



Ricerca di Sistema elettrico

Studio delle interazioni tra combustibile, prodotti di fissione, e refrigerante in sistemi LFR

E. Macerata, M. Mariani, M. Cerini, Stefano, M. Cervino, M. Giola



STUDIO DELLE INTERAZIONI TRA COMBUSTIBILE, PRODOTTI DI FISSIONE E REFRIGERANTE IN SISTEMI LFR

E. Macerata, M. Mariani, M. Cerini, Stefano, M. Cervino, M. Giola (CIRTEN – POLIMI)

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

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV Generazione"

Responsabile scientifico ENEA: Mariano Tarantino

Responsabile scientifico CIRTEN: Giuseppe Forasassi

Titolo
STUDIO DELLE INTERAZIONI TRA COMBUSTIBILE, PRODOTTI DI FISSIONE E REFRIGERANTE IN SISTEMI LFR
Ente emittente Politecnico di Milano (CIRTEN)

PAGINA DI GUARDIA

Descrittori

Tipologia del documento: Rapporto Tecnico
Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE su sicurezza nucleare e reattori di IV generazione
Argomenti trattati: Generation IV reactors, Combustibile nucleare, Prodotti di fissione

Sommario

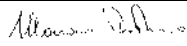
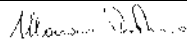
Nell'ambito delle attività dedicate allo sviluppo dei reattori veloci di IV generazione refrigerati a piombo, ancora molto poco si conosce circa le interazioni chimiche tra combustibile, guaina e refrigerante in seguito a fessurazione della guaina o di un evento incidentale severo. Si è pertanto proseguito nello studio della compatibilità chimica tra i diversi componenti del reattore, principalmente nell'individuazione degli strumenti più idonei per sviluppare un approccio teorico della problematica e gettando le basi per una attività sperimentale complementare. In particolare, l'attività svolta da POLIMI in questa annualità ha continuato l'aggiornamento, con nuovi dati stimati, del database di dati termodinamici necessario per l'analisi termodinamica del sistema *fuel-coolant* e ha individuato il codice OpenCalphad come alternativa da valutare per effettuare tale tipo di analisi su sistemi complessi quale il sistema *fuel-cladding-coolant*, al fine di superare le limitazioni evidenziate dal codice in uso. La valutazione della solubilità degli elementi di interesse in piombo fuso rimane un aspetto ancora da migliorare in quanto i valori calcolati col modello applicato sottostimano i valori sperimentali e talvolta non riproducono l'andamento riportato in letteratura. Infine, è stata avviata una collaborazione scientifica con JRC-Karlsruhe che ha consentito di svolgere attività sperimentale con composti del Pb contenenti U, al fine di ricavarne i relativi parametri termodinamici. Contemporaneamente, POLIMI sta procedendo nella realizzazione della facility sperimentale che consentirà di condurre una attività sperimentale parallela con composti del Pb non radioattivi.


Note

 Riferimento CIRTEN: **CERSE- POLIMI RL 1507/2016**
Autori:

Elena Macerata, Mario Mariani, Marta Cerini, Stefano, Matteo Cervino, Marco Giola


Copia n.
In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	26/09/16	NOME	M. Tarantino		M. Tarantino
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA	CONVALIDA	VISTO	APPROVAZIONE	

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 124	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 2	di 10
--	--	------------------	----------------------	------------------	-----------------


Indice

Sommario	3
1 Introduzione	4
2 Stima di grandezze termodinamiche mediante metodi computazionali	4
3 Composizione del sistema all'equilibrio termodinamico	5
4 Valutazione della solubilità in piombo liquido	6
5 Attività sperimentale	7
6 Conclusioni	7
Diffusione dei risultati	7
Riferimenti bibliografici	8
Curriculum gruppo di lavoro CIRTEN - PoliMI	9

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 124	Rev. 0	Distrib. L	Pag. di 3 10
--	--	------------------	----------------------	------------------------

Sommario

Nell'ambito delle attività dedicate allo sviluppo dei reattori veloci di IV generazione refrigerati a piombo, ancora molto poco si conosce circa le interazioni chimiche tra combustibile, guaina e refrigerante in seguito a fessurazione della guaina o di un evento incidentale severo. Si è pertanto proseguito nello studio della compatibilità chimica tra i diversi componenti del reattore, principalmente nell'individuazione degli strumenti più idonei per sviluppare un approccio teorico della problematica e gettando le basi per una attività sperimentale complementare. In particolare, l'attività svolta da POLIMI in questa annualità ha continuato l'aggiornamento, con nuovi dati stimati, del database di dati termodinamici necessario per l'analisi termodinamica del sistema *fuel-coolant* e ha individuato il codice OpenCalphad come alternativa da valutare per effettuare tale tipo di analisi su sistemi complessi quale il sistema *fuel-cladding-coolant*, al fine di superare le limitazioni evidenziate dal codice in uso. La valutazione della solubilità degli elementi di interesse in piombo fuso rimane un aspetto ancora da migliorare in quanto i valori calcolati col modello applicato sottostimano i valori sperimentali e talvolta non riproducono l'andamento riportato in letteratura. Infine, è stata avviata una collaborazione scientifica con JRC-Karlsruhe che ha consentito di svolgere attività sperimentale con composti del Pb contenenti U, al fine di ricavarne i relativi parametri termodinamici. Contemporaneamente, POLIMI sta procedendo nella realizzazione della facility sperimentale che consentirà di condurre una attività sperimentale parallela con composti del Pb non radioattivi.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 124	0	L	4	10

1 Introduzione

Nell'ambito delle attività dedicate allo sviluppo dei reattori veloci di IV generazione refrigerati a piombo [1], ancora molto poco si conosce circa le interazioni chimiche tra combustibile, guaina e refrigerante in caso di loro eventuale contatto a seguito di una fessurazione della guaina o di un evento incidentale severo. Tale conoscenza è fondamentale per valutare le conseguenze di un simile evento, prevedere sistemi di sicurezza e di intervento e, più in generale, stabilire il grado di sicurezza di questa nuova filiera di reattori.

Si è pertanto proseguito nello studio della compatibilità chimica tra i diversi componenti del reattore, principalmente nell'individuazione degli strumenti più idonei per sviluppare un approccio teorico della problematica e gettando le basi per una attività sperimentale complementare.

2 Stima di grandezze termodinamiche mediante metodi computazionali


L'attività svolta nelle precedenti annualità ha mostrato come i metodi computazionali basati sulla Teoria del Funzionale di Densità (DFT) consentano una stima più accurata delle grandezze termodinamiche quali entalpia, entropia e calore specifico rispetto ai metodi semi-empirici seppur a fronte di un onere computazionale maggiore.[2-5] Tale teoria combinata con opportune approssimazioni, quali quella del Gradiente Generalizzato (GGA), implementata in codici dedicati (Gaussian09 e VASP) e validata per confronto con i pochi dati sperimentali disponibili, è stata applicata allo studio di composti binari e ternari, ossidi ed intermetallici, sia in fase condensata che in fase gas, portando alla compilazione di un database di dati termodinamici da utilizzarsi nello studio della composizione all'equilibrio del sistema fuel-coolant.

Questa attività è stata continuata su due fronti: da un lato continuando ad individuare, sulla base dei diagrammi di fase disponibili, i possibili composti di interesse nell'interazione *fuel-coolant* e stimandone le proprietà termodinamiche; dall'altro continuando ad aggiornare la ricerca bibliografica relativa alla disponibilità di dati termodinamici sperimentali sia in database dedicati sia in letteratura.

Sono stati quindi stimati i parametri termodinamici (entalpia di formazione e soluzione, entropia, calore specifico) in fase gas e condensata di:

- Ioduri di Cs e Sr;
- Cloruro di Sr;
- Alluminuri di U, La, Ce;
- Intermetallici di U con Ni e Fe: U_6Fe , U_6Ni , UNi_5 ;
- Nitruri di U e Pu.

Dall'aggiornamento della ricerca bibliografica/letteratura, sono state individuate pubblicazioni molto recenti (2014-2016) che riportano lo studio sperimentale del calore specifico per composti binari e ternari di interesse per lo studio in oggetto.[6-9] Questi lavori risultano di particolare utilità, dato che il calore specifico è uno dei parametri su cui si hanno meno dati sperimentali disponibili e più difficile da stimare con l'approccio teorico. Grazie dunque alla disponibilità di questi nuovi dati sperimentali e al supporto del centro di calcolo CINECA in termini di ore di calcolo, i valori di calore specifico per $PbUO_4$, Pb_3UO_6 e $Pb_3U_{11}O_{36}$ sono stati stimati e utilizzati per rivedere i risultati della validazione dell'approccio per composti ternari. Inoltre lo studio dei ricercatori indiani relativo al composto intermetallico UPb_3 è stato utilizzato per confermare i valori di calore specifico ed entalpia di formazione stimati nelle precedenti attività.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 124	0	L	5	10


In generale, il lavoro svolto e i risultati ottenuti hanno mostrato come l'approccio proposto può essere utilizzato in modo sistematico per la stima di parametri termodinamici non noti di composti binari e ternari, ossidi e intermetallici. Inoltre è importante sottolineare come tale approccio può essere facilmente applicato allo studio di sistemi refrigerati con miscela eutettica Pb-Bi.

3 Composizione del sistema all'equilibrio termodinamico

La valutazione della composizione all'equilibrio termodinamico del sistema *fuel-coolant* mediante un codice di tipo SOLGASMIX-PV basato sulla minimizzazione dell'energia libera di Gibbs del sistema necessita di un Database di dati termodinamici quanto più ampio e completo possibile. Il Database deve contenere le informazioni termodinamiche per i componenti iniziali del sistema e per tutte le specie derivanti dall'interazione chimica tra queste specie inizialmente presenti. Grazie alle informazioni termodinamiche stimate con i metodi sopra descritti, il Database utilizzato per lo studio del sistema MOX-Pb è in continua implementazione.

Come descritto meglio nei report precedenti, l'approccio DFT applicato consente di stimare i vari parametri termodinamici con un errore medio dell'ordine del $\pm 5-7\%$ su entropia e calore specifico, mentre lo scostamento medio osservato per i valori di entalpia è intorno al 20%. Dunque, al fine di capire come lo scostamento del dato stimato rispetto a quello sperimentale può incidere sulla predizione del codice, è stata condotta una analisi di sensitività della risposta del codice a variazioni in positivo e negativo dei diversi parametri (entalpia, entropia e calore specifico). Per i sistemi binari Pu-O, U-O e Pb-O, prendendo in considerazione un parametro per volta, sono stati introdotti valori sovrastimati o sottostimati dell'1, 5, 10 e 20% per i composti presenti all'equilibrio (uno solo per volta). In ciascuna analisi è stato fatto variare il valore di un solo parametro di un solo composto ed è stata ripetuta a due diverse temperature. L'analisi condotta per i tre sistemi considerati ha messo in evidenza che in generale variazioni del $\pm 20\%$ per i diversi parametri fanno sì che il codice non sia in grado di riprodurre la composizione del sistema in termini di quantità e stato fisico dei composti presenti, così come indicato dai relativi diagrammi di fase. Ricordando che lo scostamento medio dell'entalpia dai valori sperimentali è proprio dell'ordine del 20%, sarà necessario migliorare la stima dell'entalpia mediante l'approccio DFT.

Nelle precedenti attività, lo studio dei sistemi *fuel-coolant* più complessi, ed in particolare quelli contenenti Pu, aveva evidenziato delle limitazioni del codice, ed in particolare l'incapacità di descrivere i composti non stechiometrici ed i composti che decompongono, che impediscono di fatto lo studio dei sistemi contenenti MOX. A causa delle difficoltà riscontrate nel risolvere queste problematiche, e tenendo in considerazione anche i risultati osservati nell'analisi di sensitività, POLIMI sta valutando le performance del codice OpenCalphad al fine di applicarlo al caso studio. OpenCalphad è un codice *open-source* che consente di fare calcoli termodinamici, di equilibrio e di diagrammi di fase, basandosi sull'approccio Calphad.[10] Ad ora è in corso la valutazione dei database disponibili e dei modelli termodinamici implementati nel codice. Si stanno inoltre valutando le potenzialità di questo codice anche per il calcolo di quei diagrammi di fase che non sono disponibili in letteratura, in particolare per sistemi fino a 5 componenti. Infatti, tale codice consente di ricostruire il diagramma di fase di un sistema a più componenti (> 2) noti i diagrammi dei sottosistemi binari.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 124	0	L	6	10

4 Valutazione della solubilità in piombo liquido


La dissoluzione in piombo fuso di elementi costituenti la guaina, di quelli costituenti un eventuale rivestimento protettivo della guaina o dei prodotti di fissione contenuti nel combustibile nucleare, nelle loro diverse forme chimiche, è un aspetto non ancora del tutto noto che ha però una notevole importanza per il funzionamento del reattore refrigerato a piombo. In letteratura sono riportate correlazione per la solubilità di alcuni elementi in Pb fuso ciascuna valida in un dato range di temperatura, tuttavia tali informazioni non sono complete e non consentono di fare un'analisi esaustiva di questo fenomeno sulla base delle condizioni di temperatura che si potrebbero verificare nel reattore. In particolare, un recente report della NEA riporta tutti i dati sperimentali relativi a solubilità in piombo liquido disponibili al 2015 e numerose correlazioni, definite sulla base di tali dati e valide in un range di temperatura definito, dando anche indicazioni su quelle raccomandate per la stima di tale parametro.[11,12] Tali dati e correlazioni sono però principalmente riferiti a elementi costituenti la guaina in acciaio inossidabile, l'ossigeno e solo pochi a prodotti di fissione. Pertanto si è investigata la possibilità di stimare la solubilità in piombo liquido mediante un approccio teorico basato sulla Teoria del Funzionale di Densità combinata con l'Approssimazione del Gradiente Generalizzato (DFT-GGA). In particolare, per trattare sia elementi solidi che gassosi è stato considerato il modello a diluizione infinita implementato nel codice VASP, mediante il quale è stato possibile definire una supercella di piombo, valutare i contributi energetici e le frequenze vibrazionali dalle quali calcolare rispettivamente l'entalpia (ΔH_d) e l'entropia (ΔS_d) di dissoluzione dell'elemento nel Pb liquido. La solubilità in termini di frazione molare è stata determinata a partire da queste grandezze termodinamiche mediante la seguente formula:

$$\ln x = -\frac{\Delta H_d}{RT} + \frac{\Delta S_d}{R}$$

dove T è la temperatura in K e R è la costante universale dei gas in $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$.

I limiti di solubilità, ricavati sperimentalmente ed espressi in %wt, per Cr, Fe, Ni, Co, Cu, La e Pr in piombo liquido nel range 650-1250K sono stati utilizzati per validare l'approccio utilizzato. I dati calcolati in generale sottostimano il dato sperimentale. In particolare, per La e Pr la sottostima è all'interno di un errore percentuale del 20%, mentre per i metalli che costituiscono la guaina è maggiore in tutto il range di temperature. Il metodo è stato applicato alla stima della solubilità di alcuni prodotti di fissione, quali Sr, Ba, Y, Zr e alcuni lantanidi, ottenendo in generale valori di solubilità in Pb liquido, nel range di temperatura considerato, maggiori rispetto ai valori ottenuti per la maggior parte degli elementi che costituiscono la guaina (Fe, Cr, ad eccezione del Ni). Per quanto riguarda la solubilità in piombo fuso di alcuni prodotti di fissione gassosi, quali I, Cs, Xe e Kr, la validazione del calcolo è stata fatta per confronto utilizzando il dato sperimentale dell'ossigeno, disponibile in letteratura. Anche in questo caso, rispetto al dato di letteratura il valore calcolato sottostima il dato sperimentale. È stata quindi valutata la solubilità per diversi prodotti di fissione gassosi in piombo fuso nel range di temperature considerato: nel caso dello I e del Cs è risultata maggiore rispetto a quella dell'ossigeno, mentre per Kr e Xe è risultata molto più bassa rispetto a quella dell'ossigeno. La minor solubilità ottenuta per il Kr è in accordo con quanto riportato in letteratura.[13]

I risultati ottenuti in fase di validazione hanno mostrato come l'approccio descritto non sia in grado di stimare in maniera soddisfacente la solubilità dei diversi elementi in piombo liquido. Pertanto sarà necessario continuare la ricerca di dati sperimentali al fine di irrobustire la parte di validazione del metodo e sarà fondamentale la ricerca di altri modelli per descrivere il fenomeno della dissoluzione in metallo fuso.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 124	0	L	7	10

5 Attività sperimentale

Nell'ambito del PAR 2014 POLIMI ha condotto uno studio preliminare per l'organizzazione di una *facility* per l'esecuzione di prove sperimentali in piombo fuso con sostanze chimiche in grado di riprodurre il comportamento chimico-fisico di elementi e composti presenti nel combustibile nucleare irraggiato. Inoltre, POLIMI ha individuato e definito esperienze di tipo sperimentale volte alla determinazione di parametri termodinamici, non disponibili in letteratura, ma di interesse per lo studio dell'interazione chimica tra combustibile e refrigerante in reattori veloci refrigerati con piombo liquido. Nel corso di questa annualità, POLIMI non è riuscito a realizzare tale *facility* a causa di difficoltà economiche legate agli elevati costi delle attrezzature necessarie. Tuttavia, al fine di far fronte al contributo atteso e quindi gettare le basi per una attività sperimentale volta allo studio di problematiche chimiche di interesse per i reattori refrigerati a piombo, POLIMI ha intrapreso una collaborazione scientifica con un gruppo di ricerca Joint Research Centre – JRC a Karlsruhe, relativamente alla preparazione di composti binari (U-Pb) e ternari (U-Pb-O) e alla determinazione mediante tecniche sperimentali di loro proprietà termodinamiche. A tal fine, una studentessa al terzo anno del corso di Dottorato in Scienze e Tecnologie Energetiche e Nucleari ha potuto svolgere uno stage di tre mesi presso JRC-Karlsruhe lavorando alla preparazione del composto intermetallico UPb₃ e alla misura del calore specifico del composto Pb₃U₁₁O₃₆ in un ampio range di temperatura mediante misure di calorimetria (drop calorimetry e Physical Properties Measurement System).


L'attività svolta presso JRC-Karlsruhe ha consentito di acquisire competenze circa la preparazione in scatola a guanti in atmosfera inerte di campioni di opportuna qualità e purezza, le problematiche nella loro manipolazione e caratterizzazione mediante analisi in diffrazione a raggi X ed infine nella misura del calore specifico sia a bassa (2-300 K) che ad alta (373-1200 K) temperatura. I dati di calore specifico raccolti non sono stati qui riportati in quanto oggetto di pubblicazione scientifica.

6 Conclusioni

In conclusione, l'attività svolta da POLIMI in questa annualità ha contribuito, da un lato, a continuare la compilazione del database di dati termodinamici necessario per l'analisi termodinamica del sistema *fuel-coolant* e dall'altra ad individuare strumenti più idonei per effettuare tale tipo di analisi su sistemi complessi quale il sistema *fuel-cladding-coolant*. La valutazione della solubilità degli elementi di interesse in piombo fuso rimane un aspetto ancora da migliorare in quanto i valori stimati col modello applicato sottostimano i valori sperimentali e talvolta non riproducono l'andamento riportato in letteratura. Infine, è stata avviata una collaborazione scientifica con JRC-Karlsruhe che ci consentirà di svolgere attività sperimentale con composti del Pb contenenti U e Pu, al fine di ricavarne i relativi parametri termodinamici. Contemporaneamente, seppur con dei ritardi, POLIMI sta procedendo nella realizzazione della *facility* sperimentale che consentirà di condurre una attività sperimentale parallela con composti del Pb non radioattivi. I risultati così ottenuti saranno di supporto agli studi computazionali.

Diffusione dei risultati


I risultati ottenuti durante questa annualità sono oggetto di pubblicazioni che presto verranno sottomesse a riviste internazionali e che pertanto non sono stati riportati in questo rapporto tecnico. Inoltre una parte dei risultati è stata presentata a Montpellier alla 39esima edizione del MRS2015 – Scientific Basis for Nuclear Waste Management Symposium, 2-6 Novembre 2015, con un poster dal titolo *Study of fission products solubility in liquid Pb by DFT approach*. Infine un'altra parte del lavoro sarà invece presentata

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 124	0	L	8	10

alla NuMat2016: The Nuclear Materials Conference, 7-10 Novembre 2016 con un poster dal titolo *Solubility prediction of fission products and cladding constituents in heavy liquid metals for the development of gen IV fast reactors.*

Riferimenti bibliografici

1. A. Alemberti, V. Smirnov, C.F. Smith, M. Takahashi, Overview of lead-cooled fast reactor activities, *Progress in Nuclear Energy*, 77 (2014), 300-307.
2. M. Mariani, E. Macerata, E. Mossini, M. Negrin, M. Giola, “Studio preliminare dell’interazione Fuel-Coolant in Reattori LFR: applicazione di un codice di calcolo”, Report RdS/2012/064, AdP MSE-ENEA PAR2011.
3. E. Macerata, E. Mossini, G. Dia, A. Tosolin, M. Mariani, M. Giola, “Report sulla interazione Fuel-Coolant in sistemi LFR”, REPORT RDS/2013/036, AdP MSE-ENEA PAR2012.
4. E. Macerata, E. Mossini, M. Cerini, M. Negrin, A. Tosolin, M. Mariani, M. Giola, “Studio delle interazioni fra combustibile e refrigerante in sistemi LFR”, Report AdPFISS LP2-058 MSE-ENEA PAR2013.
5. M. Capone, G. De Angelis, C. Fedeli, E. Macerata, M. Cerini, M. Negrin, E. Mossini, M. Mariani, M. Giola, “Studio dell’interazione tra combustibile, prodotti di fissione e refrigerante in sistemi LFR”, Report ADPFISS – LP2 – 091 MSE-ENEA PAR2014.
6. O.S. Vălu, O. Beneš, R.J.M. Konings, H. Hein, The high temperature heat capacity of the (Th,Pu)O₂ system, *J. Chem. Thermodynamics*, 68 (2014), 122-127.
7. K. Popa, O. Beneš, D. Staicu, J.-C. Griveau, P.E. Raison, J.-F. Vigier, G. Pagliosa, M. Sierig, O.S. Vălu, J. Somers, R.J.M. Konings, Thermal properties of PbUO₄ and PbUO₆, *J. Nucl. Mat.*, 479 (2016), 189-194.
8. R. Agarwal, P. Samui, S.K. Mukerjee, Calorimetric investigations of UPb₃ compound, *Thermochim. Acta*, 637 (2016), 110-119.
9. K. Popa, O. Beneš, P.E. Raison, J.-C. Griveau, P. Pöml, E. Colineau, R.J.M. Konings, J. Somers, Heat capacity of Bi₂UO₆, *J. Nucl. Mat.*, 465 (2015), 653-656.
10. H. L. Lukas, S. G. Fries and B. Sundman (2007). Computational Thermodynamics: The Calphad Method. Cambridge University Press, United Kingdom.
11. Nuclear Science “Handbook on Lead-bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials, Compatibility, Thermal-hydraulics and Technologies”, OECD-NEA, 2015, 7268.
12. T. Maruyama, K. Uda, K. Moritani, T. Sasaki e H. Moriyama, “Electromotive force measurement of lanthanides in liquid lead”, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 49, 2012, 466-471.
13. G.W. Johnson and R. Shuttleworth, “The solubility of Krypton in Liquid Lead, Tin and Silver”, *Journal of Philosophical Magazine*, 4, 1959, 957-963.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 124	0	L	9	10

Curriculum gruppo di lavoro CIRTEN - PoliMI

Mario Mariani nel 1984 si laurea in Chimica con lode presso l'Università degli Studi di Pavia. Nel triennio 1985-1988 frequenta la scuola di Dottorato di Ricerca in Scienze Chimiche (Consorzio Universitario Ge-Pv-To) e consegue il titolo di Dottore di Ricerca a Roma nel 1989. Nel 1992 entra in servizio come Ricercatore Universitario di Ruolo presso il Politecnico di Milano afferendo al Dipartimento di Ingegneria Nucleare - Centro Studi Nucleari Enrico Fermi (CeSNEF). Professore di II° fascia nel settore Misure e Strumentazione Nucleari, alla Facoltà di Ingegneria dei Processi Industriali dello stesso Politecnico è attualmente coordinatore della Sezione di Ingegneria Nucleare-CeSNEF del Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano con i seguenti incarichi istituzionali: docente del corso (10CFU) di Radiochimica per Applicazioni Tecnologiche; membro del Consiglio di Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Nucleare; membro del Collegio Docenti del Dottorato di Ricerca in Scienze Energetiche e Nucleari e coordinatore del corso (5 CFU) 'Tecnologie e modelli per il combustibile nucleare'. Dal 2002 è responsabile del Laboratorio di Radiochimica e Chimica delle Radiazioni, dove svolge attività di ricerca scientifica articolata in ambiti strettamente connessi che, a partire da argomenti propri della chimica generale, si sono progressivamente focalizzati su tematiche di radiochimica, ingegneria nucleare e Ciclo del Combustibile, impiego delle radiazioni ionizzanti in ambito scientifico-tecnologico-sanitario, misura della radiazione e sua interazione con diverse matrici e materiali. E' autore di circa 90 pubblicazioni su rivista e Proceedings di convegni nazionali ed internazionali.

Marco Giola ha conseguito il Diploma di Perito Industriale, a indirizzo Chimico, nel 1983. Dal 1987 lavora presso il Laboratorio di Radiochimica e Chimica delle Radiazioni in qualità di Collaboratore Tecnico. Ha conseguito una pluriennale esperienza sia in laboratorio chimico tradizionale che in ambito radiochimico operando con soluzioni e matrici radioattive.


Elena Macerata si è laureata al Politecnico di Milano nel 2004 in Ingegneria Nucleare (laurea quinquennale) con indirizzo "Impianti a Fissione e Sistemi a Fusione". Nel 2008 ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Scienza e Tecnologia delle Radiazioni (XX Ciclo), presso il Dipartimento di Energia – Sezione Nucleare del Politecnico di Milano, presentando una tesi dal titolo "Study of calixarene-based picolinamide ligands for An(III)/Ln(III) separation". Dal 2008 è assegnista di ricerca presso il Laboratorio di Radiochimica e Chimica delle Radiazioni. È autrice o co-autrice di 15 pubblicazioni su rivista internazionale e proceedings di conferenze nazionali ed internazionali.

Marta Cerini si è laureata al Politecnico di Milano in Ingegneria Nucleare (laurea specialistica). Attualmente frequenta il terzo anno del Corso di Dottorato in Scienze e Tecnologie Energetiche e Nucleari e collabora col.

Stefano Matteo Cervino sta svolgendo la tesi di Laurea Specialistica in Ingegneria Nucleare presso il Laboratorio di Radiochimica e Chimica delle Radiazioni sulla tematica del modelling dei fenomeni di corrosione in metallo liquido.

Le attività di ricerca scientifica, prevalentemente sperimentali, del gruppo riguardano:

- Caratterizzazione di matrici contaminate da waste nucleari e/o industriali: separazione e determinazione di analiti e/o radionuclidi;
- Determinazione e speciazione di isotopi in traccia e ultra-traccia mediante ICP-MS e HPLC/ICP-MS; studio e modellizzazione di processi chimico-fisico-tecnologici e di migrazione di contaminanti mediante radio traccianti;

	Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 124	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 10	di 10
---	----------------------------------	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

- Valutazione di rischio radiologico nello smantellamento di impianti nucleari e industriali interessati da contaminazione da radionuclidi artificiali e naturali (NORM);
- Studio e realizzazione di dosimetri chimici per le dosi industriali di trattamento-sterilizzazione e per la diagnosi e la terapia medicale;
- Chimica delle Radiazioni: Studio di modificazioni radioindotte, con tecniche chimico, fisiche e nucleari, di materiali impiegati in applicazioni tecnologiche e sanitarie.

L'attività di ricerca di base ed applicata è svolta sia all'interno di collaborazioni scientifiche che in progetti e contratti di ricerca finanziati e/o co-finanziati da istituzioni (EC, MIUR, PRIN), enti ed importanti aziende (ENI, ENEA, SOGIN, FIAT, AITEC). In particolare, il gruppo di ricerca ha acquisito esperienza pluriennale e consolidata nell'ambito dei processi separativi avanzati. Nei processi di tipo idrometallurgico, sviluppati nella strategia di Partitioning & Transmutation (P&T) del combustibile nucleare esaurito, e nei processi di Conditioning di rifiuti nucleari derivante dal riprocessamento pirochimico, collaborando con numerosi Partners italiani ed europei (ENEA, CEA, FZK, FZJ, CIEMAT, UNIREADING, UNICHALMERS, etc.) nei progetti nazionali MIUR e MSE-ENEA-CIRTEN e in quelli europei NEWPART (4° FP), PARTNEW (5° FP), EUROPART (6° FP), ACSEPT e SACSESS (7° FP).