

Il ruolo dei reattori di ricerca ENEA per l'aerospazio

Nello scenario delle infrastrutture per la ricerca nazionali e internazionali, i reattori di ricerca TRIGA RC1 e RSV TAPIRO rappresentano una sorgente molto importante di neutroni e di radiazione gamma e sono stati ampiamente utilizzati per irraggiamenti di componenti elettronici nel campo dell'aerospazio. A seguito dell'Accordo di Collaborazione ASIF (ASI Supported Irradiation Facilities) firmato nel 2017 da ASI, ENEA ed INFN per definire un programma comune di analisi del danneggiamento di componenti elettronici, utilizzando fasci di neutroni e raggi gamma, i reattori nucleari ENEA sono tra le installazioni presenti nel progetto e sono stati qualificati come facility supportate da ASI.

DOI 10.12910/EAI2021-088

di Luca Falconi e Alfonso Santagata - *Laboratorio Reattori Nucleari di Ricerca - Reattori Nucleari di Ricerca TRIGA RC-1 e RSV TAPIRO (*)*

L'industria è fortemente coinvolta nella progettazione e realizzazione di vettori per impegnative missioni aerospaziali che richiedono grande autonomia energetica, sistemi di navigazione e sofisticate apparecchiature per l'esecuzione di esperimenti scientifici e tecnologici. In generale, nel corso di queste missioni, sia i sistemi per la generazione di energia che tutta la strumentazione presente a bordo sono soggetti a interazioni con campi di particelle ad alta energia presenti nei diversi strati attraversati durante il volo orbitale o interplanetario. Queste particelle cariche 'intrappolate' nelle fasce generate dal campo magnetico terrestre, rappresentano un problema concreto per la componentistica di questi apparati, più che il vento solare e la radiazione cosmica.

Le missioni spaziali hanno durate sempre maggiori e per questo motivo occorre verificare l'entità del danno che può accumularsi nel tempo, per effetto di una somma di eventi. Inoltre potrebbe aumentare sensibilmente la probabilità

di interagire con particelle di così elevata energia al punto di poter registrare un danno anche a causa di un singolo evento. Il problema ha un'importanza significativa anche per la progettazione, poiché se la realizzazione di schermi potrebbe in parte ridurre l'entità del problema, di contro essa pone serie limitazioni per l'incremento del peso del vettore che comporta un aumento del fabbisogno energetico. La progettazione degli schermi, deve, inoltre, tener conto del danneggiamento dovuto alle particelle generate dalle reazioni che la radiazione primaria ha con il materiale di cui è costituito lo schermo stesso.

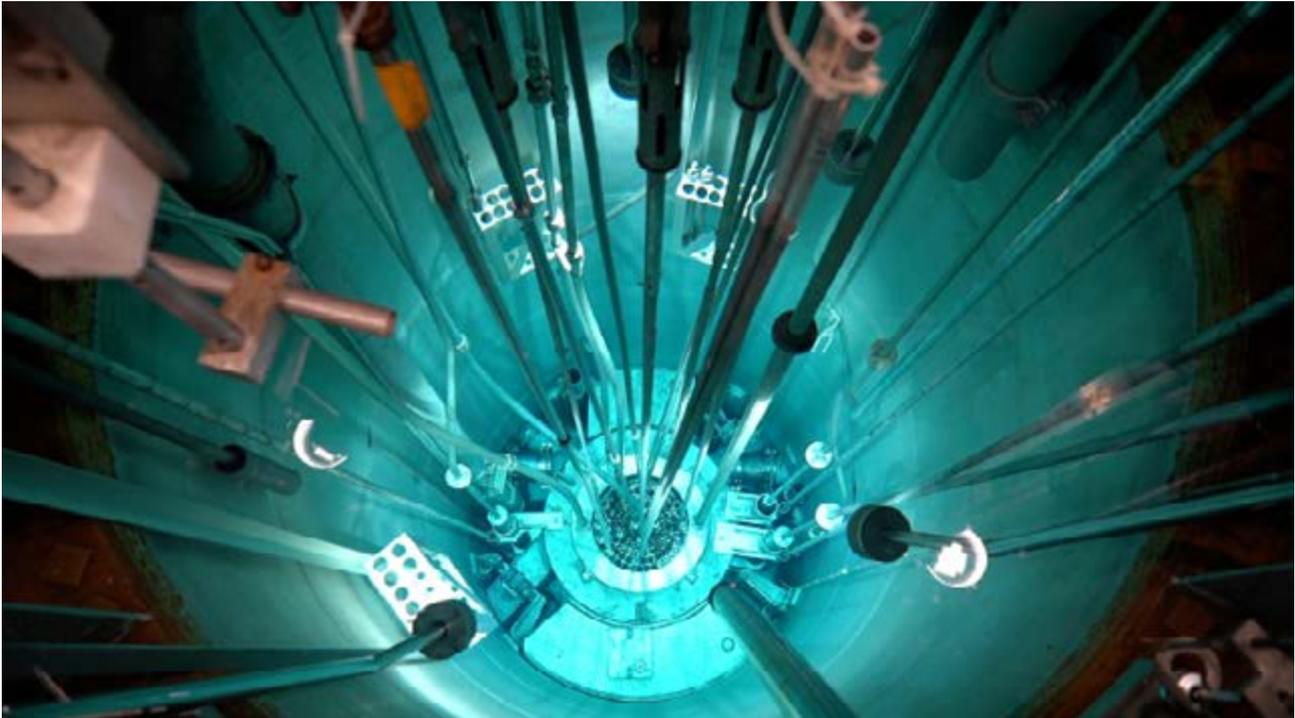
Prevedere il degrado dei componenti

La disponibilità di installazioni e di metodologie con cui eseguire irraggiamenti che siano rappresentativi di ciò che può avvenire nei viaggi interplanetari, è un elemento significativo per progettare componenti, inclusa tutta la microelettronica per l'aerospazio, sui

quali vengono rilasciate elevate quantità di radiazione cercando di prevederne il degrado nella performance.

Il danneggiamento di un materiale, nella fattispecie di un semiconduttore, avviene quando l'interazione con un campo di particelle o con raggi gamma è in grado di provocare delle dislocazioni degli atomi della struttura cristallina, oppure la sua ionizzazione o trasmutazione, compromettendone la funzionalità.

Le sorgenti di neutroni, quali i reattori nucleari a fissione, sono capaci di garantire flussi elevati e variabilità nello spettro energetico, con un'energia cinetica media pari a 1 MeV (circa $1.59 \cdot 10^{-13}$ joule) e un intervallo energetico che va dal campo termico (neutroni con energia di 0.025 eV) a quello veloce (neutroni con energia superiore a 1 keV), e potrebbero essere utilmente impiegate per il danneggiamento di dispositivi a semiconduttore. È un dato consolidato che neutroni di alta energia inducono eventi di dislocazione atomica, contro una bassa ionizzazione totale del materiale. Ciò



Pozzo reattore impianto TRIGA RC-1

significa che le sorgenti di neutroni di interesse potrebbero essere caratterizzate per la determinazione della dose NIEL (Non Ionizing Energy Loss). Nella caratterizzazione di un flusso neutronico si osservano le indicazioni dell'American Society for Testing and Materials (ASMT), per l'identificazione di parametri rappresentativi della capacità di danneggiamento da parte di un campo di particelle. Il primo di questi parametri è il valore del flusso equivalente di neutroni con energia pari a 1 MeV – definito $\Phi_{\text{eq}1\text{MeV, mat}}$, cioè il flusso di particelle aventi la stessa energia (neutroni monocromatici) capace di produrre un danno equivalente a quello della radiazione disponibile in una sorgente di neutroni come, per esempio, in un reattore nucleare a fissione. L'interazione tra il materiale e la radiazione incidente è rappresentata dalla funzione di danneggiamento $F_{D,g}^{(m)}$, legata al KERMA, ovvero all'energia cinetica trasferita dalle particelle al mezzo, per la quale

è importante conoscerne il valore per l'energia incidente di 1 MeV. Impostando l'equivalenza degli effetti tra la radiazione monocromatica e quella di una distribuzione energetica (spettro), è possibile calcolare $\phi_{\text{eq}}(r, 1\text{MeV})$, che è la prima grandezza utile per la caratterizzazione del nostro flusso di neutroni. Un ulteriore indicatore, suggerito dallo standard ASTM, è il parametro di durezza, solitamente indicato con $H(r)$, funzione della posizione all'interno del campo stesso. Esso rappresenta il rapporto tra il flusso totale del campo di particelle con un certo spettro energetico e quello di riferimento ed è un indice della capacità di provocare danneggiamento. Entrambi i parametri permettono di confrontare diversi campi di radiazione, come quelli presenti in diversi reattori, in modo da stabilirne un indice di efficacia rispetto alla capacità di indurre danneggiamento su un determinato componente. Presupposto essenziale per la quantificazio-

ne di detti parametri è la conoscenza dettagliata dello spettro neutronico di un determinato campo di radiazione.

I reattori nucleari di ricerca TRIGA RC1 e RSV TAPIRO

I reattori nucleari di ricerca dell'E-NEA TRIGA RC1 e RSV TAPIRO dispongono di diversi canali e posizioni di irraggiamento sia in prossimità del nocciolo che in posizioni più distanti. Pertanto, sono in grado di fornire flussi neutronici di energia (spettro) e di intensità variabili. Il TRIGA RC1 è un reattore termico a piscina dotato di un nocciolo caricato con combustibile a basso arricchimento in ^{235}U . I flussi neutronici vanno dal campo termico a quello epitermico con una piccola coda veloce, ma essenzialmente il contributo maggiore è fornito dai neutroni con energie nel campo termico. Le posizioni di irraggiamento consen-

tono di avere intensità di flusso fino a $2 \cdot 10^{13} \text{ ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Il reattore RSV TAPIRO è un reattore a spettro veloce, dotato di un nocciolo con ^{235}U ad alto arricchimento che gli conferiscono caratteristiche uniche dal punto di vista spettrale. In particolare, nella posizione corrispondente al centro del nocciolo, il reattore è in grado di fornire un flusso di neutroni con uno spettro simile a quello di fissione con un'energia media pari a 1MeV e un'intensità pari a $10^{12} \text{ ncm}^{-2}\text{s}^{-1}$. Nei vari canali radiali è parimenti in grado di fornire alte intensità accoppiate a uno spettro epitermico. Tale reattore, date le sue caratteristiche, è spesso scelto per l'irraggiamento di componenti elettronici dedicati all'industria aerospaziale. Nel recente passato, è stato utilizzato per irraggiamenti di componenti in silicio destinati all'aerospazio per verificarne la suscettibilità rispetto ad un campo di neutroni, ovvero ne è stato valutato il deterioramento. Sono previsti, entro la fine del 2021, irraggiamenti di vele solari, costituite da Kapton, quest'ultimo eseguito in collaborazione con i colleghi del dipartimento DTE-PCU-IPSE dell'ENEA.

L'utilizzo dei reattori TRIGA RC1 e RSV TAPIRO nel campo dell'aerospazio non costituisce una novità. Nel passato sono stati ampiamente utilizzati per irraggiamenti di componenti elettronici. Recentemente, nel 2017, ASI, ENEA ed INFN hanno firmato un Accordo di Collaborazione, (2017-22-HD.0 ASI-ENEA, 2017-15-HD.0 ASI-INFN), denominato ASIF (ASI Supported Irradiation Facilities) al fine di definire un programma comune per l'analisi del danneggiamento di componenti elettronici utilizzando fasci di neutroni e raggi gamma. I reattori nucleari di ricerca dell'ENEA, insieme al Calliope, FNG, Rex e Top Implart, sono tra le installazioni presenti nel progetto e, quindi, qualificate come **facility supportate da ASI. Il progetto**

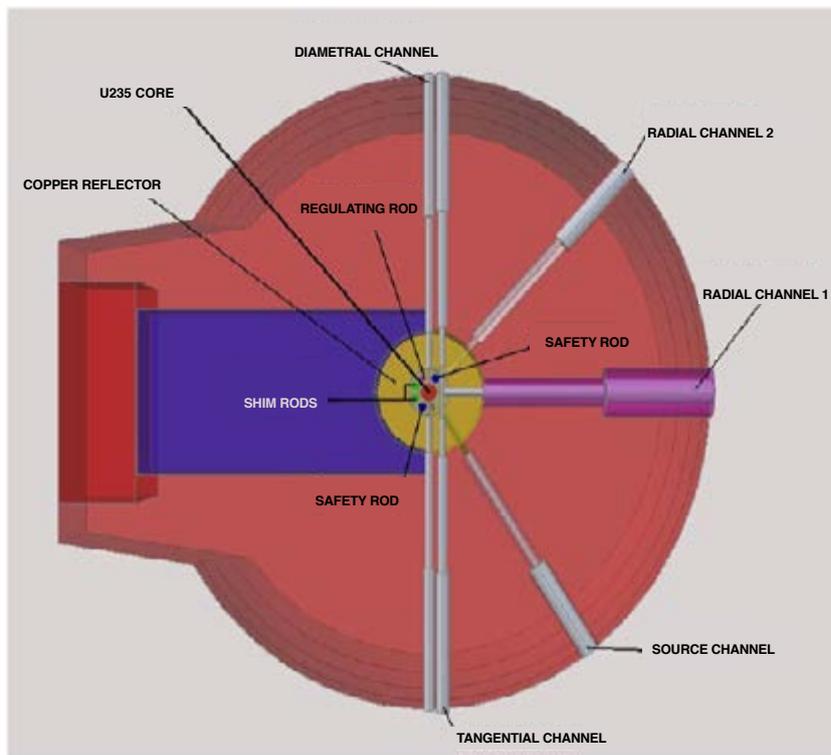
prevede anche la creazione di un portale, dedicato a tutte le aziende che operano nel settore aerospaziale, che possano avere la necessità di accedere a una delle facility per l'esecuzione di irraggiamenti permettendo ad ogni singolo stakeholder di verificare la disponibilità di tempo macchina.

Campagne sperimentali

Nel corso del 2018, il reattore TRIGA RC1 è stato protagonista di diverse campagne sperimentali che hanno permesso la caratterizzazione di due suoi canali di irraggiamento: la LAZY SUSAN, o rastrelliera girevole, e il Canale Centrale. Nelle stesse posizioni sono state realizzati diversi irraggiamenti di dosimetri NIEL. Nel corso del 2022, sempre in ambito ASIF, verrà completata la caratterizzazione dei ca-

nali sperimentali dei due impianti scelti per gli irraggiamenti di componenti per l'aerospazio.

Nella fattispecie, entrambi i reattori presentano valori interessanti sia per quanto riguarda il flusso 1MeV equivalente che per il parametro di durezza. E' chiaro che i suddetti parametri presentano valori diversi in funzione del canale sperimentale o della posizione di irraggiamento scelta. D'altro canto, ogni campione caratterizzato da forma, peso e stato di aggregazione che possa differire dagli altri campioni, potrà essere irraggiato solo in alcune posizioni del reattore, sia per ragioni di ingombro che per il rispetto delle prescrizioni tecniche per l'esercizio dell'impianto. Il reattore TRIGA RC1 fornisce il valore massimo per $\phi_{eq}(r, 1 \text{ MeV})$ pari a $5 \cdot 10^{17}$ neutroni per cm^2 in un irraggiamento di 5 ore e un valore corrispondente del parametro di durezza uguale a 0.35.



Sezione orizzontale reattore TAPIRO

Il reattore RSV TAPIRO, date le sue caratteristiche fondamentali, è in grado di assicurare un valore massimo di $\phi_{0,1}(r,1MeV)$ pari a $1.14 \cdot 10^{16}$ neutroni per cm^2 in un irraggiamento di 5 ore e corrispondentemente un valore di $H(r)$ pari a 0.55 [4][5]. Entrambe le facilities rappresentano una sorgente importantissima di neutroni e di radiazione gamma, sia nello scenario delle infrastrutture per la ricerca nazionali che in quello internazionale [1]. Il TRIGA RC1, che offre la massima

potenza termica di operazione di 1 MW, rappresenta la più grande potenza nucleare installata in Italia e tra le più alte tra tutti i TRIGA europei. Il reattore RSV TAPIRO è unico ed è il solo reattore a spettro veloce presente nell'Europa Occidentale, rappresentando di conseguenza un punto di riferimento irrinunciabile per tutte le realtà che operino nel campo del danneggiamento indotto da radiazione.

(*) Barbara Bianchi, Matteo Cesaroni, Valentina Fabrizio, Davide Formenton, Maria Grazia Iorio, Monica Lammaro, Pierpaolo Ricci, Antonino Ratto, Andrea Roberti, Luigi Lepore - ENEA, Laboratorio Reattori Nucleari di Ricerca - Reattori Nucleari di Ricerca TRIGA RC-1 e RSV TAPIRO

Per info: luca.falconi.1@enea.it

BIBLIOGRAFIA

1. Research Reactors for the Development of Materials and Fuels for Innovative Nuclear Energy Systems, no. NP-T-5.8 in Nuclear Energy Series, International atomic energy agency, Vienna (2017)
2. American Society for Testing and Materials (ASTM), "Standard Practice for Characterizing Neutron Fluence Spectra in Terms of an Equivalent Monoenergetic Neutron Fluence for Radiation-Hardness Testing of Electronics", E722 – 09, August 2009.
3. D.Chiesa et altri Characterization of TRIGA RC-1 neutron irradiation facilities for radiation damage testing Eur. Phys. J. Plus (2020) 135:349 <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-020-00334-7>
4. M.Carta, K.W. Burn, P. Console Camprini, S.Dulla, V.Fabrizio, L.Falconi, P.Ravetto, A.Santagata TAPIRO fast spectrum research reactor for neutron radiation damage analyses - Proceedings of the IGORR Conference (2017)
5. M. Carta, L.Falconi, V.Fabrizio, M.Palomba, E.Santoro "Preliminary study for the utilization of the TRIGA RC-1 research reactor as a facility for radiation damage" - Proceedings of the IGORR Conference (2018)