrale nell’indirizzo nucleare, consegue il titolo nell’ottobre 2012 con il massimo dei voti. Vincitore del bando n°1/2013 SBAI-Sapienza relativamente all’attività di ricerca “Caratterizzazione radiometrica di barrette di combustibile nucleare per reattori veloci”, nel marzo 2013 inizia la sua attività di collaborazione con l’università “La Sapienza”. Vincitore della borsa di dottorato “Energia e Ambiente”, 29° ciclo, inizia nel novembre 2013 una collaborazione con il Laboratorio UTFISST-MEPING di ENEA Casaccia terminato ad agosto 2015. È abilitato all’esercizio della professione di Ingegnere.

Romolo Remetti (UNIROMA1)

Romolo Remetti ha conseguito la laurea in Ingegneria Nucleare nel 1982 e, successivamente, il Dottorato di Ricerca in Energetica. È abilitato all’esercizio della professione di Ingegnere ed è Esperto Qualificato di 3° grado. È Ricercatore Confermato nel SSD ING-IND/20 (Misure e Strumentazione Nucleare) e Professore Aggregato di ‘Misure e Caratterizzazione di Materiali Nucleari’ e di ‘Radioprotezione’, per il Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica dell’Università La Sapienza di Roma. È autore di più di cento pubblicazioni scientifiche.

Mauro Cappelli (ENEA)

Ricercatore ENEA, è stato responsabile del Laboratorio di Metodi di Progettazione e Ingegneria Sperimentale (MEPING) presso ENEA\UTFISST, Centro Ricerche ENEA Casaccia. Laureato in Ingegneria Elettronica, ha un PhD in Ingegneria Elettronica e un MSc in Nuclear Safety and Security. Attualmente svolge attività di ricerca presso il Centro Ricerche ENEA di Frascati, all’interno del Laboratorio FSN-FUSPHY-SCM.