



L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.

Pachet de Lucru: 4

Activitatea: 4.1-2

Responsabil livrabil: Daniela Gugiu (RATEN)

Autori: Iuliana Vișan (RATEN)

Daniela Gugiu (RATEN)

Cristina Mărgeanu (RATEN)

Constantin Păunoiu (RATEN)

Roxana Roman (RATEN)

Andreea Moise (RATEN)

Alice Dinu (RATEN)

Termen: 25.11.2019

*Proiectul PRO ALFRED este finanțat de Ministerul Cercetării și Inovării prin
Sub-Programul 5.5 – Program de cercetare, dezvoltare și inovare pentru
reactori de Generația a IV-a - ALFRED, Contract 5/18.09.2019*

Avize si semnături			
Functia	Nume	Data	Semnatura
Director Adj. Științific	Alexandru Toma		
Director Proiect:	Daniela Diaconu		
Responsabil compartiment MC	Gheorghe Savu		
Responsabil Pachet de Lucru	Daniela Gugiu		
Responsabil Livrabil	Daniela Gugiu		
Autori:	Iuliana Vișan		
	Daniela Gugiu		
	Cristina Mărgeanu		
	Constantin Păunoiu		
	Roxana Roman		
	Andreea Moise		
	Alice Dinu		

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.

CUPRINS

Lista de acronime	1
Rezumat	2
1. Introducere	3
2. Probleme deschise, soluții actuale și necesitățile viitoare de cercetare-dezvoltare ale tehnologiei LFR	4
2.1. Coroziunea	4
2.1.1. Soluții actuale și probleme deschise	4
2.1.2. Selectarea caracteristicilor și strategiilor cheie de proiectare	5
2.1.3. Clasificare	6
2.1.4. Identificarea nevoilor de cercetare și dezvoltare	6
2.2. Eroziunea	7
2.2.1. Soluții actuale și probleme deschise	7
2.2.2. Selectarea caracteristicilor și strategiilor cheie de proiectare	7
2.2.3. Clasificare	8
2.2.4. Identificarea nevoilor de cercetare și dezvoltare	9
2.3. Controlul chimic și filtrarea	9
2.3.1. Soluții actuale și probleme deschise	9
2.3.2. Selectarea caracteristicilor și strategiilor cheie de proiectare	10
2.3.3. Clasificare	12
2.3.4. Identificarea nevoilor de cercetare și dezvoltare	12
2.4. Solidificarea plumbului.....	13
2.4.1. Soluții actuale și probleme deschise	13
2.4.2. Selectarea caracteristicilor și strategiilor cheie de proiectare	14
2.4.3. Calificare.....	15
2.4.4. Identificarea nevoilor de cercetare și dezvoltare	16
2.5. Mișcări seismice.....	16
2.5.1. Soluții actuale și probleme deschise	16

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.

2.5.2	Selectarea caracteristicilor și strategiilor cheie de proiectare	17
2.5.3.	Clasificare	18
2.5.4.	Identificarea nevoilor de cercetare și dezvoltare	18
2.6.	Flotabilitatea	19
2.6.1.	Soluții actuale și probleme deschise	19
2.6.2.	Selectarea caracteristicilor și strategiilor cheie de proiectare	19
2.6.3.	Clasificare	20
2.6.4.	Identificarea nevoilor de cercetare și dezvoltare	20
2.7.	Opacitatea plumbului	21
2.7.1.	Soluții actuale și probleme deschise	21
2.7.2.	Selectarea caracteristicilor și strategiilor cheie de proiectare	22
2.7.3.	Clasificare	24
2.7.4.	Identificarea necesităților de cercetare-dezvoltare.....	25
2.8.	Toxicitatea plumbului	25
2.8.1.	Soluții actuale și probleme deschise	25
2.8.2.	Selectarea caracteristicilor și strategiilor cheie de proiectare	26
2.8.3.	Clasificare	27
2.8.4.	Identificarea necesităților de cercetare-dezvoltare.....	28
2.9.	Procesul de curățare a plumbului	28
2.9.1.	Soluții actuale și probleme deschise	28
2.9.2.	Selectarea caracteristicilor și strategiilor cheie de proiectare	29
2.9.3.	Clasificare	30
2.9.4.	Identificarea necesităților de cercetare-dezvoltare.....	30
2.10.	Retenția elementelor radiotoxice	31
2.10.1.	Soluții actuale și probleme deschise	31
2.10.2.	Selectarea caracteristicilor și strategiilor cheie de proiectare	32
2.10.3.	Clasificare	33
2.10.4.	Identificarea necesităților de cercetare-dezvoltare.....	33
2.11.	Interacțiunea combustibil-agent de răcire	33

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.



2.11.1. Soluții actuale și probleme deschise	33
2.11.2. Selectarea caracteristicilor și strategiilor cheie de proiectare	34
2.11.3. Clasificare	35
2.11.4. Identificarea necesităților de cercetare-dezvoltare.....	35
3. Rolul infrastructurilor experimentale în abordarea provocărilor tehnologiei LFR..	35
3.1. Studiul materialelor LFR și chimia agentului de răcire	40
3.1.1. Coroziunea indusă de metalul lichid.....	40
3.1.2. Fragilizarea și degradarea materialelor structurale la metale lichide.....	40
3.1.3. Materiale la temperaturi înalte pentru perspective pe termen lung.....	41
3.1.4. Efectele iradierii asupra materialelor	42
3.1.5. Materiale pentru rotorul pompei	43
3.1.6. Chimia agentului de răcire	43
3.2. Studii privind integritatea zonei active precum și a componentelor mobile, instrumentației de monitorizare și control, mentenanței, reviziilor periodice și a reparațiilor.....	44
3.2.1. Manevrarea combustibilului	44
3.2.2. Structura și suportul ansamblului combustibil.....	44
3.2.3. Integritatea zonei active și sisteme de securitate (barele de control).....	45
3.3. Funcționalitatea generatorului de abur și experimente de evaluare a securității nucleare	46
3.3.1. Interacțiunea plumb-apă.....	46
3.3.2. Generatorul de abur.....	47
3.3.3. Sisteme nucleare auxiliare	48
3.4. Termohidraulică.....	48
3.4.1. Termohidraulica sistemelor HLM de tip piscină	48
3.4.2. Termohidraulica ansamblului combustibil	49
3.4.3. Teste integrale	50
3.5. Studii privind corozivitatea/eroziunea pompelor utilizate în HLM	51
3.5.1. Pompele principale.....	51
3.6. Instrumentație	52

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.

3.7. Testarea combustibilului iradiat.....	55
3.7.1. Efectele iradierii asupra tecilor	56
3.8. Neutronică.....	58
3.9. Sinteza principalelor direcții de cercetare - dezvoltare	59
Concluzii	63
Referințe.....	64

Lista de acronime

Acronim	Definiție
AFA	Austenitic format din alumină- Alumina Forming Austenitic
ALD	Depunere cu film subțire - Atomic Layer Deposition
ALFRED	Reactor rapid avansat demonstrativ răcit cu plumb - Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator
CFD	Analiza dinamică a fluidelor - Computational Fluid Dynamics
CVD	Depunere chimică a vaporilor - Chemical Vapour Deposition
DGS	Pulverizare la viteze supersonice - Detonation Gun Spraying
DHR	Îndepărtare a cădurii reziduale - Decay Heat Removal
ELSY	Sistem european cu plumb - European Lead System
ESNII	Inițiativa europeană de dezvoltare nucleară industrială durabilă - European Sustainable Nuclear Industrial Initiative
EDTA	Acid etilen-diamino-tetra-acetic
FCC	Rețea cubică cu fețe centrate - Face Centered Cubic
FDO	Obiectiv fundamental de demonstrație - Fundamental Demonstration Objective
GESA	Instalația de tratament prin fascicul de electroni
GFR	Reactor rapid răcit cu gaz - Gas-cooled Fast Reactor
HDC	Criteriu de proiectare de nivel înalt - High-level Design Criteria
HLM	Metale grele lichide - Heavy Liquid Metal
IAEA	Agenția Internațională pentru Energie Atomică - International Atomic Energy Agency
IPPE	Institutul de Fizică și Inginerie Energetică - Institute of Physics and Power Engineering
ISI	Inspecție în funcțiune - In-Service Inspection
LBE	Eutectic plumb-bismut - Lead Bismuth Eutectic
LFR	Reactor rapid răcit cu plumb - Lead-cooled Fast Reactor
LME	Fragilizarea produsă de metalele lichide - Liquid Metal Embrittlement
LMFR	Reactor rapid răcit cu metale lichide - Liquid Metal Fast Reator
LWR	Reactor răcit cu apă ușoară - Light Water Reactor
MAX	$Mn+1AX_n$
NDE	Examinare nedistructivă - Non-Destructive Examination
NPP	Centrală nucleară - Nuclear Power Plant
OCS	Sistemul de control al oxigenului - Oxygen Control System
ODS	Aliaje întărite cu inșeție de oxizi - Oxide Dispersion Strengthened
PLD	Depunere cu impulsuri laser - Pulsed Laser Deposition
PVD	Depunere cu vaporii în plasmă - Plasma Vapour Deposition
RI	Infrastructură de cercetare - Research Infrastructure
SFR	Reactor rapid răcit cu sodiu - Sodium-cooled Fast Reactor
SMR	Reactor mic modular - Small Modular Reactor
SNETP	Platforma tehnologică europeană pentru energetica nucleară durabilă

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.



Rezumat

Reactorul rapid de demonstrație răcit cu plumb ALFRED (Advanced Lead-cooled Fast Reactor European Demonstrator) și facilitățile de cercetare asociate reprezintă o infrastructură cuprinzătoare, complexă, flexibilă și durabilă, capabilă să facă față nevoilor actuale și viitoare generate de tehnologia reactorilor rapizi răciți cu plumb (LFR).

În prezent, numeroase organizații europene și internaționale își canalizează eforturile de cercetare și dezvoltare către problemele rămase deschise ale tehnologiei LFR generate de fenomene complexe de fizică, chimie, termohidraulică. etc. Ținând cont de instalațiile experimentale existente în prezent, infrastructura ALFRED este necesară și potrivită pentru investigarea aspectelor cheie legate de metalele grele lichide și pentru a sprijini dezvoltarea tehnologică a reactorilor rapizi răciți cu plumb.

Toate aspectele necesare progresului tehnologic al LFR vor fi abordate într-o manieră sistematică și integrată prin implicarea tuturor actorilor cu expertiză în domeniu: universități, organizații de cercetare, industrie, utilități și organisme de reglementare în domeniul nuclear.

Pentru a pregăti agenda de cercetare strategică în domeniul LFR în România și planul de acțiune pentru punerea ei în aplicare este necesară analiza principalelor provocări specifice precum și a metodelor și tehnicilor de abordare și rezolvare a acestora. Astfel, în acest document sunt prezentate investigațiile efectuate privind:

- identificarea tuturor aspectelor care necesită investigații suplimentare (cercetare științifică și tehnologică) datorită implicațiilor acestora în ceea ce privește siguranța, funcționarea și / sau întreținerea instalațiilor.
- evaluarea celor mai moderne soluții disponibile pe baza expertizei acumulate în instalații experimentale și infrastructuri de cercetare dedicate metalelor grele lichide.
- soluții și recomandări privind obiectivele, proiectarea și optimizarea instalațiilor de infrastructură din ALFRED, astfel încât acestea să contribuie la rezolvarea acestor provocări tehnice și științifice.

1. Introducere

În domeniul tehnologiei LFR, unul dintre elementele critice este lipsa substanțială a unei experiențe de funcționare continuă a unui astfel de sistem nuclear în comparație cu situația reactorilor rapizi răciți cu sodiu (SFR). Acest aspect transmite la prima vedere sentimentul greșit că tehnologia LFR nu are astfel de dovezi experimentale încât să demonstreze fenomenele fizice de bază care guvernează funcționarea sa, cu referire în special la zonele tehnice care afectează securitatea nucleară, funcționarea și întreținerea reactorului. Lipsa de experiență în reactori este parțial compensată de infrastructurile experimentale care abordează principalele teme de interes atât la nivel fenomenologic, cât și la nivel integral.

Inițiativa industrială europeană pentru o energie nucleară durabilă (ESNII), integrată în platforma tehnologica SNTEP (Sustainable Nuclear Energy Technology Platform), a elaborat programul strategic european de dezvoltare a sistemelor nucleare de generație IV în care sunt considerate trei concepte tehnologice de reactori rapizi și anume: SFR (reactori rapizi răciți cu sodiu, Sodium Fast Reactors), LFR (reactori rapizi răciți cu plumb, Lead Fast Reactors), GFR (reactori rapizi răciți cu gaz, Gas Fast Reactors). În cadrul acestui program strategic realizarea reactorilor de demonstrație reprezintă o etapă hotărâtoare.

Reactorii de demonstrație, printre care se numără și ALFRED, au ca scop verificarea la scară a viabilității tehnologice însemnând testarea caracteristicilor funcționale, a performanțelor combustibilului, materialelor, sistemelor de funcționare și control, caracteristicilor de securitate, etc, precum și verificarea viabilității economice a conceptului știut fiind faptul că sistemele de generație IV sunt gândite să crească eficiența economică a sistemelor energetice nucleare.

Întrucât tehnologia LFR este complexă, de-a lungul anilor unele probleme au fost abordate mai mult decât altele, în principal din cauza priorităților de dezvoltare ale momentului și a disponibilității de finanțare pentru activitățile de cercetare; prin urmare, în prezent există oportunitatea de activare a activităților de cercetare-dezvoltare prin proiecte aliniate obiectivului de accelerare a implementării unui reactor LFR, inclusiv proiectarea, construcția și operarea de noi instalații.

Deși nu este percepută în general ca atare, pregătirea tehnologiei LFR este în continuă creștere datorită campaniilor experimentale desfășurate în Rusia, SUA, China și, în special, Europa. Cantitatea de informații și date colectată până acum și experiența acumulată din exploatarea altor instalații experimentale nu este neglijabilă, așa cum demonstrează lista lungă de referințe incluse, care reprezintă doar o mică parte din cantitatea mare de informații disponibile privind tehnologia LFR.

2. Probleme deschise, soluții actuale și necesitățile viitoare de cercetare-dezvoltare ale tehnologiei LFR

Numeroase State Membre (Italia, Republica Cehă, România, etc.) ale Uniunii Europene depun eforturi extinse și au în derulare, în cadrul propriilor programe naționale de cercetare și dezvoltare, proiecte care abordează diferite aspecte ale tehnologiei plumbului. Obiectivul final al acestor activități de cercetare vizează proiectarea și construirea unui prototip de reactor rapid răcit cu plumb (LFR). Eforturile de cercetare și dezvoltare sunt necesare pentru finalizarea proiectării, pentru licențierea prealabilă și pentru construirea prototipului LFR.

Primul pas îl constituie identificarea tuturor aspectelor rămase deschise precum și a celor care necesită investigații suplimentare (cercetare științifică și tehnologică) datorită implicațiilor acestora în ceea ce privește siguranța, funcționarea și întreținerea instalațiilor. Acestea sunt prezentate în continuare împreună cu soluțiile actuale disponibile și cu evidențierea activităților de cercetare-dezvoltare viitoare necesare.

2.1. Coroziunea

2.1.1. Soluții actuale și probleme deschise

Problema principală în ceea ce privește utilizarea plumbului ca agent de răcire este compatibilitatea chimică dintre plumb și oțeluri. Mai multe elemente de aliere din oțel (de exemplu, Ni, Cr) sunt solubile în metalul lichid, expunând astfel materialul structural la fenomene de coroziune prin dizolvare la interfața dintre plumbul topit și suprafața oțelului. Dacă nu este prevenită și atenuată în mod adecvat, coroziunea crește progresiv, conducând la degradarea proprietăților mecanice ale oțelului [1]. Efectul combinat al plumbului topit și al tensiunii mecanice asupra componentelor structurale sunt cauzele comportamentului casant al oțelurilor feritice martensitice, acest lucru fiind observat prin examinarea vizuală a fracturilor din probe. Acest fenomen este cunoscut în literatură [2] sub denumirea de Fragilizarea indusă de Metale Lichide (LME, Liquid Metal Embrittlement).

Factorii care influențează coroziunea materialelor structurale sunt: compoziția materialului, compoziția și viteza de curgere a mediului coroziv și temperatura (aceasta influențează atât cinetica coroziunii, solubilitatea elementelor din oțel, cât și stabilitatea fazelor). Interacțiunile dintre plumbul topit și oțel conduc la transfer și adsorbție de suprafață între elementele celor două materiale, provocând un transfer de masă și o degradare a suprafeței materialului.

Cantitatea de oxigen dizolvată în metalul lichid intensifică coroziunea oțelului [3]. În absența oxigenului sau în condițiile în care cantitatea acestuia este redusă, are loc

procesul de dizolvare, iar metalul lichid pătrunde în oțel¹. În cazul unor concentrații moderate de oxigen ($\sim 10^{-6}$ - 10^{-8} wt%), un strat protector de oxid (format în principal din crom și oxizi de fier) împiedică dizolvarea oțelului. Totuși, acest strat de oxid ar putea deveni instabil și se poate detașa de suprafața oțelului la o temperatură de peste 450-480 °C. Pe de altă parte, o concentrație ridicată de oxigen trebuie prevenită deoarece există riscul creșterii stratului de oxid peste anumite limite având consecințe asupra proprietăților de transfer de căldură. Acest proces poate determina o posibilă blocare a curgerii la temperaturi mai scăzute și / sau în zonele cu o arie de curgere mai mica.

2.1.2. Selectarea caracteristicilor și strategiilor cheie de proiectare

Pentru atingerea temperaturile de interes în cazul tehnologiei LFR (adică 430 °C în Etapa 1, 480 °C în Etapa 2, 520 °C în Etapa 3 pentru temperatura medie de ieșire din zona activă) este necesară dezvoltarea de materiale inovative rezistente la coroziune sau de tehnici de protecție a materialelor existente.

În general, stratul de protecție de alumina și alierea de suprafață care formează alumina sunt alegerile preferate pentru protecția în plumb lichid. Într-adevăr, alumina (oxid de aluminiu Al_2O_3) este foarte stabilă și insolubilă în mediu de plumb lichid, oferind, de asemenea, caracteristici promițătoare de regenerare pentru materialele care au drept bază aluminiul (de exemplu, material pe bază de FeCrAl, modificări de suprafață sau substrat). Alte materiale și opțiuni inovatoare sunt în curs de investigare.

Prin urmare, pot fi identificate două strategii de bază pentru o funcționare sigură la temperaturi ridicate în plumb (cu un grad diferit de aplicare la Etapa 2 și Etapa 3 a funcționării ALFRED):

- Dezvoltarea straturilor de protecție: vizează, în principal, straturile de alumina depuse pe materiale austenitice sau feritice. De notat că proprietățile mecanice ale straturilor diferă în funcție de tehnicile de depunere. De exemplu:
 - Procesele industriale de aluminizare prin intermediul difuziei (PC, Pack Cementation - PC) sau depunerea chimică cu vapori (CVD, Chemical Vapour Deposition)
 - Depunerea cu vapori în plasmă (PVD, Plasma Vapour Deposition), cum ar fi GESA;
 - Suprapunerea pasivă de straturi;
 - Depunerea cu impulsuri laser (PLD, Pulsed Laser Deposition) [10], pulverizarea la viteze supersonice (DGS, Detonation Gun Spraying) sau Depunerea în film subțire (ALD, Atomic Layer Deposition).

¹ S-a observat o rată de penetrare de 200 um/an în oxidul de crom care formează oțeluri inoxidabile austenitice la 550 °C în plumb, pentru o concentrație de oxigen de 10^{-7} wt% [4].

- Dezvoltarea de materiale inovative sau îmbunătățirea celor existente. După funcționalitatea componentei, opțiunile studiate sunt clasificate astfel:
 - Oțeluri AFA (disponibile comercial pe baza compozițiilor brevetate sau a celor nou dezvoltate) 6;
 - Aliaje cu inserție de oxizi (ODS, Oxide Dispersion Strengthened) 7;
 - Compozit din matrice ceramică consolidată cu carbură de siliciu (SiC) 8;
 - Aliaje refractare 9.

2.1.3 Clasificare

Una din problemele majore a tehnologiei LFR o reprezintă coroziunea, deoarece:

- Are impact major asupra proiectării componentelor de securitate (integritatea structurală a componentelor);
- Soluțiile tehnice compatibile cu plumbul la temperaturi ridicate (peste 480 °C) nu sunt complet dezvoltate;
- Poate provoca efecte care necesita activitati de mentenanță neplanificată.

2.1.4. Identificarea nevoilor de cercetare și dezvoltare

În timp ce materialele structurale inovatoare necesită un proces complex de caracterizare înainte de a fi puse la dispoziția specialiștilor prin integrarea în codurile de calcul specifice, abordările bazate pe straturi de protecție sunt adesea supuse criticilor din cauza imposibilității unei monitorizări continue a stabilității lor. Din motive și scopuri diferite, nevoile de cercetare și dezvoltare pot fi identificate în mod generic după cum urmează:

- Dezvoltarea sau îmbunătățirea metodelor de producție, având următoarele obiective:
 - Fiabilitatea procesului la scară industrială;
 - Investigarea tehnicilor de fabricație și îmbinare;
 - Definirea noilor standarde de calificare (acolo unde este necesar).
- Caracterizarea completă, urmărind următoarele obiective:
 - Compatibilitatea cu mediul și păstrarea integrității structurale (luând în considerare și prezența produșilor de fisiune, precum și a fluidelor secundare);
 - Efectul iradierii (umflarea provocată de iradiere, fragilizarea, stabilitatea microstructurală, efectele dozelor mici pe termen lung);
 - Comportamentul la stres termic, fluaj și oboseală (inclusiv performanța îmbinărilor).

2.2. Eroziunea

2.2.1. Soluții actuale și probleme deschise

În timp ce coroziunea presupune pierderea materialului (sau a integrității materialului) din cauza reacțiilor chimice din plumb, eroziunea este legată de pierderea materialului din cauza acțiunii fluidului (inclusiv a oricărei substanțe antrenate) care afectează suprafața materialului. În practică, eroziunea are loc, cu precădere, în locurile în care curgerea își schimbă brusc direcția, cum ar fi un cot, o reducere, o regiune cu vorticitate mare aproape de suprafața materialului etc.

Eroziunea poate fi clasificată ca suprafața uniform deteriorată de-a lungul curgerii, ca și cum fluidul îndepărtează materialul de suprafață printr-o presiune dinamică puternică sau ca eroziune de tip pitting, caz în care apar mici găuri în material [11]. Eroziunea la scară largă ar putea fi cauzată și de desprinderea de bucăți de materiale corodate provenite din dizolvarea elementelor de aliere.

Pot apărea efecte sinergice ale fenomenelor de eroziune - coroziune, în special dacă strategia selectată pentru protejarea materialului de bază este utilizarea straturilor de oxid [12]). Curgerea metalului lichid poate eroda stratul protector, iar tensiunea mare la forfecare poate îndepărta acest strat. Astfel de fenomene pot accelera oxidarea și rata de degradare la suprafața materialului.

Campaniile experimentale desfășurate la IPPE (Obninsk, Rusia) au demonstrat stabilitatea și eficacitatea straturilor micrometrice de oxid pe oțelurile EI 852 și EP 823 (oțeluri dopate cu Si) expuse la LBE, cu concentrații de oxigen de 10^{-6} wt% și temperaturi în intervalul 560-620 °C [13]). Alte experimente efectuate pe oțelul T91, în condiții similare, au arătat că stratul protector de magnetită dispare la viteze de 3 m/s, în timp ce stratul de spinel ($MgAl_2O_4$) este păstrat [15].

Momentan nu a fost găsită nici o referință privind testarea oțelurilor austenitice în metale grele lichide (HLM) la viteze mai mari de 2 m/s [1]. Testele preliminare confirmă faptul că se pot utiliza limite mai mari de temperatura și viteza a fluidului atunci când sunt puse în aplicare diferite măsuri de protecție. De exemplu, în instalația GESA, stratul protector de FeCrAlY modificat aplicat pe T91 păstrează intactă suprafața oțelului [15].

2.2.2. Selectarea caracteristicilor și strategiilor cheie de proiectare

Strategia de proiectare adoptată în mod obișnuit în LFR-uri pentru diminuarea problemelor de eroziune este limitarea vitezei de curgere a plumbului sub 2 m/s. Limita empirică a vitezei plumbului, cel mai probabil derivată din testele experimentale menționate în cap. 2.1, a fost extinsă și la oțelurile inoxidabile austenitice.

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.



Reducerea vitezei plumbului se traduce printr-o capacitate scăzută de îndepărtare a căldurii din ansamblurile de combustibil, care poate fi compensată prin creșterea pasului rețelei. Datorită caracteristicilor neutronice bune ale plumbului, creșterea pasului rețelei nu constituie o problemă din punct de vedere al criticității reactorului, dar are avantajul reducerii căderilor de presiune și îmbunătățește capacitatea de circulație naturală a agentului de răcire.

Considerații diferite se aplică rotorului pompelor, unde vitezele locale relative de până la 10 m/s nu pot fi evitate. Studiile anterioare arată că materialele ceramice (carburi, nitruri, compuși ai borului) sunt considerate ca cele mai promițătoare candidate. În particular, materialele din categoria MAX -phase [16], cum ar fi Ti_3SiC_2 , Ti_3AlC_2 , Ti_2AlC , Cr_2AlC etc., au fost luate în considerare în mare măsură datorită unei rezistențe la coroziune excelente în plumb la temperaturi ridicate (850 °C), precum și datorită unei combinații unice de caracteristici: valoare mare a modulului lui Young, rezistență ridicată la îndoire și la rupere, rezistență excelentă la șoc termic și la oxidare [17].

Recent, utilizarea materialelor tip MAX - phase pentru rotorul pompei a fost abandonată din cauza comportament fragil. De asemenea, au fost produse și testate straturi de protecție cu densitate ridicată și aderență bună la suprafețele din oțel [18]. S-a constatat că straturile de protecție sunt fragile și nu au capacitatea de regenerare. Prin urmare, ruperea sau fragmentarea stratului de protecție ar duce la dizolvarea directă a materialului de bază.

Straturile de protecție pe bază de alumina (Al_2O_3) sunt în curs de investigare și pentru rotorul pompelor.

2.2.3 Clasificare

Riscul de eroziune este considerat sinergic cu riscul de coroziune, descris în cap. 2.1, atunci când vitezele sunt sub 2 m/s. În alte situații (de exemplu, rotorul pompei) se consideră că impactul eroziunii asupra sistemului este de nivel mediu, deoarece:

- Are impact mare asupra funcționării instalației și eventual, asupra componentelor (din cauza impurităților/resturilor mecanice libere din circuitul primar);
- Soluțiile tehnice compatibile cu plumbul la viteze mari de curgere (peste 2 m/s) și temperatură ridicată (peste 480 °C) nu sunt încă complet dezvoltate;
- Poate provoca efecte care necesită activități de întreținere neplanificate.

2.2.4. Identificarea nevoilor de cercetare și dezvoltare

Sunt analizate, în paralel, două metode posibile (similar cu 2.1.4):

- Îmbunătățirea materialelor de tip MAX -phase, deoarece acestea pot acoperi o clasă foarte largă de carburi ternare și nitriți, care în mare măsură au proprietăți mecanice reglabile, combinând deseori cele mai bune atribute ale metalelor și ale ceramicelor.
- Dezvoltarea straturilor de protecție regeneratoare, rezistente la uzură, care trebuie depuse pe materialul de baza din oțel.

Dezvoltarea și îmbunătățirea metodelor de producție, precum și caracterizarea completă a materialului / stratului de acoperire sunt încă foarte importante, dar trebuie orientate spre:

- Rezistența la uzură și proprietățile ductile,
- Fabricarea prin tehnici inovatoare (de exemplu, sinterizare cu plasmă),
- Funcționarea pe termen lung.

2.3. Controlul chimic și filtrarea

2.3.1. Soluții actuale și probleme deschise

Controlul chimic al metalului lichid este necesar pentru a asigura limitarea precisă a concentrației de impurități dizolvate în agentul de răcire (pentru a evita blocajele provocate de acumulările de impurități și pentru a spori rezistența la coroziune a oțelurilor, dacă se bazează pe formarea stratului de oxid) atât în condiții de funcționare normală, cât și tranzitorii. Sursele de impurități sunt:

- Oxigenul: atunci când se aplică un strat protector de oxid de fier care se regenerează ca măsură de protecție împotriva coroziunii aliajelor pe bază de fier, concentrația de oxigen trebuie controlată într-un interval foarte restrâns în orice regiune a vasului. Contaminarea cu oxigen rezultă din operațiuni de pornire, realimentare și întreținere (de exemplu, înlocuirea componentelor) sau din contaminarea accidentală.
- Producții de coroziune și impurități: producții de coroziune (în principal, Fe, Ni, Cr etc.) se așteaptă să fie generați în mod continuu la o viteză microscopică (dar cu potențiale efecte macroscopice) în funcție de temperatura de funcționare, debitul metalelor lichide etc. Datorită echilibrului de transfer de masă dinamic caracteristic sistemelor non-izoterme, producții de coroziune pot prezenta efecte cumulative pe termen lung, blocarea conductelor din cauza coroziunii fiind întâlnită în mai multe bucle experimentale.

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.



- **Prođușii de fisiune:** produșii grei de fisiune pot fi eliberați din teaca combustibilului (de exemplu, din cauza defectelor de fabricație), în timp ce nucleele ușoare (în special, tritiul) sunt produse în zona activă (prin fisiuni ternare și reacții cu B_4C utilizată în barele de control și de oprire a reactorilor nucleare) și pătrund continuu în agentul de răcire.

Impuritățile rezultate din procesul de coroziune în sine, fie din cauza contaminării prin alte mijloace, pot avea efect asupra nivelului de oxigen necesar pentru protecție, în special în timpul tranzițiilor, afectând temperatura sistemului și, prin urmare, distribuția și stabilitatea impurității. De exemplu, procesele de răcire pot conduce la redistribuirea rapidă (în câteva ore) a impurităților depuse, în cele din urmă, producând blocarea conductelor mai reci.

În plus, produșii de coroziune din regiunile aflate în fluxuri mari de neutroni sau din regiuni cu iradiere neutronică neglijabilă, dar antrenate de curgerea plumbului și care trec periodic prin regiuni cu flux de neutroni ridicat, suferă un proces de activare cu neutroni, devenind astfel o sursă suplimentară de radiotoxicitate a agentului de răcire.

2.3.2. Selectarea caracteristicilor și strategiilor cheie de proiectare

Pe baza potențialelor surse de contaminare a agentului de răcire din reactor, orice LFR va implementa o strategie de control chimic al agentului de răcire care îndeplinește următoarele funcții de bază:

- **Controlul oxigenului:** concentrația de oxigen trebuie menținută în limitele specificate în plumbul lichid, pentru a:
 - împiedica formarea acumulărilor de oxid de plumb
 - minimiza coroziunea materialelor structurale
 - minimiza eliberarea de impurități în plumb.

Controlul oxigenului se realizează prin:

- **Monitorizarea oxigenului:** prin senzori de oxigen plasați în mai multe locații din circuitul primar al reactorului. Senzorii de oxigen se bazează de obicei pe proprietăți de conductivitate ionică ale unor electroliți solizi, în particular, ceramici pe bază de zirconiu [19]). Mai multe laboratoare, inclusiv ENEA (Italia), și-au dezvoltat propria versiune de senzori potențiometrice pe bază de ceramică pentru operarea în aliaje de plumb lichid [20], [21].
- **Dispozitive pentru alimentarea cu oxigen:** fie în stare gazoasă prin injecția de oxigen (O_2), fie în stare solidă prin schimbătoare de masă dedicate și fabricate din oxid de plumb (PbO) (Tabelul 2.3) pentru detalii).

- Dispozitive de reducere a concentrației oxigenului: fie în starea gazoasă prin injecția amestecurilor de gaz conținând hidrogen (H_2), fie în stare solidă prin captare (Tabelul 2.3).
- Controlul impurităților (activate sau nu): nivelul impurităților (inclusiv producții de coroziune) trebuie să fie controlat (sa fie sub limitele specificate) pentru a evita potențialele blocaje (prin depunere) din cauza solubilității lor reduse pe măsură ce temperatura scade.

Controlul produșilor de coroziune se bazează pe:

- Prelevare de probe din plumb: pentru analiza chimică off-line a compoziției plumbului și a purității agentului de răcire [22].
- Îndepărtarea impurităților: prin dispozitive de captare/extragere, cum ar fi filtrele [23] cuplate cu traductoare de presiune și / sau “capcane” reci.

Pe baza experienței obținute în instalațiile experimentale, procedurile de control chimic în fazele de pornire (de exemplu, în rezervorul de stocare a plumbului) sunt esențiale pentru a obține o puritate ridicată și conținut scăzut de oxigen. Procedeele de filtrare, dezoxigenare și degazare, înainte de prima umplere, ajută la simplificarea procedurilor de control chimic în timpul funcționării [24]. Deoarece există o experiență limitată în ceea ce privește monitorizarea și controlul oxigenului în instalațiile de tip piscină, trebuie dezvoltate și/sau îmbunătățite sisteme scalate (de dimensiuni mai mici) de tip piscină [25], [26].

Experiența disponibilă cu privire la îndepărtarea radionuclizilor din agentul de răcire este foarte limitată, însă impuritățile activate și producții de coroziune vor influența operațiunile legate de componentele reactorului sau de manipulare a combustibilului în LFR. Manipularea și curățarea componentelor pentru inspecție și reparație vor necesita dispozitive suplimentare care vor crește complexitatea generală a reactorului. În plus, deplasarea nuclizilor cu permeabilitate ridicată (în special, tritium) și alte specii volatile (de exemplu, Kr, Br, Xe, Ar, I, Cs, Po) vor contribui la creșterea dozele încasate de operatori și la eliberarea acestora în mediu.

Tabelul 2.3. Metode de control al oxigenului pentru sistemele răcite cu HML.

Tip	Metodă	Avantaje	Dezavantaje	Ref.
stare gazoasă	injectarea de O_2 și H_2 (suplimentarea sau reducerea oxigenului)	operare simplă;	Dificil de controlat; posibilă contaminare cu PbO în cazul suplimentării cu oxigen	27 28
	gaz de	concentrația de	eficiență scăzută;	29,

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.



	acoperire sau injecția de amestec H ₂ - H ₂ O	oxigen se menține prin controlul raportului H ₂ /H ₂ O	dificultate în restabilirea deviațiilor mari	30,
stare solidă	schimbător de masă de PbO (suplimentare de oxigen)	operare simplă; eficiență datorată contactului solid- lichid, fără contaminare cu PbO	dependența de mai mulți parametri; necesitatea de înlocuire după consum	31, 32, 33
	colector de oxigen (reducerea oxigen)	operare simplă; eficiență datorată contactului solid- lichid,	dependența de mai mulți parametri; acumulări de oxizi; necesitatea de înlocuire după consum	34

2.3.3. Clasificare

Analiza riscurilor legate de controlul chimic al agentului de răcire este foarte importantă în dezvoltarea tehnologiei LFR, deoarece:

- Are impact mare asupra siguranței reactorului (potențiala deteriorare a capacităților de răcire a zonei active),
- Soluțiile tehnice compatibile cu plumbul în bazine mari de tip piscină nu sunt complet dezvoltate.

2.3.4. Identificarea nevoilor de cercetare și dezvoltare

Sunt necesare studii suplimentare, cum ar fi:

- Optimizarea proceselor corespunzătoare sistemelor de control al oxigenului (inclusiv eficacitatea soluțiilor pentru instalații tip piscină, tipul și amplasarea dispozitivelor pentru furnizarea și eliminarea oxigenului);
- Optimizarea procesului de control al impurităților (inclusiv eficacitatea acestuia în piscină, amplasarea probelor de plumb, tipul și locația dispozitivelor de filtrare și de îndepărtare a impurităților);
- Fiabilitatea și precizia instrumentației asociate (inclusiv senzorii de oxigen, tehnicile de monitorizare a impurităților);
- Fenomenele ce stau la baza transferului de masă într-un sistem de tip piscină pe termen lung.

Limitele de funcționare pentru procesele enumerate ar trebui măsurate pe instalațiile de testare în condiții de operare reprezentative și pentru materialele selectate, înainte de orice implementare într-un sistem nuclear. Testele de compatibilitate pe termen lung ale materialelor trebuie să fie însoțite de tehnici eficiente pentru monitorizarea și controlul oxigenului și al impurităților în plumbul lichid.

2.4. Solidificarea plumbului

2.4.1. Soluții actuale și probleme deschise

Punctul de topire ridicat al plumbului (327 °C) reprezintă o provocare în menținerea agentului de răcire în stare lichidă în întreg sistemul. Solidificarea agentului de răcire poate fi indusă prin tranziții de supra-răcire (de exemplu, în circuitul secundar, prin pierderea controlului temperaturii fluidului la intrarea în schimbătorul de căldură) sau prin pierderi de căldură (de exemplu, lângă pereții vasului reactorului). Un dezechilibru al temperaturii care duce la solidificarea plumbului poate apărea în timpul procedurilor de pornire, oprire, mentenanță și realimentare sau în caz de accidente postulate.

În funcție de starea instalației și de scenariu, solidificarea poate provoca blocarea parțială sau totală a curgerii agentului de răcire (scăderi de presiune locale, debit redus, reducerea transferului de căldură), ceea ce poate duce la gradienti termici mari și / sau deteriorarea funcției de răcire a zonei active.

Cunoașterea modificărilor de volum ale schimbării de fază în plumb este importantă pentru înțelegerea proceselor de topire și solidificare [35]. Plumbul, ca majoritatea metalelor cu structură cristalină de tip FCC, prezintă o contracție a volumului la solidificare. În cazul plumbului pur (99,9% Pb)², au fost raportate contracții volumice cuprinse între 3,8% [35] și 3,6% [36], [37]). În acest context, se impun măsuri suplimentare de protecție capabile să prevină solidificarea locală sau difuză a plumbului. Cu excepția solidificării care a avut loc în instalații experimentale, cunoștințele despre acest proces sunt foarte limitate (de exemplu, solidificarea ar trebui să înceapă de la un spațiu mai restrâns către suprafețe libere sau ar trebui evitată în regiunile cu geometrii complexe). În Europa, primele experimente și simulări prin coduri de calcul de tip CFD (Computational Fluid Dynamics) au fost realizate în cadrul proiectului SESAME [40].

Alte probleme deschise, în ceea ce privește viitoarele direcții de cercetare și impactul asupra proiectării sistemelor LFR, pot fi rezumate după cum urmează:

² Definiția purității tehnice este derivată din alte referințe ([38], [39]).

- Încărcarea termo-mecanice pe structuri / componente ca urmare a tranziției de fază (atât la topire, cât și la solidificare) în funcție de locația în piscină (în principal în ceea ce privește nivelul liber al plumbului), geometrii, viteza de tranziție.
- Posibilitatea de retopire, fie în cazul în care cauza solidificării locale este eliminată, fie în cazul în care capacitatea redusă de transfer de căldură induce un dezechilibru de căldură care favorizează creșterea temperaturii medii a plumbului.
- Posibilitatea de retopire neuniformă ce conduce la formarea de blocuri de plumb solidificate ce sunt angrenate de curgere.

2.4.2. Selectarea caracteristicilor și strategiilor cheie de proiectare

Strategiile de proiectare pentru prevenirea sau diminuarea riscului de solidificare a agentului de răcire depind de scenariul specific:

- Funcționare normală: condiția tipică include pornirea reactorului sau condițiile de realimentare / mentenanță îndelungate, în care căldura reziduală a combustibilului devine mai mică decât pierderile de căldură ale sistemului de răcire a reactorului.
 - Minimizarea pierderilor de căldură:
 - Izolarea termică a capacului reactorului: un ecran termic trebuie să fie integrat fie în capacul reactorului, fie deasupra acestuia, pentru a reduce la minimum pierderile de căldură prin gazul de acoperire și componentele care se extind deasupra nivelului liber al plumbului din piscină.
 - Izolarea termică a vasului reactorului: nu este compatibilă cu cerințele de inspecție ale vasului reactorului în sine, putând fi amplasată în afara vasului de securitate al reactorului, contribuind de asemenea la protejarea învelișului de protecție biologică (beton) împotriva deshidratării excesive cauzată de temperaturile ridicate.
 - Surse de căldură inițiale:
 - Sistemul de încălzire: încălzitoarele electrice trebuie distribuite în anumite locuri din interiorul piscinei, fie în circuite externe dedicate. Amplasarea încălzitoarelor trebuie să asigure circulația naturală a plumbului în interiorul vasului reactorului.
 - Sistemul de pompare: când pompele de răcire ale reactorului sunt pornite (nu în timpul realimentării sau în condiții de accident) acestea pot fi utilizate pentru a furniza o încălzire inițială a agentului de răcire.

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.



- Condiții de accident:
 - Excluderea tranzienților ce conduc la răcire excesivă: orice eveniment inițiator care poate duce la răcirea excesivă prin toate schimbătoarele de căldură trebuie eliminat din stadiul de proiect, prin redundanțe adecvate la controlul temperaturii de intrare a fluidului în circuitul secundar. Solidificarea într-un singur schimbător de căldură ar putea fi acceptabilă numai dacă se demonstrează că nu afectează integritatea componentelor sau că nu induce alte probleme la retopire/reincalzire. Din cauza cunoștințelor limitate cu privire la problemele de solidificare a plumbului, ALFRED este conceput în prezent astfel încât în cazul solidificării simultane a tuturor generatorilor de abur (SG) el să funcționeze în modul pasiv de evacuare a căldurii (interventia sistemului DHR (Decay Heat Removal)).
 - Reducerea pe termen lung a capacității de eliminare a căldurii: reducerea capacității de eliminare a căldurii de către sistemele pasive, în funcție de temperatura de răcire a reactorului, se poate realiza prin strategii diferite bazate pe proprietățile intrinseci ale mecanismelor de transfer de căldură:
 - Reducerea coeficienților de schimb de căldură (de exemplu, prin utilizarea de gaze necondensabile în sistemele de răcire cu apă, așa cum este descris în [41]).
 - Reducerea transferului radiativ de căldură bazat pe temperatura plumbului: aceasta opțiune este considerată în mod obișnuit pentru așa-numitele sisteme auxiliare de răcire a vasului reactorului (RVACS, Reactor Vessel Auxiliary Cooling Systems); opțiunea se bazează pe natura intrinsecă a transferului radiativ de căldură (puternic dependent de temperatură).

2.4.3. Calificare

Analiza riscurilor legate de solidificarea agentului de răcire este foarte importantă pentru dezvoltarea tehnologiei LFR, deoarece:

- Are impact mare asupra siguranței reactorului (posibilitatea de deteriorare a structurilor și a componentelor de securitate, precum și posibila deteriorare a capacităților de răcire a zonei active);
- Înțelegerea comportamentului fenomenologic în geometrii complexe este scăzută în prezent.

2.4.4. Identificarea nevoilor de cercetare și dezvoltare

Până în prezent, fenomenele de solidificare / topire a plumbului nu au primit prea multă atenție, experimental sau numeric. Având în vedere că analizele de proiectare și securitate a reactorilor nucleari se bazează, în principal, pe modelare și simulare, simulările CFD sunt considerate cele mai potrivite pentru captarea schimbărilor de fază în geometrii complexe.

Se depun eforturi semnificative pentru validarea modelării CFD, care necesită modele semiempirice și date experimentale. Acțiunile prioritare de cercetare și dezvoltare în acest sens sunt:

- Evaluarea fenomenelor fundamentale privind solidificarea plumbului;
- Evaluarea modelelor de solidificare care au un anumit nivel de maturitate dobandit în aplicațiile convenționale (ex., procesul industrial de turnare a olumbului);
- Teste experimentale pentru a observa progresul solidificării, cu suficiente detalii pentru compararea cu rezultate obținute cu ajutorul codurilor de calcul.

2.5. Mișcări seismice

2.5.1. Soluții actuale și probleme deschise

După cutremurele recente care au afectat instalațiile nucleare (de exemplu, Tamil Nadu (2004), Kashiwazaki-Kariwa (2007), Fukushima-Daiichi (2011)), specialiștii din domeniu nuclear și organisme de reglementare au dedicat o atenție sporită evaluării și atenuării riscurilor asociate evenimentelor seismice (inclusiv efecte indirecte precum alunecări de teren și tsunami).

Riscul seismic ridică îngrijorare pentru sistemele răcite cu HLM, din cauza densității mari a plumbului și a utilizării unor componente cu pereți subțiri la temperaturi ridicate. Astfel de componente sunt sensibile la încărcăturile inerțiale, fiind astfel susceptibile la oscilații induse pereților subțiri, la solicitări mari ale părților de susținere sau la modificarea geometriei zonei active. Lipsurile tehnologice pot fi identificate cu privire la interiorul reactorului, zona activă, mașina de realimentare cu combustibil, vasul reactorului și suporti. Valurile inerțiale la suprafața liberă a plumbului sunt un efect secundar în cazul unui eveniment seismic care poate induce sarcini dinamice pe componentele reactorului (inclusiv pe capacul reactorului).

În cadrul EURATOM, proiectul SILER [42] a fost dedicat riscului seismic în cazul tehnologiei LFR, cu următoarele obiective :

- identificarea principalelor caracteristici relevante pentru riscurile seismice;

- evaluarea comportamentului unui sistem selectat în caz de accident seismic sever (cu accent pe mișcările legate de seism – inclusiv valurile inerțiale – care duc la potențiale defecțiuni ale sistemului de răcire și ale componentelor reactorului);
- identificarea strategiilor de atenuare prin proiectarea componentelor, definirea opțiunilor de dispunere adecvate și dezvoltarea dispozitivelor necesare (izolatori seismici);
- evaluarea beneficiilor economice legate de izolatorii seismici, luând în considerare, de asemenea, apariția de noi cerințe în standardele de proiectare.

În timp ce proiectul SILER s-a concentrat pe un reactor LFR de dimensiuni mari (și anume, reactorul ELSY), evaluări suplimentare specifice au urmat într-un proiect separat (adică ESNI+, [43]) care abordează riscurile seismice ale unui LFR de dimensiuni mici precum demonstratorul ALFRED.

2.5.2 Selectarea caracteristicilor și strategiilor cheie de proiectare

S-a demonstrat că riscul seismic în LFR este gestionabil la nivel de proiectare, prin reducerea la minimum a inventarului de plumb din sistemul de răcire al reactorului de tip piscină și printr-un sistem capabil să atenueze încărcările dinamice produse de valurile inerțiale ale plumbului.

Izolarea seismică oferă un mare avantaj în limitarea deplasărilor orizontale prin introducerea dispozitivelor între sol și baza structurii (foarte rigid în direcția verticală, pentru a transporta sarcini permanente, și flexibil pe direcția orizontală pentru a permite mișcări laterale). Izolatorii seismici disipează o cantitate considerabilă de energie și reduc frecvența naturală a structurii izolate (într-un interval în care, în general, cutremurele au energie redusă). Izolarea seismică simplifică dramatic proiectarea antiseismică și îmbunătățește standardizarea proiectării (practic, este independent de amplasament, cel puțin pentru componenta orizontală a accelerării).

Proiectul SILER s-a concentrat pe rulmenți de cauciuc cu amortizare ridicată (HDRB, High Damping Rubber Bearings) și role de plumb (Lead Rubber Bearings), care sunt printre cei mai fiabili izolatori seismici. Izolatorii la scară 1:1 au fost testați până la defectare folosind excitații dinamice tridimensionale. În urma experimentelor s-a demonstrat eficiența izolatorilor (factorii de siguranță împotriva defecțiunii având valori apropiate de 3).

În sistemele izolate, dezavantajul principal este reprezentat de deplasările relative semnificative între clădirea izolată și alte clădiri auxiliare. Acestea trebuie să fie suportate de echipamente (de exemplu, conductele de înaltă presiune) care devin „veriga slabă”, în termeni de fragilitate seismică, a întregului sistem structural.

Prin urmare, în proiectul SILER s-au dezvoltat îmbinări flexibile adecvate pentru conducta cu abur sub presiune care se îndreaptă către clădirea turbinei, zonă unde decalajul seismic dintre părțile izolate și cele neizolate ale instalației este semnificativ. Un prototip la scară completă a fost fabricat și testat la deformări pentru presiuni mai mari decât cea de operare (200 bar).

Beneficiile izolării seismice sunt recunoscute pe scară largă pentru reactorii răciți cu apa (LWR) de Generatie III, precum și posibilitatea unei standardizări semnificative a proiectării structurilor și a echipamentelor, fiind luate în considerare și pentru reactorii de fuziune. Au fost emise instrucțiuni și recomandări generate de concluziile proiectului SILER, oferind și o bază pentru analizele economice, cu scopul de a extinde utilizarea tehnologiei.

2.5.3. Clasificare

Analiza riscului seismic este importantă în tehnologia LFR, deoarece:

- Are impact mare asupra siguranței reactorului (posibila deteriorare a structurilor și a componentelor de securitate din cauza încărcării dinamice, potențialul impact asupra criticității zonei active din cauza defectării schimbătoarelor de căldură și a antrenării gazelor sau a deformării geometriei zonei active),

Nu ridică probleme majore, deoarece:

- Înțelegerea comportamentului fenomenologic este ridicată, existând o bună cunoaștere a metodologiilor aplicabile în proiectare și există soluții tehnice bine dezvoltate pentru atenuarea riscului.

2.5.4. Identificarea nevoilor de cercetare și dezvoltare

În industria nucleară sunt utilizate standarde și metodologii riguroase pentru analizele de risc ale evenimentelor seismice care oferă soluții adecvate pentru componente, suportți, amplasament etc. Pe baza analizelor se poate permite îmbunătățirea structurii instalației (de exemplu, distribuirea elementelor structurale în interiorul anvelopei și / sau a clădirilor), a soluțiilor tehnologice pentru componente (de exemplu, suportți sau restricții suplimentare, dispozitive antiderapante), a configurației structurale generale (de exemplu, înglobare parțială / totală, izolare etc.) sarcini ce revin în principal proiectanților.

Nici o activitate de cercetare și dezvoltare nu este considerată o prioritate pentru abordarea subiectului.

2.6. Flotabilitatea

2.6.1. Soluții actuale și probleme deschise

Din punct de vedere termohidraulic, gradientii de densitate datorati profilelor de temperatură din piscină determină un efect de flotabilitate în fluxul agentului de răcire, reprezentat în mod tipic printr-un coeficient de expansiune volumetrică în aproximația Boussinesq [44]. Neglijarea efectelor de flotabilitate în convecție forțată nu se aplică pe deplin în metalele grele lichide. Valoarea mică a numărului Prandtl (Pr) în cazul curgerii metalelor lichide face ca gradientii de temperatură să fie mai mici, producând astfel un strat termic limită relativ gros. Prin urmare, efectele de flotabilitate asupra câmpului de viteze nu sunt restricționate doar aproape de perete, ci se extind pe stratul termic limită.

Se poate stabili un criteriu bazat pe numerele Grashof (Gr) și Reynolds (Re) [45] pentru a identifica riguros următoarele cazuri:

- $Gr/Re^2 \ll 1$: convecție forțată (efectul de flotabilitate neglijat),
- $Gr/Re^2 \gg 1$: convecție naturală,
- Convecție mixtă în toate celelalte cazuri.

În convecție mixtă, flotabilitatea distorsionează câmpul de viteze la fluxuri mari de căldură, chiar și la un număr Reynolds mare, unde în mod normal se așteaptă doar convecția forțată.

Din punct de vedere mecanic, valoarea absolută a densității plumbului (aproximativ 10500 kg m^{-3} la 460°C) este mai mare decât cea a majorității materialelor. Diferența de densitate induce o flotabilitate globală imediat ce o componentă este introdusă în plumb topit (principiul lui Arhimede, [46], rezultând de asemenea o posibilă rotire a componentei. În afară de situațiile care permit extragerea și introducerea în siguranță a componentelor prin capacul reactorului (de exemplu, pentru mentenanță și reparații sau realimentare), trebuie să se asigure că respectivele componente rămân pe loc și nu sunt blocate și pierdute în regiuni marginale în reactor.

2.6.2. Selectarea caracteristicilor și strategiilor cheie de proiectare

Următoarele considerente generale se aplică pentru prevenirea sau atenuarea riscurilor asociate flotabilității din perspectiva proiectării:

- Termohidraulica geometriei tip piscină:
 - Regiunile în care flotabilitatea poate acționa împotriva convecției forțate trebuie evitate
 - Modurile de curgere și transferul de căldură convectiv trebuie să fie caracterizate în detaliu, în principal în acele regiuni în care efectele de

flotabilitate pot afecta schimbul de căldură (prin numărul Nusselt (Nu)).

- Proiectarea componentelor:
 - Materiale cu densitate mare pot fi folosite pentru a contrabalansa efectele de flotabilitate (de exemplu, wolframul are o densitate de 1,7 ori mai mare decât plumbul).
 - Dispozitivele de blocare aflate în plumb (utilizate pentru a preveni plutirea componentelor scufundate, cum ar fi ansamblurile de combustibil) nu sunt prevăzute în prezent ca o opțiune de proiectare, deoarece tehnologia nu a fost încă demonstrată (atât din punct de vedere al funcției de blocare, cât și al eliberării la comanda) sau nu prezintă nici o provocare operațională sau de securitate (de exemplu, nu are impact asupra componentelor legate de securitatea nucleară).
 - Sistemele de manipulare, pentru extragerea și introducerea componentelor în plumb prin capacul reactorului, sunt proiectate să țină seama de forța de flotabilitate care acționează împotriva greutății componentei.

2.6.3. Clasificare

Riscul asociat flotabilității este scăzut, deoarece:

- Nu are impact asupra siguranței reactorului (convecția mixtă nu afectează circulația naturală în condiții de accident, efectele de flotabilitate fiind gestionabile din punct de vedere al proiectării mecanice),
- Înțelegerea fenomenologică este ridicată și există soluții tehnice ușor de aplicat,
- Impactul asupra mentenanței reactorului poate fi abordat prin proceduri standardizate.

2.6.4. Identificarea nevoilor de cercetare și dezvoltare

Revizuirea experimentelor ar putea fi benefică pentru evaluari dacă unele rezultate, raportate cu privire la convecția forțată, nu au fost măsurate în regimul convectiv mixt. Evaluarea geometriilor neconvenționale ale piscinei sau ale modurilor de curgere în schimbătorului de căldură poate avea nevoie de investigații aprofundate prin coduri de calcul de tip CFD și dacă este necesar, validarea suplimentară în instalații la scara redusă (scaled-down).

Soluțiile de proiectare pentru componentele mecanice trebuie să respecte regulile și standardele de proiectare și nu necesită activități de R&D specifice, cu excepția soluțiilor inovatoare care trebuie testate și validate în instalații experimentale.

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.



2.7. Opacitatea plumbului

2.7.1. Soluții actuale și probleme deschise

Ca o observație generală, toată instrumentația necesară pentru reactorii rapizi răciți cu plumb (LFRs) prezintă provocări ținând seama de proprietățile plumbului topit și de faptul că acesta este considerat un mediu dur. Printre provocările cu care se confruntă, instrumentația pentru inspecția în – service (ISI) este afectată de următoarele dificultăți:

- Temperatura de oprire a reactorului ridicată (380 °C), datorită riscului de înghețare a plumbului, ceea ce conduce la necesitatea efectuării inspecțiilor la temperaturi înalte.
- Densitatea mare a plumbului îngreunează introducerea instrumentelor de inspecție.
- Conductivitatea plumbului poate afecta citirile tehnicilor ce utilizează curenți turbionari (eddy).
- Inspecția vizuală (mijloace optice) nu se aplică datorită opacității plumbului, făcând necesară utilizarea tehnicilor alternative, cum ar fi metodele cu ultrasunete.
- Diferența redusă de densitate între plumb și oțel conduce la scăderea sensibilității metodelor de inspecție cu ultrasunete.
- Stratul de oxid (necesar pentru a limita riscul de coroziune) sau acoperirile de protecție, ce pot perturba contactul dintre agentul de răcire și pereții sistemului, afectând calitatea transmisiei ultrasunetelor.
- Capacitatea scăzută de umectare a plumbului pe oțeluri oxidate sau acoperite la o temperatură mai mare de 380°C 1.

Opacitatea agentului de răcire (plumb) poate, de asemenea, să complice orice operațiune de salvare și recuperare de fragmente/corpurile libere care ar fi putut ajunge sau nu la suprafața plumbului din piscină.

Programele de cercetare din cadrul EURATOM, precum proiectul ESNII+ 43, s-au concentrat în principal asupra:

- Instrumentației cu ultrasunete în metale lichide 47:
 - Mijloace ultrasonice pentru identificarea ansamblurilor de combustibil: au fost dezvoltate și testate în plumb-bismut eutectic (LBE) și în sodiu lichid multi-traductoare sau traductoare simple canelate (cu cod de bare) demonstrând că ‘codurile de bare ultrasonice’ pot fi utilizate

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.

pentru identificarea unică a ansamblurilor de combustibil aflate în metale lichide 48, 49.

- Tehnici de scanare pentru operațiuni de salvare și recuperare 50: maparea și reconstrucția suprafeței au fost realizate în apă, sodiu și LBE pe același set de probe utilizând tehnici cu ultrasunete.
- Tehnicilor de inspecție a integrității vasului reactorului: bazate pe semnalul primit de la sistemul robotic MIR (Mașina pentru Inspecția Reactorului) folosit în reactorii rapizi din Franța și instrumente echivalente indiene sau pe procesul de examinare nedistructivă NDE (Non Destructive Examination) ce poate fi aplicat pentru inspecția vaselor din oțel inoxidabil austenitic și a sudurilor, presupunând ca spațiul dintre vasul reactorului și vasul de securitate este de ordinul a 200-300 mm 51, 52.

Se intenționează investigarea în continuare și a altor tehnici, dezvoltate în special pentru reactorii răciți cu sodium 53 sau apă 54, 55, 56, cu scopul extinderii lor în cazul plumbului topit 57.

2.7.2. Selectarea caracteristicilor și strategiilor cheie de proiectare

În cazul reactorilor rapizi se poate aplica o abordare gradată a activităților de întreținere, supraveghere și inspecție In-service, luând în considerare recomandările formulate în documentul IAEA No. NS-G-2.6 58. Abordarea care se aplică pentru supravegherea proceselor, inspecțiilor și intervenției în cazul reparațiilor include câteva niveluri de activități așa cum sunt prezentate în Tabelul 2.7.

Considerând Nivelurile 2 și 3, exemplele de componente de clasă 1 care necesită inspecții (periodice și planificate sau neplanificate), conform regulilor stabilite în codurile de proiectare nucleară (ex. ASME Secțiunea XI Div. 3 2001 completată în 2003, specific pentru centralele nucleare răcite cu metal lichid) sunt următoarele:

- Vasul reactorului (integritate suduri, grosime perete vas, fisuri),
- Componentele interioare ale reactorului (deformații, integritate suduri, predicții asupra duratei de viață în baza fluenței de neutroni),
- Ansamblurile de combustibil (identificare pentru operații de realimentare, integritatea creionului de combustibil),
- Schimbătoare de căldură (integritate suduri, fisurare, grosime perete, pierderi, colmatare).

Tabelul 2.7. Niveluri pentru activități de supraveghere, inspecții și intervenție de reparații în cazul LFR

Nivel	Nume	Stare reactor	Tip de inspecție/întreținere	Acțiuni
1	Monitorare continuă	Operare normală	Continuă	Monitorarea parametrilor de operare (temperaturi, rate de curgere...), Monitorarea integrității barierelor de securitate (ex., detecția scurgerilor), Păstrarea înregistrărilor tranzițiilor, poziționarea, mișcarea, măsurarea vibrațiilor.
2	Inspecție periodică	Oprit	Supraveghere planificată	Inspecții volumetrice (ex. suduri la vasul reactorului), Inspecții vizuale, Măsurători geometrice.
3	Inspecție periodică extinsă pentru întregul circuit primar	Oprit	Inspecție neplanificată	Inspecție detaliată în cazul operării anormale a centralei, detectarea de anomalii sau verificare unor suspiciuni.
4	Intervenție de reparare a circuitului primar	Oprit	Întreținere neplanificată (urmează după pasul 2 sau 3)	Repararea structurilor avariate indicate de inspecția de Nivel 2 sau 3.

Alte componente (ex. pompele pentru agentul de răcire), deși nu sunt neapărat clasificate din punct de vedere al securității nucleare, pot necesita de asemenea, inspecții periodice pentru evaluări privind durata de viață, pentru a garanta cerințele privind disponibilitatea centralei și pentru a evita daunele potențiale asupra componentelor din clasele de securitate.

Dincolo de dezvoltarea ulterioară a dispozitivelor și instrumentelor, sunt preconizate următoarele strategii de inspecție:

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.

Extragerea componentelor prin capacul reactorului și inspecție efectuată în locatii dedicate: soluție care necesită eforturi minime de cercetare și dezvoltare și care permite, de asemenea, inspecție vizuală și tehnici cu curenți turbionari (eddy currents), dar care afectează negativ disponibilitatea și complexitatea centralei.

Inspecția vasului reactorului prin spațiul dintre vasul reactorului și vasul de securitate: pot fi dezvoltate tehnici vizuale in-gaz și cu ultrasunete folosind soluțiile deja utilizate pentru reactorii răciți cu sodiu (SFR).

Evacuarea parțială a plumbului pentru inspecții în atmosferă inertă: pretinsă a fi utilizată în reactorul răcit cu sodium Phénix pentru inspectarea componentelor interne [59], soluția poate necesita stocarea combustibilului în zona activă și în vasul reactorului pentru a inspecta componentele care se extind până la partea inferioară a reactorului.

Verificarea indirectă a integrității tecii combustibilului: tehnicile bazate pe eliberarea de produși de fisiune gazoși sau cocktail-uri cu gaz radioactiv încărcate prin teaca fisurată în creioanele de combustibil (ex., aspirare on/off-line, etichetare gaze) au fost utilizate pentru identificarea ansamblurilor deteriorate.

Testul schimbătorului de căldură prin presurizare și verificarea integrității: revendicarea posibilității de testare și prognosticare a integrității schimbătoarelor de căldură nu a fost încă prevăzută în codurile de proiectare nucleară.

Sistem de monitorizare acustică care detectează impactul metalului în scopul localizării pieselor libere care nu pot ajunge la suprafața liberă a plumbului din reactor.

2.7.3. Clasificare

Trebuie acordată prioritate ridicată provocărilor legate de inspecția în plumb, ținând cont de:

Importanța deosebită pentru operarea sigură și fiabilă a centralei:

Inspecția periodică este mijlocul prin care se asigură siguranța componentelor principale și se garantează fiabilitatea acestora (estimările privind frecvența evenimentelor inițitoare în analizele probabiliste de securitate sunt bazate, de asemenea, pe planurile de inspecție),

Compatibilitate scăzută (sau necunoscută) a tehnicilor disponibile în prezent cu plumbul topit,

Impactul asupra întreținerii reactorului poate fi abordat prin proceduri standardizate; cu toate acestea, este nevoie de dezvoltarea și calificarea instrumentelor pentru inspecție.

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.



2.7.4. Identificarea necesităților de cercetare-dezvoltare

Activitățile de cercetare-dezvoltare legate de instrumentație, și specific de instrumentația pentru ISI, se vor concentra pe soluționarea următoarelor provocări, care sunt puternic legate de proiectarea și opțiunile de operare ale centralei:

- Verificarea compatibilității tehnicilor existente (dezvoltate și utilizate în apă, sodiu sau LBE la temperatură mai mică) cu plumbul topit.
- Dezvoltarea de noi tehnici dedicate scanării și reconstrucției imaginilor în plumb, precum și a examinării nedistructive în plumb.
- Îmbunătățirea tehnicilor existente sau a celor recent dezvoltate pentru a reduce timpul de oprire a centralei pentru inspecții planificate și neplanificate.
- Definirea strategiei și identificarea/dezvoltarea echipamentelor necesare extragerii componentelor pentru examinarea și repararea în afara piscinei.
- Definirea strategiei și identificarea/dezvoltarea echipamentelor necesare drenării parțiale a sistemului de răcire a reactorului.

2.8. Toxicitatea plumbului

2.8.1. Soluții actuale și probleme deschise

Plumbul este folosit într-o serie de operații industriale (ex., reciclarea deșeurilor metalice, fabricarea/reciclarea bateriilor auto, industria ceramică, lipirea, sudarea, tăierea, topirea, rafinarea, vopselele pe bază de plumb), iar expunerea la plumb este în prezent un risc cunoscut și reglementat. Expunerile au scăzut substanțial în țările în care au fost implementate măsuri de control al plumbului în ultimii 10-30 de ani.

Expunerea la plumb are efecte toxice asupra corpului uman prin diferite căi de intrare (adică prin inhalare, ingestie și/sau adsorbție a pielii). Plumbul se acumulează în organism (sânge, oase, rinichi, creier și ficat) și inhibă transportul de oxigen și calciu, provocând astfel o varietate de simptome, care variază în funcție de tipul de expunere (fie acute, fie cronice). Cu toate acestea, otrăvirea cu plumb poate să nu fie însoțită de simptome până când nu a fost atins un prag de acumulare în corp.

Intervenția medicală imediată în caz de otrăvire cu plumb scade considerabil potențialul efectelor pe termen lung din cauza supraexpunerii asupra sănătății. Prin urmare, lucrătorii sunt de obicei instruiți să recunoască simptomele intoxicației cu plumb și sunt recomandate controale periodice/monitorizare biologică pentru lucrătorii expuși la plumb.

Agențiile preocupate de practicarea în condiții de siguranță a operațiunilor industriale cu plumb sunt specifice fiecărei țări și fiecare agenție a elaborat un set de reguli și reglementări care trebuie respectate.

Deoarece este relevant pentru aplicațiile care implică plumb topit, merită menționat faptul că presiunea de saturație este o funcție de temperatură ($p_s = 1.88 \times 10^{13} T^{-0.985} \exp(-23325/T)$, cu $[p_s] = \text{Pa}$ and $[T] = \text{K}$). Valorile acesteia sunt relative scăzute la temperaturi relevante pentru LFR: în ipoteza că reactorul sau vasele de stocare conținând plumb topit la temperatura de oprire (ex., $T = 420^\circ\text{C}$, $p_s = 72 \mu\text{Pa}$) sunt deschise către atmosfera anvelopei, concentrația plumbului în aer variază în acest caz în intervalul de la 4 la 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (pentru temperatura aerului între 15°C and 25°C), față de limitele de expunere admise pentru expunerea lucrătorilor care sunt de ordinul a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [60] sau 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [61], temperatura aerului de 25°C , în medie pe o perioadă de 8 ore.

2.8.2. Selectarea caracteristicilor și strategiilor cheie de proiectare

În cazul reactorilor răciți cu plumb, radiotoxicitatea agentului de răcire este principala preocupare din punct de vedere al riscului pentru lucrători și populație. Mai mult decât atât, contaminarea agentului de răcire cu gaze ce conțin oxigen poate conduce la formarea de oxizi, crescând riscul de blocare al curgerii acestuia. Prin urmare, orice sistem care lucrează cu agent de răcire (radiotoxic sau nu) este închis și monitorizat pentru a evita contaminarea și eliberările radioactive. Operațiunile se efectuează într-un mediu inert cu impurități minime de oxigen.

Cu toate acestea, atunci când avem de-a face cu plumb neiradiat (ex., prima umplere și rezervorul de depozitare) sau cu operațiuni de întreținere, are loc manipularea plumbului solid sau lichid și apare riscul potențial al contaminării aeriene cu oxizi de plumb sub formă de praf sau cu vapori de plumb. Principalele linii directoare și recomandări generale din reglementările actuale pentru industria convențională se aplică și LFR și pot fi rezumate după cum urmează:

- Planuri scrise pentru managementul operării și al accidentelor
- Supravegherea medicală a lucrătorilor, inclusiv monitorizarea biologică (examinarea periodică a sângelui și analiza urinei).
- Acordarea primului ajutor și aplicarea procedurii de urgență, în funcție de tipul de expunere:
 - Inhalare: îndepărtarea de expunere, gargară pentru curățarea gâtului, spălarea nasului și buzelor.
 - Ingestie: inducerea vomiei, spălarea nasului și buzelor, administrarea unui calmant (emolient).

- La nivelul pielii: spălare/curățare cu peria folosind săpun și apă, clătire cu apă.
 - La nivelul ochilor: clătire cu apă timp de cel puțin 15 minute.
- Îmbrăcăminte și echipament de muncă de protecție, în funcție de tipul de contaminare potențială:
 - Îmbrăcăminte specială pentru zonele închise cu plumb sub formă de praf sau fum.
 - Mănuși de protecție rezistente la substanțe chimice în cazul unui contact prelungit și repetat.
 - Ochelari de protecție în caz de contact potențial cu materialul topit.
 - Aparat respirator, în cazul zonelor închise cu contaminare aeriană (praf sau vapori) fără ventilație adecvată.

Toate hainele/echipamentele de protecție după lucrul într-o zonă contaminată trebuie curățate/dispuse în zone de schimb/spălătorie specificate, evitând contaminarea potențială a îmbrăcăminții curate.

- O igienă personală bună pentru a evita inhalarea și ingestia (spălare pe mâini, pe față, pe gât și complet pe brațe înainte de a mânca, fuma sau părăsi locul de muncă).
- În cazul contaminării aeriene, pe lângă aparate de respirație individuale (după cum este necesar) se impune o ventilație adecvată (cu filtre de eficiență ridicată în sisteme de recirculare închise) echipată cu dispozitive de control pentru monitorizarea concentrației de plumb.
- Depozitarea și eliminarea în siguranță a plumbului non-radiotoxic în containere sigilate și tratarea sa ca deșeu special pentru a preveni contaminarea locului de muncă și eliberarea în mediul înconjurător.

2.8.3. Clasificare

Orice risc asociat cu toxicitatea plumbului este clasificat pe un nivel inferior, având în vedere că:

- Preocupările legate de funcționarea în condiții de securitate sunt depășite cu mult de riscurile asociate radiotoxicității agentului de răcire,
- Înțelegere foarte bună a fenomenologiei și existent soluțiilor tehnice ușor de aplicat,
- Riscul de contaminare a personalului poate fi gestionat prin proceduri standardizate adecvate.

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.



2.8.4. Identificarea necesităților de cercetare-dezvoltare

Toxicitatea plumbului este tratată la nivelul proiectării, prin asigurarea aplicării corespunzătoare a liniilor directe și a obligațiilor stabilite prin reglementările naționale și nu necesită activități specifice de cercetare-dezvoltare.

2.9. Procesul de curățare a plumbului

2.9.1. Soluții actuale și probleme deschise

Radiotoxicitatea plumbului este ridicată, datorită produșilor de fisiune și produșilor de activare reținuți. Prin urmare, curățarea componentelor extrase din piscina reactorului de reziduurile de plumb și oxizi este o operație necesară în cazul inspecțiilor ce se efectuează în afara reactorului, potențial urmate de operații de întreținere, reparare sau depozitare definitivă. Mai mult decât atât, orice sistem din afara piscinei ce conține plumb (ex., sistemele de condiționare a plumbului, de umplere și drenare) poate necesita operațiuni de întreținere periodică, inclusiv drenarea și curățarea întregii bucle, pentru a efectua o analiză vizuală a conductelor și a componentelor sau pentru a elimina depunerile rezultate în procesul de coroziune sau oxizii.

S-a acumulat o experiență consistentă în instalațiile experimentale care au necesități asemănătoare (chiar dacă nu lucrează cu plumb activat sau contaminat). Mai multe soluții chimice apoase pentru curățarea componentelor au fost identificate și testate, acestea fiind prezentate în Tabelul 2.9.

Tabelul 2.9. Opțiuni pentru curățarea componentelor cu soluții chimice [62]

Tip	Opțiune	Avantaje	Dezavantaje
Acid puternic diluat	Acid nitric (HNO_3)	-Eficiență (și pentru îndepărtarea oxizilor);	-Risc chimic ridicat
	Acid clorhidric (HCl)	-Versatilitate (din punct de vedere al geometriei componente); -Reacție rapidă.	-Producere de hidrogen -Cost -Risc de atac asupra oțelului (îngrijire în timp) -Trebuie neutralizat înainte de eliminare, depozitare finală
Acid slab diluat și adjuvanți chimici	Acid acetic și peroxid de hidrogen, cu sau fără alcool etilic	-Eficiență -Versatilitate -Viteză de reacție ușor controlabilă -Agresivitate superficială redusă	-Risc chimic mediu -Producere de hidrogen -Trebuie neutralizat înainte de depozitarea finală -Nu este eficient la îndepărtarea oxizilor.

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.

	Acid etilen-diamin-tetra-acetic (EDTA), citrat de amoniu, acid ascorbic, agent tensioactiv	-Eficiență doar pentru îndepărtarea oxizilor; -Risc chimic redus; -Viteză de reacție ușor controlabilă; -Agresivitate superficială redusă.	-Nu este eficient pentru îndepărtarea plumbului metallic; -Trebuie neutralizat înainte de eliminare/depozitare finală
Soluție alcalină urmată de atacul unui acid puternic sau slab	KMnO ₄ + NaOH urmată de HNO ₃ sau HCl	-Eficiență (și pentru îndepărtarea oxizilor) -Eficiență pentru decontaminare -Viteză de reacție ușor controlabilă (pentru acid slab)	-Risc chimic mediu -Producere de hidrogen -Cost -Temperatură înaltă -Trebuie neutralizată înainte de eliminare/ depozitare finală.

Procedura de curățare aleasă, în funcție de dimensiunile și geometria componentelor, poate varia, una din acestea constând în scufundarea componentei într-un rezervor și stropirea acestuia cu soluție. Plumbul formează compuși chimici (ex., $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ dacă se folosește acetic acid, sau $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, dacă se folosește acid nitric) care sunt spălați cu soluție apoasă [63],[64],[65]. Odată neutralizat (ex., folosind NaOH pentru soluțiile acide), baia chimică este evaporată și rămân, ca reziduuri, acetati sau nitrați de plumb ce urmează să fie depozitați.

O metodă alternativă, aplicabilă numai pentru componente mari și geometrii accesibile se bazează pe ablația mecanică (sablare, material abraziv polimeric, perii mecanice) prin manipulare la distanță.

2.9.2. Selectarea caracteristicilor și strategiilor cheie de proiectare

Soluții tehnologice pentru îndepărtarea plumbului metalic și a oxidului de plumb sunt disponibile în industria convențională. Implementarea lor într-o instalație nucleară necesită o abordare specială datorita riscurilor asociate:

- În majoritatea cazurilor, în reacția chimică cu soluția apoasă se produce hidrogen (riscul producerii de hidrogen).
- Acizii sunt foarte toxici pentru oameni, animale și, în general, pentru mediul înconjurător (pericol chimic)
 - Reacțiile cu acizii sunt de obicei exoterme și necesită condiții de atmosferă controlată.

- Soluțiile utilizate pentru curățarea componentelor trebuie păstrate în containere dedicate.
- Reziduurile provenite din filtrarea sau ablația plumbului sunt caracterizate de toxicitate ridicată și radiotoxicitate, necesitând eliminare/depozitare finală specială (gestionarea deșeurilor).

Componentele vor fi mutate, de preferință, în zone dedicate și izolate, unde va continua procedura de curățare. Zonele vor dispune de echipamente corespunzătoare, inclusiv rezervoare cu geamuri de inspecție, încălzitor și / sau agitatoare, după caz, unde componentele sunt scufundate sau stropite cu soluțiile respective, sistem de eliminare și control al gazului, sisteme de drenare sau recuperare echipate cu unități de filtrare și dispozitive de monitorizare, rezervoare pentru pregătirea și depozitarea soluțiilor chimice, sisteme de ventilație și condiționare.

Componentele care nu pot fi mutate sau sistemele din afara piscinei pot fi curățate in-situ prin conexiuni temporare pentru alimentarea și evacuarea soluțiilor chimice. Pe componentele de dimensiuni mari se poate folosi ablația mecanică cu echipamente telecomandate echipate cu dispozitive de aspirație și filtrare.

2.9.3. Clasificare

Riscurile asociate curățării componentelor de plumb metalic și oxizi de plumb sunt clasificate pe un nivel inferior, având în vedere că:

- Riscurile chimice și toxice asociate procedurii de curățare sunt gestionate în mod convențional,
- Înțelegere foarte bună a bazelor fenomenologice și existent de soluții tehnice ușor de aplicat,
- Strategiile de curățare a componentelor de dimensiuni mari se pot baza pe procedurile industriale standard, cu echipamente telecomandate.

2.9.4. Identificarea necesităților de cercetare-dezvoltare

Procedurile de curățare a plumbului trebuie avute în vedere încă din faza de proiectare a reactorului astfel încât să fie asigurată dispunerea optimă a componentelor (care să permită ulterior deplasarea acestora către locațiile de curățare) și alocarea spațiului necesar pentru sistemele auxiliare. Cu toate acestea, curățarea componentelor nu are nevoie de activități de cercetare și dezvoltare specifice, deoarece tehnicile asociate sunt destul de bine dezvoltate și testate în industria convențională și la nivel de laborator.

2.10. Retenția elementelor radiotoxice

2.10.1. Soluții actuale și probleme deschise

Plumbul prezintă o capacitate bună de retenție pentru mulți radionuclizi care pot fi generați fie prin activarea cu neutroni a agentului de răcire și a impurităților acestuia fie eliberați din matricea de combustibil (datorită unei spărturi a tecii sau a permeabilității acesteia). Situația cunoștințelor asupra unui set de radionuclizi de interes pentru un LFR critic poate fi rezumată după cum urmează:

- Poloniu (Po): în timp ce proprietățile fizice și fizico-chimice fundamentale ale elementului Poloniu sunt indeajuns de bine cunoscute, majoritatea compușilor săi nu au fost complet caracterizați datorită cantităților mici de probe disponibile, a timpului de înjumătățire scurt al celui mai comun izotop ^{210}Po , a necesității măsurilor de protecție extinse, a producerii de căldură și a radiolizei care interferează cu măsurătorile la echilibru, precum și datorită dificultății efectuării de măsurători micro-calorimetrice pe probe ce emit căldura. Majoritatea cunoștințelor despre chimia poloniului se bazează pe calcule teoretice, analogie cu alți calcogeni (în special, Seleniu și Telur), și câteva observații izolate efectuate în cursul secolului trecut ([66] – [81]). Interesul pentru Po este legat în principal de sistemele răcite cu LBE, incluzând țintele pentru ADS (Accelerator Driven System), sau, în câteva cazuri, de agentul de răcire Pb-Li în curs de investigare pentru reactoarele de fuziune. Majoritatea considerațiilor și datelor sunt considerate aplicabile și plumbului pur, unde producția de Po se datorează transmutării neutronice duble a ^{208}Pb și activării neutronice directe a impurităților de bismuth. Trebuie luate în considerare mai multe forme de Poloniu (formă metalică, oxid de poloniu, hidrură de poloniu, aerosoli), ceea ce complică în continuare evaluarea eliberării acestuia din agentul de răcire. Speculațiile asupra variației volatilității cu temperatura sunt folosite de obicei ca o posibilă explicație a datelor experimentale și teoretice dispersate.
- Cesium (Cs) și Strontium (Sr): în timp ce forma metalică are valori foarte diferite (puncte de fierbere de 671°C , [82], și, respective, 1385°C), soluția lor chimică în plumb prezintă multe asemănări. Coeficienții de activitate pentru compuși intermetalici solizi au fost măsurați prin metode electrochimice, arătând o interacțiune hetero-atomică puternică și un comportament extrem de neideal al aliajelor binare lichide în soluții foarte diluate, care au scăzut considerabil presiunile de vapori ale Cs și Sr ([83] - [86]). Deși compușii cu plumb ar fi favorizați termodinamic datorită concentrațiilor extreme de mari ale plumbului în raport cu alte oligoelemente, trebuie luați în considerare și compușii moleculari ai Cs și Sr (ex., CsI , Cs_2O).

- Iod (I): iodul este prezent aproape totdeauna ca un compus cu plumb în metalul lichid și în faza gazoasă (adică PbI , PbI_2 , PbI_3 , PbI_4 și Pb_2I_4 – ([87], [88]). În consecință, în esență, nu există iod liber în faza gazoasă, ci doar iodură de plumb.
- Gazele nobile (Kr, Xe): Neinteracționând chimic cu plumbul lichid, gazele nobile prezintă o solubilitate foarte mică (deși nu s-a obținut un acord complet cu datele experimentale ([89], [90])). Dacă pentru bulele de gaz care sunt eliberate dintr-un pin de combustibil cu teaca fisurată se așteaptă să ajungă la suprafață aproape imediat, pentru atomii de gaze nobile dispersați în plumb lichid, difuzarea lor din soluție poate dura câteva zile [91].
- Tritiu (3-H): Datele privind solubilitatea hidrogenului și a izotopilor acestuia în plumb ([92], [93]) și plumb-litiu ([94], [95]) sunt dispersate și au fost observate inconsistente. Teoretic, hidrura de plumb este extrem de instabilă chiar și la temperatura camerei [96]. Se așteaptă o solubilitate foarte scăzută, deși chiar și valori mici ar putea duce la cantități relevante antrenate în masa mare de agent de raciere.

2.10.2. Selectarea caracteristicilor și strategiilor cheie de proiectare

Un set de funcții recomandate pentru presiunile parțiale ale Po, Cs, Sr și I în soluția de plumb pot fi extrase din [1], Tabelul 5.2.4 pentru a estima concentrația teoretică maximă în agentul de răcire pornind de la inventare postulate de radionuclizi. Presiunile parțiale asigură o concentrație în faza gazoasă care poate fi eliberată instantaneu din agentul de răcire în gazul de acoperire, dar care poate fi utilizată și pentru estimarea emisiilor de gaz în alte scenarii.

Pentru radionuclizii care nu sunt reținuți în plumb sau despre care se presupune, conservativ, că nu sunt reținuți (Kr, Xe, 3H), se poate prevedea cantitatea eliberată aplicând legi gazelor ideale, cu mici erori datorită presiunilor parțiale reduse și nesemnificative în comparație cu incertitudinile în coeficienții de activitate.

În condiții de neechilibru pentru un sistem deschis (ex., pentru scenarii de accident), determinarea coeficientului de transfer de masă ar fi necesară, dar, în același timp, evaluarea lui este extrem de complexă și depinde de condițiile experimentale ale fenomenului de studiat. Formele analitice ale coeficientului de transfer de masă sunt disponibile doar pentru câteva geometrii simple și condiții limita, dar pot fi valoroase în evaluari.

Agentul de răcire și gazul de acoperire ar putea fi purificate în mod constant sau periodic cu scopul reducerii radioactivității lor în timpul operării normale. În acest sens, au fost dezvoltate la scară de laborator tehnici pentru radionuclizi specifici (ex., a se vedea [97], [98] privind îndepărtarea Po din LBE).

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.



2.10.3. Clasificare

Capacitatea de retenție a plumbului este clasificată la un nivel mediu, ținând seama de faptul că:

- Proprietățile de retenție ale plumbului, funcție de temperatură, stau la baza analizelor de securitate pentru anvelopă,
- înțelegere parțială și disponibilitatea corelației permite estimări preliminare pentru a orienta variantele de proiectare la nivel conceptual,
- Proprietățile de retenție ale plumbului sunt o posibilă oportunitate pentru unele operațiuni de întreținere a reactorului.

2.10.4. Identificarea necesităților de cercetare-dezvoltare

Rezultatele evaluărilor teoretice sunt caracterizate de o precizie limitată și nu pot fi recomandate ca unică sursă de date pentru estimările legate de analizele de securitate. În acest sens, ar trebui efectuate studii experimentale sistematice suplimentare pentru a verifica funcțiile recomandate pentru substanțele volatile, în cazul în care nu sunt disponibile date suficiente sau au fost observate neconcordanțe. O cerință și mai importantă pentru autorizarea viitoarelor instalații nucleare ce utilizează aliaje de plumb va fi dobândirea unei înțelegeri a proceselor de eliberare, altele decât evaporarea elementară.

Prin urmare, trebuie efectuată la nivel de cercetare-dezvoltare o re-determinare a retenției de radionuclizi în plumb în condiții de temperatură și concentrație de oxigen reprezentative; această activitate de cercetare-dezvoltare are prioritate medie.

2.11. Interacțiunea combustibil-agent de răcire

2.11.1. Soluții actuale și probleme deschise

În timpul operării normale a LFR dar și în condiții de accident, o fisura sau ruptura tecii poate declanșa interacțiunea dintre plumbul topit și combustibil. În prezent, eforturile de cercetare desfășurate în Europa se concentrează pe combustibili pe bază de uraniu și oxid mixt de uraniu-plutoniu și interacțiunea lor cu agentul de răcire plumb sau LBE, prin prisma calculelor teoretice și a testelor experimentale.

S-au efectuat teste experimentale asupra interacțiunii dintre pastilele de combustibil proaspăt pe bază de oxid mixt (MOX) și plumb-bismut eutectic (LBE) topit, la diferite temperaturi ale agentului de răcire (500 °C și 800 °C), ale concentrației de oxigen în LBE și pentru valori stoechiometrice ale combustibilului MOX de ($U_{0.7}Pu_{0.3}O_{2-x}$ și $U_{0.7}Pu_{0.3}O_{2.00}$). Nu s-a observat nicio interacțiune chimică (după 50 de ore în containere închise): pastilele de combustibil și-au păstrat integritatea, fără a se

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.



observa compuși de interacțiune (în stare cristalină sau amorfă), sau difuzia plumbului și bismutului în pastilă. Eliberările de actinide în LBE au fost foarte limitate (în intervalul 0,01-0,15 mg), cu valori semnificativ mai mari la testele efectuate la 800 °C cu concentrație scăzută de oxigen (1-2 mg de actinide eliberate în LBE).

În cadrul Proiectului MYRTE [102], se efectuează studii asupra unor combustibili ce conțin actinide minore ((U, Np)O₂ și (U, Am)O_{2-x}) la temperatură și concentrații de oxigen în LBE similare. Rezultatele preliminare, prezentate și în cadrul Conferinței Internaționale Nuclear 2018 de la Pitești (România), au arătat că există interacțiune între LBE și pastilele de combustibil (în câteva cazuri s-au observat pastile crăpate sau umflate), însă fără formarea de noi faze, așa cum s-a demonstrat prin difracția de raze X.

Alte teste experimentale au fost efectuate în Laboratorul ENEA Casaccia, unde specii de produși de fisiune (CeO₂, CsCl, Sbmet, KI, SrO, Eu₂O₃) au fost expuse la agentul de răcire plumb (1 oră la 450 °C, 2 ore la 1000 °C). Nu s-a observat nicio interacțiune chimică cu plumbul, chiar și pentru speciile care se topesc în timpul procesului de încălzire [103].

Sistemul multi-element / multifazic derivat din interacțiunea combustibil-agent de răcire este, de asemenea, studiat prin intermediul funcției de energie liberă Gibbs, pe baza datelor termodinamice disponibile ale tuturor speciilor chimice implicate în reacție. Pentru a depăși lipsa de date experimentale pentru majoritatea compușilor posibili, sunt folosite abordările bazate pe Teoria Funcțională a Densității combinată cu Aproximația Gradientului Generalizat (DFT-GGA) pentru a estima entalpia de formare, entropia și capacitatea termică a compușilor binari și ternari. Procesul de validare bazat pe datele experimentale disponibile a evidențiat o subestimare a solubilității, dar cu o bună predicție în ceea ce privește tendințele și solubilitatea relativă a elementelor [103].

2.11.2. Selectarea caracteristicilor și strategiilor cheie de proiectare

Testele preliminare și studiile teoretice nu prevăd existența interacțiunii chimice între combustibilii pe bază de oxid și metalele grele lichide, furnizând astfel, argumente pentru susținerea excluderii reacțiilor exoterme dintre combustibilul ars și plumb. Fisuri mici în teaca elementelor combustibile, datorate, de exemplu, defectelor de fabricație sau abaterilor locale de la condițiile nominale de functionare, pot conduce la consecințe acceptabile din punct de vedere al securității.

Cu toate acestea, rezultatele promițătoare obținute până în prezent nu îi împiedică pe proiectanți să ia în considerare necesitatea contramăsurilor de protecție a centralei împotriva degradării extinse a zonei active, ceea ce poate conduce la topirea combustibilului sau la dispersia acestuia. În funcție de densitatea agentului de răcire (funcție de temperatură) și a combustibilului (funcție de metoda de fabricație, abaterea

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.

de la stoichiometrie, ardere), pot fi necesare diferite solutii de proiectare pentru a proteja structurile interne și vasul reactorului de efectele relocării combustibilului, precum și pentru a evita scenariile care pot conduce la recriticitatea combustibilului relocat.

2.11.3. Clasificare

Interacțiunea dintre combustibil și agentul de răcire este clasificată la un nivel înalt, ținând seama de faptul că:

- Dispersia combustibilului în agentul de răcire stă la baza analizelor de securitate pentru anvelopă,
- înțelegere parțială și disponibilitatea unor date și corelații permite estimări preliminare ce conduc la excluderea reacțiilor exoterme dintre combustibil și agent de răcire.

2.11.4. Identificarea necesităților de cercetare-dezvoltare

Deși testele preliminare și studiile teoretice oferă informații promițătoare privind fenomenele de interacțiune dintre combustibil și agentul de răcire, extinderea unor astfel de teste este încă afectată de limitări și necesită investiții suplimentare. Compatibilitatea agentului de răcire (plumb) cu combustibilii avansați (ex., de tip nitrura) destinați a fi folosiți în viitorii reactori comerciali, reprezintă un factor important ce ar trebui luat în considerare în planul inovativ de dezvoltare a LFR.

Tehnicile de modelare a transportului de particule în plumb trebuie rafinate și validate pentru simularea resturilor de combustibil (din zona activă degradată) din piscina reactorului. Studiile preliminare ar oferi informații valoroase pentru definirea soluțiilor de proiectare în ceea ce privește aranjamentul sistemelor și componentelor reactorului, pentru a evita re-criticitatea zonei active sau excesul localizat de căldură de dezintegrare în structurile metalice, ca urmare a unor scenarii de accident sever/zonă activă degradată.

3. Rolul infrastructurilor experimentale în abordarea provocărilor tehnologiei LFR

Plecând de la aspectele tehnologiei LFR ce au fost identificate mai sus ca necesitând investigații suplimentare, având în vedere experiența acumulată în instalațiilor experimentale existente precum și obiectivele infrastructurii ALFRED, principalele direcții de cercetare-dezvoltare au fost clasificate astfel:

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.



-
- Studiul materialelor structurale și chimia agentului de răcire;
 - Studii privind integritatea zonei active precum și a componentelor mobile, instrumentației de monitorizare și control, mentenanței, reviziilor periodice și a reparațiilor;
 - Eficiența generatorului de abur și studii experimentale privind aspectele de securitate;
 - Analize termohidraulice;
 - Studii privind fiabilitatea pompei pentru metale grele topite;
 - Instrumentație de monitorizare și control;
 - Combustibili avansați și teste de iradiere;
 - Analize neutronice.

Pentru a avea o imagine mai clară asupra rolului instalațiilor experimentale în abordarea provocărilor tehnologiei LFR, sunt prezentate pe scurt în continuare infrastructurile existente în cadrul ENEA (Laboratul din Brasimone), precum și instalațiile din infrastructura ALFRED.

Facilități existente la ENEA (Italia)

CIRCE

Scop: Testarea comportamentului componentelor și sistemelor mari în configurație de tip piscină cu LBE (plumb-bismut eutectic).

Status: în operare

Caracteristici: Circulație naturală/forțată a agentului de răcire; Monitorare on-line a parametrilor: temperatura, presiune, debit, concentrația de oxigen.

LIFUS 5

Scop: Interacțiunea apă-metale grele lichide (HLM) la presiune înaltă

Status: în operare

Caracteristici: Volum: 100 dm³; Temperatura maximă: 500 °C; presiunea de injecție a apei: 200 bar; Debitul apei: 10 kg/s; Monitorare on-line: temperatura, presiune, deformări, etc.

HELENA

Scop: Investigatii multifuncționale (pompa, supape, ansamblu combustibil și eroziune / coroziune) în plumb

Status: în operare

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.



Caracteristici: Circulație forțată a agentului de răcire; temperatură maximă: 550 °C; viteză maximă: 2 m/s; concentrația de oxigen: $10^{-8} \div 10^{-9}$ wt.%; Monitorare on-line a parametrilor: temperatura, presiune, debit, concentrația de oxigen.

LECOR

Scop: Interacțiunea materialelor cu plumbul și chimia acestuia.

Status: în operare

Caracteristici: Circulație forțată a agentului de răcire; temperatură maximă: 550 °C; viteză maximă: 1 m/s; concentrația de oxigen: $10^{-4} \div 10^{-6}$ wt.%; Monitorare on-line a parametrilor: temperatura, presiune, debit, concentrația de oxigen.

NACIE-UP

Scop: Circulație naturală (și regimuri tranzitorii) și caracterizarea ansamblului combustibilin LBE

Status: în operare

Caracteristici: **Circulație naturală /asistată;** temperatură maximă: 500 °C; viteză maximă de a plumbului: 1 m/s; Monitorare on-line a parametrilor: temperatura, presiune, debit, concentrația de oxigen.

GIORDI

Scop: Studiul fenomenului de “fretting” (uzură prin frecare/miscare și deteriorarea prin coroziune la suprafețele de contact) al materialelor structurale în metale grele lichide

Status: în operare

Caracteristici: Volum: 5 dm³; temperatură maximă: 550 °C; concentrație oxigen: 10^{-6} wt.%; Instrumentație: măsurarea temperaturii, senzori de oxigen, măsurare deformatii; Dispozitiv de fretting cu o suprafață de contact de 10 mm², încărcare până la 50N, frecvență până la 30 Hz și amplitudinea oscilațiilor de până la 300 μm.

SOLIDX

Scop: Fenomenologia debutului solidificării/topirii plumbului și dinamica propagării

Status: achiziționare

Caracteristici: Volum: 20 dm³; Temperatura: 327÷400 °C; putere: 5 kW; Instrumentație: 64 termocuple, fereastră pentru inspecția vizuală a suprafețelor .

RACHELE

Scop: Chimia agentului de răcire, comportamentul materialelor în HLM, dezvoltarea instrumentelor și dispozitivelor de control al chimiei HLM

Status: în operare

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.



Caracteristici: Numar capsule experimentale: 10; Volum capsula: 1 dm³; Concentratie oxigen: 10⁻⁴÷10⁻⁸ wt.%; Instrumentatie: senzori de oxigen, termocuple, debitmetru de gaz, analizor de gaz, hidrometru, etc.

BIDONE

Scop: Chimia agentului de raciere, senzori de oxygen, dispozitive de indepartare a impuritatilor și dezvoltarea de instrumentatie pentru regimuri dinamice de curgere a HLM

Status: în operare

Caracteristici: Instalație de tip piscină cu plumb continand amestec de impuritati. volum: 100 dm³; temperatura: 550°C. Sistem de monitorare al gazului de acoperire, instrumentatie de monitorizare/analiza a plumbului topit.

Facilități planificate - RATEN-ICN

HELENA-2

Scop: testarea regimurilor de curgere în circuit de tip bucla, testarii casetelor de combustibil și a barelor de control din reactorii nucleari de generatie IV de tip LFR, cu aplicatie directa, pe termen scurt, la reactorul de demonstrație ALFRED.

Status: Proiect pre-conceptual

Meltin'Pot

Scop: investigarea fenomenologiei asociate accidentelor severe în sisteme nucleare cu neutroni rapizi și răcire cu plumb pur, în principal, interacția dintre combustibil, teaca și agentul de răcire.

Status: Proiect pre-conceptual

Hands-ON

Scop: testarea manipulării casetelor de combustibil și a barelor de control la scara reala a demonstratorului ALFRED.

Status: Proiect pre-conceptual

ELF

Scop: instalație experimentală de tip piscină cu plumb pur, destinată testelor de anduranță pentru funcționarea componentelor, echipamentelor și sistemelor aferente reactorului de demonstrație ALFRED, precum și a măsurării caracteristicilor de fiabilitate.

Status: Proiect conceptual

ATHENA

Scop: Instalație experimentală de tip piscină pentru testarea componentelor reactorului ALFRED la scara reală; evaluarea comportării sistemelor în configurația de tip piscină.

Status: Proiect conceptual

ChemLab

Scop: Chimia agentului de racire (plumb topit) și a gazului de acoperire din reactor, dezvoltarea sistemelor auxiliare necesare.

Status: Proiect conceptual.

ALFRED

Scop: Testarea în operare, inspecție și proceduri de mentenanță în condiții reprezentative. Demonstrarea prin aplicarea/implementarea abordării etapizate a reactorului ALFRED.

Status: Proiect conceptual

Centru de coordonare (Hub)

Este prevăzut de asemenea, un centru de conferințe multifuncțional și logistic care să ofere cele mai bune condiții de lucru, cazare și recreație pentru specialiștii care accesează infrastructura și pentru alte persoane implicate fie în activitățile de formare profesională, fie în dezvoltarea infrastructurii. Centrul este conceput, în principal, pentru:

- organizarea de întâlniri;
- seminarii și conferințe;
- educație și formare profesională pentru studenți și cercetători juniori;
- să asigure cazarea și recreere în timpul liber (cercetători, vizitatori, studenți, tehnicieni și ingineri pentru proiectarea și construcția infrastructurii);
- informații publice;
- pregătirea în domeniul radioprotecției și al culturii de securitate, pentru informare și diseminare.

Centrul va avea un design modern și ar trebui să fie extrem de atractiv pentru persoanele implicate în activitățile prevăzute.

3.1. Studiul materialelor LFR și chimia agentului de răcire

3.1.1. Coroziunea indusă de metalul lichid

Coroziunea în plumb a materialelor structurale este principala problemă a tehnologiei LFR. Subiectul este legat, în principal, de limitarea duratei de viață a componentelor. În acest context, sunt considerate următoarele probleme:

- Coroziunea în plumb a tecii de combustibil, vasului reactorului, componentelor interne și schimbătoarelor de căldură;
- Coroziunea la temperaturi înalte (această problemă este legată de dezvoltarea tehnologiei LFR pe termen lung);
- Coroziunea rotorului pompei;
- Dezvoltarea inhibitorilor de coroziune (strat de acoperire).

Până în prezent, au fost realizate numeroase experimente în condiții statice și dinamice, de durată scurtă și medie, privind coroziunea în eutecticul plumb – bismut (LBE). Doar câteva experimente au fost realizate în plumb pur (ex. CHEOPE III la ENEA). Activități de cercetare sunt încă necesare pentru a studia comportamentul materialelor structurale în plumb pe termen mediu și lung. Pentru investigarea coroziunii în metale grele topite, la ENEA, sunt disponibile următoarele instalații experimentale:

- LECOR (ENEA), $T_{\max} = 550^{\circ}\text{C}$, $v_{\max} = 1 \text{ m/s}$, Pb
- HELENA (ENEA), $T_{\max} = 550^{\circ}\text{C}$, $v_{\max} = 2 \text{ m/s}$, Pb

O buclă cu Pb capabilă să atingă o temperatură mai ridicată (cel puțin 650°C) și viteză de curgere de 2 m/s este necesară pentru dezvoltarea pe termen lung a tehnologiei LFR, precum și pentru a efectua teste specifice în condiții particulare (precum accident de bază de proiect (DBA, Design Basis Accident)).

În acest context, implementarea și funcționarea laboratorului CHEM-Lab și HELENA-2 în România va sprijini dezvoltarea tehnologiei LFR prin evaluarea problemelor de coroziune în plumb.

3.1.2. Fragilizarea și degradarea materialelor structurale la metale lichide

Determinarea rezistenței mecanice și a ductilității materialelor iradiate după expunerea îndelungată în plumb este una dintre necesitățile stringente pentru dezvoltarea tehnologiei LFR. Astfel, este necesar să se experimenteze și să se standardizeze (în scopul reproducerii pe baza unor proceduri standard) teste cu privire la:

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.



- fragilizarea materialelor structurale în metale lichide
- oboseala materialului
- alungire
- fisurare indusă de coroziune
- degradarea prin frecare indusă de vibrații a materialelor în metale lichide (“fretting”)

Aceste experimente sunt necesare și trebuie efectuate în instalații de testare în care probele sunt expuse efectelor metalelor grele topite, atât static cât și dinamic.

În prezent, există o singură instalație experimentală care permite investigarea degradării prin frecare indusă de vibrații a materialelor expuse metalelor lichide:

- GIORDI (ENEA), $T_{\max}=550^{\circ}\text{C}$, Pb și LBE

Instalațiile cu Pb dedicate investigării fragilizării, oboselii, alungirea materialelor expuse la metale grele topite până la temperatura de 650°C , cu controlul oxigenului, încă lipsesc și de aceea, reprezintă infrastructuri necesare pentru dezvoltarea tehnologiei LFR.

România intenționează să dețină o astfel de infrastructură iar CHEM-LAB va constitui suportul pentru investigarea materialelor structural cu privire la aceste probleme specifice.

3.1.3. Materiale la temperaturi înalte pentru perspective pe termen lung

Dezvoltarea completă a sistemelor de Gen IV implică creșterea temperaturilor de operare a acestora (peste 550°C). Această evoluție are ca scop îmbunătățirea eficienței termodinamice și permite dezvoltarea surselor secundare de energie. Acest obiectiv necesită testarea:

- oțelurilor de tip ODS, aliajelor refractare, aliajelor pe bază de molibden, compușilor pe bază de carbură de siliciu (SiC), materialelor în fază “MAX”;
- materialelor tratate cu straturi de acoperire dezvoltate de PLD (@IIT), Pack Cementation, TiN, etc..

Condițiile de testare corespunzătoare plumbului sunt:

- temperatura de $650-800^{\circ}\text{C}$
- viteza de 1 – 2 m/s.

În prezent, testele menționate anterior pot fi realizate în laboratorul RACHELLE (ENEA) în condiții statice.

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.



Întrucât nu sunt disponibile instalații care să permită teste de coroziune în condiții dinamice, la temperaturi de 650-800°C, este necesară dezvoltarea de infrastructuri care să satisfacă astfel de cerințe.

Infrastructura CHEM-LAB va oferi un sprijin pentru efectuarea testelor în condiții statice pentru diverse materiale (oțeluri standard, materiale cu straturi de acoperire).

3.1.4. Efectele iradierii asupra materialelor

Vasul reactorului, materialele structurale, materiale auxiliare și tecile de combustibil sunt supuse mai multor mecanisme de degradare precum iradiere, coroziune și îmbătrânire termică. În cazul sistemelor răcite cu plumb, activitățile de cercetare vizează, în general, înțelegerea, cuantificarea și prezicerea acestor efecte asupra componentelor critice ale unei instalații nucleare. Se pune accentul pe performanțele materialelor subin condiții de fragilizare, coroziune, alungire și umflare induse de iradierea cu neutroni.

Obiectivul principal este de a determina dacă iradierea va favoriza sau nu fragilizarea și coroziunea materialelor în plumb.

În prezent, cunoștințele legate de aceste probleme sunt limitate, ca atare sunt necesare investigații experimentale care să furnizeze informații privind comportarea materialelor. Un aspect important se referă la evaluarea comportării tecii de combustibil și a materialelor structurale în plumb, supuse unor temperaturi înalte și fluxului de neutroni rapizi.

În concluzie, performanțele materialelor candidate constituie principala problemă pentru dezvoltarea sistemelor LFR:

- Coroziunea în plumb sub iradiere a materialelor tratate cu straturi de protecție și fără;
- Fragilizarea indusă de iradiere a materialelor selectate;
- Alungire indusă de iradiere;
- Umflare.

Efectele iradierii asupra materialelor reprezintă o problemă critică pentru dezvoltarea sistemului LFR.

Infrastructura experimentală necesară pentru rezolvarea acestor probleme este disponibilă, în prezent, în unele instalații experimentale și reactori de cercetare (de exemplu, BOR-60 în Rusia, TRIGA în Pitești, etc.). Pe termen mai lung, ALFRED însuși, prin abordarea etapizată (în cadrul căreia sistemul este operat inițial în condițiile care pot fi realizate cu tehnologia actuală, urmat apoi de trecerea

secvențială la condițiile de operare (putere și temperaturi) considerate pentru reactorii LFR), va furniza acesta capacitate de iradiere.

3.1.5. Materiale pentru rotorul pompei

Viteza relativ mare dintre materialele structurale și metalul lichid implică faptul că rotorul pompei este supus unor condiții severe de coroziune – eroziune care ar putea să nu fie susținute pe termen lung. Materialele rotorului trebuie să satisfacă câteva cerințe, precum:

- capacitatea de a rezista la expunerea la plumb la temperaturi ridicate (până la 480°C și chiar peste, pentru perspective pe termen lung);
- capacitatea de a rezista la efectele de coroziune / eroziune induse de viteza relativ mare a agentului de răcire (între 10 m/s și până la 20m/s);
- demonstrarea fiabilității și performanțelor pompei pentru o utilizare pe termen lung.

Investigarea problemei de mai sus (testarea geometriei și materialului rotorului pompei prototip) este posibilă în buclea HELENA din cadrul ENEA.

Se urmărește dezvoltarea unei astfel de infrastructuri în România, iar CHEM-LAB și HELENA-2 pot sprijini astfel de investigații.

3.1.6. Chimia agentului de răcire

Controlul chimic al agentului de răcire și al gazului de acoperire este o problemă critică în operarea sistemelor răcite cu metale lichide. Este esențial să se contoleze concentrația de impurități datorită posibilității de activare cu neutroni a acestora, precum și datorită efectului asupra coroziunii, asupra transferului de masă sau al formării de depuneri pe suprafețele de transfer de căldură. Prin urmare, chimia agentului de răcire se referă, cu precădere, la controlul oxigenului, studiul surselor de poluare cu impurități, transferul de masă, precum și la procesele de filtrare și captare. Se identifică următoarele probleme principale:

- Controlul și purificarea agentului de răcire în timpul funcționării (adică controlul oxigenului, fiabilitatea senzorului de oxigen, filtrarea lichidului de răcire, purificarea și curățarea metalului lichid);
- Controlul gazului de acoperire (de exemplu, evaluarea radiotoxicității diferitelor elemente, calea de migrație a impurităților în gazul de acoperire, îndepărtarea impurităților din gazul de acoperire);

În prezent, testele legate de controlul oxigenului pot fi efectuate în cadrul laboratorului RACHELE (ENEA). Laboratorul nu dispune însă de instalația care urmărește studierea evaporării impurităților din metalele topite.

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provoacări specifice tehnologiei plumbului.



CHEM-LAB, ATHENA, HELENA-2 și ELFsunt concepute să acopere aceste subiecte. În acest sens, trebuie menționat faptul că aspecte specifice, cum ar fi testarea sistemelor de filtrare sau sursa și transportul produșilor de coroziune, pot fi abordate în unele instalații dezvoltate în alte scopuri (de exemplu HELENA, NACIE, CIRCE).

3.2. Studii privind integritatea zonei active precum și a componentelor mobile, instrumentației de monitorizare și control, mentenanței, reviziilor periodice și a reparațiilor

3.2.1. Manevrarea combustibilului

Sistemul de manipulare al combustibilului este utilizat pentru controlul distribuției de putere în reactor prinrelocarea ansamblurilor de combustibil, dar este responsabil și de stocarea și manevrarea ansamblurilor combustibile pe toată durata lor de viață. În cazul ALFRED, realimentarea și rearanjarea ansamblurilor de combustibil se face de la distanță cu ajutorul unei mașini care trebuie testată înainte de instalarea în reactor pentru demonstrarea capacității de funcționare în condiții de securitate. Aceasta presupune analiza și calificarea instalației prototip și a componentelor sale. În acest scop, sunt necesare următoarele activități experimentale:

- testarea la rece a componentelor (în aer);
- testarea in-situ a componentelor;
- analiza fiabilității componentelor sistemului de manipulare a combustibilului;
- teste integrale care includ strategii de recuperare a combustibilului

În acest context, dată fiind flexibilitatea sa, instalația CIRCE ar putea fi, în principiu, potrivită pentru atingerea acestor obiective.

Totuși, ținând cont de testele programate pentru proiectul actual, este necesară punerea la punct a unei noi infrastructuri experimentale pentru dezvoltarea ulterioară a tehnologiei LFR.

Din acest motiv, simulatorul Hands On va avea un rol important. De asemenea, instalația ATHENA va putea fi utilizată la testarea componentelor în plumb.

3.2.2. Structura și suportul ansamblului combustibil

Ansamblurile de combustibil susțin combustibilul în zona activă a reactorului, facilitează răcirea combustibilului și asigură protecția la radiații. Prin urmare, testarea experimentală a ansamblului combustibil este necesară pentru verificarea caracteristicilor și integrității structurale a acestuia. Se consideră următoarele aspecte:

- integritatea mecanică și structurală a ansamblului de combustibil, în legătură cu:
 - procedura de încărcare a combustibilului,
 - diferite condiții de operare;
- vibrații induse de curgere;
- interacțiunile grilelor de distanțiere dintre creioanele de combustibil.

Investigațiile descrise mai sus fac parte din studiile discutate în secțiunea anterioară și în secțiunea referitoare la termohidraulica ansamblului de combustibil. Infrastructurile HELENA-2 și ATHENA vor juca un rol relevant în abordarea unor astfel deacestor aspecte.

3.2.3. Integritatea zonei active și sisteme de securitate (barele de control)

În proiectarea zonei active este necesară evaluarea parametrilor neutronici și eficacitatea sistemelor de control și de oprire. Acestea din urmă trebuie proiectate astfel încât să asigure funcționarea normală a reactorului și oprirea acestuia în caz de accident. Această secțiune ia în considerare aspectele care implică capacitatea de răcire, integritatea și comportamentul sistemelor de control. Aspectele neutronice și de cinetica sunt descrise în paragraful următor. Se consideră necesare, următoarele investigații:

- Pierderea agentului de răcire
 - identificarea evenimentelor inițiatoare în conexiune cu mecanismele de control;
 - interacțiunea ansamblului de combustibil cu agentul de răcire;
 - mecanismele care conduc la degradarea ansamblului de combustibil până la scurgerea acestuia în sistemul de răcire primar;
 - dispersia și relocarea combustibilului în sistemul de răcire primar;
 - impactul mișcărilor seismice și ale alunecărilor de teren.
- Barele de control și mecanismele de acționare
 - testarea performanțelor mecanismelor de acționare ale barelor de control,
 - fiabilitatea mecanismelor de acționare și componentelor barelor de control,
 - impactul mișcărilor seismice și ale alunecărilor de teren: demonstrarea faptului că sistemul este calificat la accident pe bază de cutremur (DBE,

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.



Design Basis Earthquake) pentru a permite ca barele de oprire să cadă în zona activă.

Investigarea acestor probleme poate fi realizată deocamdată în instalația CIRCE din ENEA sau ATHENA și HELENA-2 aflate în curs de dezvoltare. Totuși, aceste instalații nu acoperă toate problemele legate de dezvoltarea tehnologiei LFR.

În mod special, celulele fierbinți sunt obligatorii pentru a aborda probleme precum interacțiunea ansamblului de combustibil cu agentul de răcire, degradarea ansamblului combustibil, dispersia și relocarea combustibilului în agentul de răcire.

În acest context, disponibilitatea instalației MELTIN' POT este considerată necesară pentru dezvoltarea sistemelor LFR. Aceste infrastructuri sunt dedicate în principal studiului surselor care pot duce la distrugerea zonei active, inclusiv a accidentelor nucleare severe, investigarea interacției combustibil – agent de răcire, testarea emisiilor de poloniu, dispersia combustibilului în sistemul de răcire primar.

3.3. Funcționalitatea generatorului de abur și experimente de evaluare a securității nucleare

3.3.1. Interacțiunea plumb-apă

Reactorii rapizi răciți cu plumb sunt reactori nucleari cu o geometrie tip piscină, ce presupune introducerea generatoarelor de abur (sau schimbătoarelor de caldură) în vasul reactorului. Acest lucru presupune posibilitatea interacțiunii între agentul de răcire secundar și agentul de răcire primar (plumbul). Astfel, ruperea unui tub din generatorul de abur poate prezenta un risc de securitate, și trebuie ținut cont de acest tip de eveniment în proiectarea reactorului, dar și în analiza de securitate preliminară pentru acest tip de reactor. Înțelegerea efectelor cauzate de acest tip de eveniment sunt importante pentru prevenirea și reducerea acestor efecte. În acest context, ar trebui studiate următoarele aspecte:

- Fenomene/Procese:
 - propagarea undei de presiune în sistemul primar,
 - valuri inerțiale la suprafața liberă (fluctuații),
 - Pătrunderea aburului în sistemul primar,
 - pătrunderea aburului în zona activă a reactorului,
 - interacțiunea plumb-apă/abur;
- Sisteme de detecție a rupturilor/scurgerilor;
- Măsuri de reducere a efectelor acestui tip de accident.

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.

În momentul de față, instalațiile experimentale capabile să răspundă acestor cerințe sunt: LIFUS5 și CIRCE de la ENEA.

Din punct de vedere al studierii interacțiunii LBE/plumb-apă, au fost realizate recent experimente cu ajutorul instalației LIFUS 5. Aceste teste au fost realizate pentru înțelegerea fenomenelor dar și pentru dezvoltarea și validarea modelelor numerice la o scală conformă cu instalația LIFUS 5. Astfel, datorită acestui efect de scalare, nu putem asuma prin extrapolare că rezultatele experimentale pot fi aplicabile la scala reactorului. În mod analog, modelele numerice dezvoltate și implementate în coduri de calcul necesită anumite presupuneri implicite pentru a avea capacitatea de a simula fenomenele la scala dorită.

Astfel, dezvoltarea unei noi infrastructuri cu o scală corespunzătoare este necesară pentru construcția reactorilor rapizi răciți cu plumb (LFR). Infrastructura ATHENA va permite: a) reprezentarea parametrilor de securitate la o scală corespunzătoare; b) înțelegerea fenomenelor / proceselor în condiții geometrice și de operare mai apropiate de condițiile unui reactor nuclear; c) dezvoltarea unor instrumente de calcul care vor oferi o reprezentare mai precisă a fenomenelor apărute în reactor.

3.3.2. Generatorul de abur

Generatorul de abur este instalat direct în piscina reactorului cu plumb topit. Acest lucru implică simplificarea geometriei reactorului: fara bucle în circuitul primar și fara bucle intermediare (precum în reactorii răciți cu sodium). Datorită acestui motiv trebuie acordată o importanță ridicată generatorului de abur, prin efectuarea unor studii și evaluări ce au ca scop calificarea acestuia. Studiile de calificare se referă la:

- validarea geometriei;
- izolarea generatorului sub acțiunea operatorului;
- determinarea căderilor de presiune;
- comportarea componentelor în
 - condiții normale de operare (e.g. circulație forțată sau convecție naturală);
 - anumiți tranzienți și în condiții de accident.

Cele menționate ar putea fi realizate prin intermediul instalației CIRCE (ENEA) dacă se asigură simularea ruperii unui tub al generatorului de abur (GA) în condiții de siguranță. Totuși, pentru testarea și calificarea generatorului de abur introdus în plumb, este necesară dezvoltarea unei noi infrastructuri, deoarece CIRCE folosește drept agent de răcire aliajul de plumb – bismuth eutectic (LBE). De asemenea, CIRCE nu asigură o simulare precisă a accidentului ruperii unui tub din GA, deoarece nu poate

face față în cazul unor condiții apropiate de cele din reactor (presiunea agentului de răcire din circuitul de răcire secundar).

Din motive economice, problema calificării generatorului de abur precum și investigarea efectelor produse de ruperea unui tub din generatorul de abur, ar putea fi realizate într-o instalație mai complexă, cu o scală corespunzătoare (precum ATHENA).

De asemenea, instalația ELF poate fi folosită pentru realizarea unor teste de fiabilitate, precum și teste de cuplare pompă-generator de abur, pentru perioade îndelungate de timp.

3.3.3. Sisteme nucleare auxiliare

Pe lângă generatoarele de abur, într-un reactor nuclear există mai multe sisteme auxiliare ce ar trebui calificate pentru aplicațiile nucleare. De menționat sunt următoarele sisteme:

- Sistemul de îndepărtare a căldurii reziduale (DHR, Decay Heat Removal);
- Sisteme de răcire introduse în piscina reactorului (Dip-cooler) și condensatorul de izolare;
- Sistemul auxiliar de răcire a vasului reactorului (RVACS, Reactor Vessel Auxiliary Cooling System);
- Sistemul de transport al combustibilului nuclear;
- Sistemul de transport și răcire a combustibilului uzat.

Singura infrastructura experimentală pentru testare și calificarea sistemelor auxiliare este instalația CIRCE a carei utilizare este pusă sub semnul întrebării datorită experimentelor deja planificate.

Ca urmare, dezvoltarea unor instalații experimentale cu scop multiplu este absolut necesară pentru realizarea testelor de calificare a sistemelor auxiliare. Pentru realizarea acestui scop, ATHENA, ELF și HANDS ON ar putea juca un rol important.

3.4. Termohidraulică

3.4.1. Termohidraulica sistemelor HLM de tip piscină

În ultimii ani, cercetarea aspectelor termohidraulice corespunzătoare metalelor grele lichide s-a realizat în Italia și în alte țări din Europa, dar sunt încă probleme rămase deschise. Obiectivele principale ale activităților legate de termohidraulica reactorilor de tip piscină sunt următoarele: 1) colectarea datelor experimentale pentru anumite geometrii sau condiții de securitate ce ar putea să ajute la înțelegerea

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.



fenomenelor/proceselor la nivelul componentelor și al sistemelor. 2) generarea unor baze de date pentru a facilita dezvoltarea și demonstrarea capabilităților de simulare a codurilor de calcul relevante pentru proiectarea reactorului dar și din considerente de securitate.

Din punct de vedere al fenomenelor termohidraulice relevante, putem identifica:

- tipare de curgere în cazul convecției forțate:
 - amestecare,
 - stratificare (inducând eforturile termice),
 - zone stagnante,
 - oscilații la nivelul suprafeței;
- tranziția la curgerea generată de flotanță;
- curgerea în cazul circulației naturale
 - pierderi de presiune
 - oscilații la nivelul suprafeței;
- interacțiunea dintre fluid și materialele structurale;
- fenomenul de oboseala termică
- mișcări neregulate ale agentului de răcire produse de fenomene seismice.

În Italia, singura instalație experimentală capabilă să asigure o testare adecvată a celor menționate mai sus este CIRCE (ENEA).

Totuși, echiparea instalației CIRCE cu instrumentația necesară nu este suficientă și trebuie prevăzută o nouă instalație care să asigure investigarea comportării termohidraulice în cazul geometriilor de tip piscină.

În acest scop, constuirea și operarea ATHENA și ELF este obligatorie. În ceea ce privește testarea seismică, la ENEA sunt disponibile platforme ce vibrează și sunt corespunzătoare pentru investigarea mișcării fluidului la o scală mai mică. Ar putea fi necesară o infrastructură dedicată investigării acestei probleme.

În concluzie, investigarea problemelor legate de termohidraulica geometriilor tip piscină este un pas important în dezvoltarea reactorilor rapizi răciți cu plumb.

3.4.2. Termohidraulica ansamblului combustibil

Termohidraulica ansamblului de combustibil are ca obiectiv dezvoltarea unor geometrii care să asigure condiții optime pentru realizarea transferului de căldură dintre elementul combustibil și agentul de răcire. Ansamblul de combustibil trebuie să demonstreze capacitatea de a rezista la iradiere, temperaturi ridicate, eforturi

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.

mecanice și agenți corozivi, fără degradarea proprietăților mecanice și geometrice. Este necesară investigarea termohidraulică și hidrodinamică a ansamblului de combustibil pentru condiții variate de operare. Astfel, definim următoarele obiective: 1) colectarea de date experimentale pentru geometrii și condiții limita similar cu cele din reactor; 2) generarea de baze de date pentru a facilita dezvoltarea codurilor de calcul dar și validarea lor.

Testarea ansamblului de combustibil pentru determinarea parametrilor termohidraulici (pierderi de presiune, distribuția curgerii, câmp de viteze, temperatura tecii, etc) pe baza caracteristicilor geometrice, cum ar fi: rețeaua elementelor combustibile, geometria sub-canalului, distanțieri. Astfel, se identifica următoarea listă de aspecte ce trebuie investigate:

- transferul de căldură în convecție forțată și naturală (și tranziția dintre aceste curgeri);
- distribuția de curgere în sub-canal;
- distribuția de temperatură în teacă;
- pierderea presiunii;
- interacțiunea dintre materialele structurale și fluid;
- vibrații induse de curgere;
- frecările dintre distanțier și teacă;
- curbarea ansamblului de combustibil.

Un aspect important ar fi determinarea surselor de deteriorare a zonei active și consecințele acestora.

În momentul de față nu există instalații experimentale pentru testarea acestor aspecte. În cadrul ENEA sunt trei instalații experimentale funcționale (CIRCE, NACIE și HELENA), în timp ce ATHENA, HELENA-2 și ELF (pentru teste de fiabilitate de lungă durată) sunt propice pentru investigarea aspectelor discutate mai sus. Pe baza caracteristicilor ansamblului de combustibil, în aceste instalații pot fi dezvoltate secțiuni de testare specifice.

3.4.3. Teste integrale

Testele integrale, sunt în principiu, aplicabile condițiilor dintr-un reactor nuclear. Totuși, datele experimentale pot fi extrapolate la scala dorită, dacă secțiunile de testare și condițiile inițiale și cele limita sunt scalate într-un mod corespunzător. Scalarea nu va afecta evoluția proceselor fizice importante pentru postularea scenariului de accident. Datele obținute vor fi evaluate, iar pe baza acestor evaluări se

va determina valabilitatea datelor pentru aplicarea lor în analizele de securitate ale reactorului.

Pe de altă parte, testele integrale sunt fundamentale pentru susținerea dezvoltării și demonstrării capabilităților codurilor de calcul în simularea condițiilor dintr-un reactor, în cazul unui scenariu de accident (în principiu, acesta este o cerință în procesul de licențiere). Se pot identifica următoarele obiective și domenii de studiu:

- investigarea fenomenelor și proceselor la nivel de sistem în conexiune cu aspectele de proiectare, securitate și operare;
- simularea și analizarea unui spectru variat de accidente;
- proceduri de reducere a efectelor unui accident;
- testarea de componente;
- probleme de scalare;
- generarea de baze de date pentru procesul de licențiere;
- evaluarea și validarea codurilor de calcul.

În prezent, numai CIRCE și instalațiile planificate ATHENA și ELF sunt potrivite pentru realizarea într-o anumită măsură a acestor teste integrale. Disponibilitatea acestor instalații experimentale a fost evaluată satisfăcător pentru a rezolva problemele legate de testarea integrală.

3.5. Studii privind coroziunea/eroziunea pompelor utilizate în HLM

3.5.1. Pompele principale

Pompa principală este o componentă esențială pentru dezvoltarea tehnologiei LFR. Relevanța acestei componente în raport cu securitatea reactorului și contactul direct cu agentul de răcire reprezintă motivele principale pentru care trebuie acordată o atenție deosebită studiului acesteia. Pompele din sistemele nucleare sunt componente de maximă importanță pentru securitatea reactorului, motiv pentru care este necesară asigurarea riguroasă a calității lor în procesul de fabricație. În plus, evenimentele postulate în cerințele de securitate nucleară și cerințele de licențiere se referă la defectarea pompelor agentului de răcire (de exemplu, defectare simplă sau multiplă, blocarea rotorului și deteriorarea arborelui).

În acest context, sunt necesare investigații experimentale privind materialele utilizate, caracteristicile pieselor mecanice (de exemplu, rotorul, rulmenții și carcasa), testele de performanță și fiabilitate a componentelor. Activitățile de cercetare și dezvoltare

legate de materialul rotorului pompei au fost deja conturate. Alte activități sunt conectate cu:

- teste de caracterizare a rulmenților;
- testarea integral a pompei în vederea
 - stabilirii performanțelor pompei
 - fiabilitatea pompei pe termen lung.

În CIRCE, testele preliminare pot fi efectuate pe o machetă redusă.

Dintre instalațiile experimentale disponibile, doar ATHENA pare adecvată pentru a efectua teste privind performanțele pompelor principale.

Testele pentru determinarea fiabilității pe termen lung pot fi realizate în instalația ELF.

3.6. Instrumentație

Date fiind temperaturile mari, fluxul rapid de neutroni, efectele de coroziune și opacitatea plumbului, tehnologia LFR impune cerințe ridicate în privința instrumentației.

Principalele probleme care reduc semnificativ opțiunile sunt condițiile dure de mediu din reactor. Instrumentația trebuie să ofere răspuns adecvat și la temperaturi situate în afara regimului normal de funcționare pentru a putea observa eventualele anomalii mergând până la situații de accident. O necesitate în proiectarea tehnologiei HLM constă în înțelegerea și dezvoltarea materialelor și structurilor capabile să funcționeze o perioadă lungă de timp în condițiile descrise mai sus.

Mai mult, poziția instrumentelor într-un sistem are influență asupra performanței acestora.

În continuare, este raportată o privire de ansamblu calitativă asupra instrumentelor disponibile pentru tehnologia LFR (Tabelul 3.6). În tabel referirea la „tehnologia disponibilă” necesită activități de cercetare și dezvoltare pentru adaptare și / sau îmbunătățire astfel încât să răspundă nevoilor specifice.

Table 3.6. – Sumarul instrumentației disponibile

	LFR
Monitorizare neutronică și gama	Tehnologia Disponibilă
Detectarea defecțiunilor în creionul de combustibil	Solutii Disponibile
Date termohidraulice	Tehnologia Disponibilă
Controlul chimiei fluidelor	Tehnologia Disponibilă
Deplasări/Vibrații	Tehnologia Disponibilă
Detectarea scurgerilor în sistemul primar/secundar	Tehnologie demonstrata
Defectările în interiorul vasului	Tehnologia nu este demonstrată
ISI&R	Tehnologia nu este demonstrată
Manipulare de la distanță	Tehnologie Disponibilă

Așa cum se poate observa, pentru majoritatea tehnologiilor există soluții pentru condiții „în afara reactorului” sau sunt în prezent în etapa de îmbunătățire și de calificare. Pentru tehnologiile utilizate „în reactor”, îmbunătățirea și calificarea trebuie inițiate și promovate, în special în ceea ce privește îmbătrânirea și dimensiunea acestora.

O altă problemă este domeniul larg de operare pentru instrumentația din interiorul zonei active (detectorii de neutron), precum și pentru instrumentația din sistemul de protecție al reactorului (RPS). Instrumentația legată de securitatea nucleară se concentrează pe monitorizarea de bază și detectarea abaterilor timpurii de la funcționarea normală și / sau stări locale anormale (de exemplu, degradarea unui

creion de combustibil, insertia de reactivitate datorata patrunderii gazului, blocarea unui subansamblu, mișcarea neintenționată a barelor de control).

Pentru înțelegerea instrumentației reale disponibile și, astfel, pentru a planifica activitățile de cercetare și dezvoltare în această problemă, ar trebui luate în considerare următoarele elemente: Diversitate, Incertitudine, Aplicabilitate, Robustețe, Timp de Răspuns și Spațiu Necesar (pentru instrumentația din interiorul zonei active).

Pentru diversitate există două posibilități: dispozitivul de detectare este unic adică nu există un sistem divers, sau există sisteme diverse disponibile. Cercetările desfășurate până în prezent privind securitatea nucleară au arătat că prezența sistemelor redundante poate fi insuficientă în cazul unei defecțiuni de cauza comuna. Astfel, diversificarea instrumentației este necesară.

Incetitudinea include eroarea senzorului, erorile din timpul procesării datelor și măsurarea eronată din cauza integrării. Instrumentele disponibile pot fi clasificate în:

- Incertitudine scăzută ($<2\%$ în funcționare normală și $<5\%$ în situații de accident)
- Incertitudine ridicată (acceptabilă numai dacă nu se poate utiliza alt sistem)

Se impune evitarea utilizării instrumentației cu incertitudine ridicată, pe cât posibil.

Aplicabilitatea oferă informații despre disponibilitatea unui dispozitiv de a fi utilizat pentru fluxuri mari de neutroni și radiație gamma în zona activă.

Până în prezent, patru domenii diferite de operare au fost identificate pentru sistemele nucleare:

- operare normală,
- situații de accident,
- inspecție și revizie normală (manipularea combustibilului),
- inspecție și reparații excepționale.

Instrumentația utilizată în zona activă trebuie calificată pentru orice domeniu de operare.

Robustețea se referă la capacitatea instrumentației de a rezista peste limita de funcționare și / sau de a rezista sarcinilor mecanice, termice sau electrice din dispozitiv. Acest lucru este important pentru instrumentația din zona activă, deoarece capacitățile ISI&R (inspecție in-service și reparare) ale reactorilor LFR sunt limitate. Instrumentația robustă este o componentă esențială pentru cerințele de securitate.

Timpul de răspuns este întârzierea înregistrată între semnalul fizic din poziția senzorului și răspunsul sistemului I/C din camera de control. Există diferite motive pentru apariția timpilor de întârziere, cum ar fi, inerția termică ridicată, timpul de

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.



deplasare din cauza distanțelor mari față de senzor (liniile de prelevare), timpul de măsurare pentru îmbunătățirea statisticilor și timpul de calcul (senzori tomografici). Timpul de răspuns poate varia între zecimi până la zeci de secunde.

Spațiul necesar este ușor de explicat: două termocuple (TC) utilizate ca senzor de debit necesită mai puțin spațiu decât un contor electromagnetic, un debitmetru vortex sau cu orificiu. Spațiul necesar include montare, carcasă, alimentare, spațiu suplimentar pentru condiții de intrare, cabluri etc. Acest exemplu arată că, în general, este dificil de cuantificat spațiul necesar.

O altă problemă care trebuie luată în considerare este interferența / integrarea cu sistemul din punct de vedere al dinamicii lichidului, semnalului electric (LM), neutronică și aranjamentului mecanic.

Pentru a obține o calificare completă pentru instrumentația inovatoare din interiorul zonei active, care nu au fost aplicate niciunui sistem nuclear, este nevoie de calificare de bază în reactorii prototip.

Acesta este un pas esențial în definirea unei foi de parcurs: instrumentația utilizată în vasul reactorului și, mai cu seamă, instrumentația din interiorul zonei active, trebuie să fie calificată în două etape:

- în condiții bine definite care acoperă întregul spectru de operare pentru a obține precizie
- împreună cu instrumente diferite (diverse) într-un mediu prototip (de exemplu, senzori de temperatură la ieșirea din subansamblu, senzori de curgere la intrarea în subansamblu.)

Cercetarea și dezvoltarea necesară pentru dezvoltarea instrumentației poate fi realizată în infrastructura de cercetare care va fi dezvoltată în România, profitând de experiența acumulată la nivel mondial în domeniul tehnologiei de vârf (de exemplu, Italia, Belgia, China etc.)

3.7. Testarea combustibilului iradiat

În ceea ce privește dezvoltarea tehnologiei LFR, a fost deja evidențiat faptul că rămâne o problemă deschisă calificarea materialelor structurale și a combustibilului avansat în camp de radiații. Pentru evaluarea unor astfel de probleme, sunt necesari reactori de testare a materialelor, reactori de testare a tranzienților, precum și celule fierbinți. În cele ce urmează sunt prezentate nevoile de cercetare și dezvoltare pentru dezvoltarea LFR.

Combustibilul prevăzut a fi utilizat în LFR este combustibil de tip MOX standard întecuit în oțel de tip 15-15 Ti (AIM-1) cu / fără acoperire.

3.7.1. Efectele iradierii asupra tecilor

Este necesară completarea bazei de date privind performanțele la iradiere a materialelor candidate:

- Interacțiunea teacă-agent de răcire
 - Coroziunea în plumb sub iradiere
 - Comportarea tecilor degradate
 - Fragilitatea materialelor iradiat selectate (e.g. AFA, 15-15 Ti, AISI316L)
- Defecte cauzate de iradiere (sarcini mecanice, gaze de fisiune) (în principiu tehnologia este cunoscută pentru toate materialele mai puțin stratul de acoperire)
- Umflarea la iradiere (în principiu tehnologia este cunoscută pentru toate materialele mai puțin stratul de acoperire)
- Interacțiunea dintre stratul de acoperire și agentul de răcire
- Integritatea stratului de acoperire.

O instalație capabilă să efectueze aceste teste se află în Dimitrovgrad (Rusia): reactorul BOR 60. Insusi demonstratorul ALFRED, în condițiile de implementare etapizată, poate contribui la realizarea acestor teste.

Recent, iradierea cu ioni grei a fost folosită pe scară largă pentru testele preliminare / de screening; iradierea cu neutroni este însă relevantă și este totuși necesară în procesul de licențiere.

Cercetarea și dezvoltarea precum și calificarea combustibilului este realizată pentru tehnologia pe bază de sodiu (ținând cont de faptul că se utilizează combustibil de tip MOX) cu unele ajustări datorate utilizării plumbului și a geometriei diferite a creionului de combustibil.

Mai jos sunt prezentate răspunsurile obținute pe baza reactorilor cu sodiu și a celor rapizi reproducători FBR R&D (Phénix, SNR, Monju, Superphénix):

- Comportarea creionului de combustibil MOX în condiții normale de operare
 - Eliberarea gazelor de fisiune, restructurarea combustibilului și umflarea acestuia
 - Umflarea tecii de combustibil, fragilitatea indusă de iradiere, corozia (doar peretele interior al tecii, pe partea de contact cu combustibilul), interacțiunea teacă - produși de fisiune, oboseala tecii, alungire (fluaj)

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.



- Evoluția tecii și a combustibilului.
- Evaluarea marginilor de degradare

Limitat la deteriorarea și distrugerea tecii în caz de supraîncălzire locală, umflarea combustibilului și a tecii, tranzienți, fragilizarea indusă de iradiere (este necesară adaptarea la noua geometrie).

- Stabilirea condițiilor maxime de exploatare pentru combustibil
 - Condiții normale de operare;
 - Condiții de funcționare anormală;
 - Accidente postulate.

Cerințe suplimentare de R&D:

- Interacțiunea teacă-agent de răcire
- Interacțiunea combustibil-teacă-agent de răcire
- Interacțiunea topitură – agent de răcire
 - Dispersarea și relocarea combustibilului în agentul de răcire
 - Stabilitatea chimică a topiturii
- Distrugerea creionului de combustibil
 - Insuficientă experiență anterioară
- Baza de date privind comportarea ansamblului în cazul blocajului (mic sau mare) curgerii agentului de răcire
- Daune maxime acceptabile în subansamblul combustibil

În UE, studiile privind aspectele de securitate nucleară pot fi realizate, momentan, în două instalații: TRIGA-ACPR (ICN, Pitești, România) și CABRI (IRSN-CEA, Franța). De asemenea, UE intenționează construirea instalațiilor JHR, MYRRHA și ALFRED.

Pe plan mondial, sunt disponibile și alte instalații precum HFIR, ATR (SUA); JOYO, MONJU (Japonia); BOR60, BN600 (Rusia); FBTR (India); CEFR (China), care pot reprezenta suport pentru studiile viitoare de cercetare și dezvoltare.

Mai mult, instalația BOR60 este utilizată pentru campaniile de testare a materialelor necesare cercetării și dezvoltării tehnologiei LFR / MYRRHA (cu un cost de aproximativ 0,5M € pe un an de campanie). Cu toate acestea, trebuie să se verifice gradul de adecvare și disponibilitatea acestor instalații. De exemplu BOR60, are o zonă activă destul de compactă, ceea ce conduce la capacități volumice de iradiere

limitate. În prezent, Japonia nu dispune de instalații de iradiere cu neutroni rapizi iar accesul la instalațiile din China nu este facil.

Mai mult, trebuie clarificate problemele privind asigurările și autorizațiile de transport (în special pentru materialele iradiate, dar chiar și pentru probe neiradiate).

Din acest motiv, realizarea proiectului ALFRED în România, ca parte a infrastructurii de cercetare, ar putea juca un rol extrem de important pentru întreaga cercetare și dezvoltare a reactorilor rapizi în întreaga lume.

În ceea ce privește studiul comportamentului mecanic al materialelor structurale iradiate, testele trebuie efectuate la temperaturi ridicate. Pentru majoritatea testelor, fluența integrată este parametrul principal, deci valoarea exactă a fluxului rapid nu este crucială, dar oricum ar trebui să fie cel puțin de ordinul a 10^{14} n / cm²s pentru a atinge fluența necesară într-un timp rezonabil. Pentru unele aspecte de cercetare precum coroziunea și interacțiunea teacă-agent de răcire, iradierea trebuie să aibă loc în condițiile relevante pentru LFR.

3.8. Neutronică

Din punct de vedere neutronic, este imposibil de calificat un prototip al unui reactor nuclear. Din acest motiv, trebuie evaluată încrederea în rezultatele simulărilor furnizate de codurile de calcul disponibile. La nivel mondial, sunt disponibile numeroase astfel de coduri de calcul dar accentul a fost pus pe cele care au fost deja validate pe baza reactorilor existenți. Totuși, aceste coduri au fost aplicate în mare parte reactorilor termici răciți cu apă ușoară, LWR (de exemplu, codul MCNP) și reactorilor rapizi răciți cu sodiu, SFR (de exemplu, codul ERANOS). Astfel, extinderea validității acestor coduri în domeniul sistemelor LFR rămâne principala problemă deschisă. În plus, dezvoltarea durabilă a sistemelor de Gen-IV (de exemplu arderea actinidelor minore) precum și implementarea sistemelor LFR comerciale necesită reducerea incertitudinilor datele nucleare.

Mai jos, sunt redate principalele probleme apărute în evaluările neutronice din sistemele nucleare:

- Calificarea codurilor de calcul necesare licențierii și operării sistemelor LFR
 - Validarea estimărilor privind masa critică;
 - Validarea eficacității barelor de control;
 - Validarea estimărilor privind gradientii de flux;
 - Validarea estimărilor privind efectele de reactivitate (efectul de temperatură în combustibil - Doppler, efectul de temperatură în agentul de răcire etc.);
 - Validarea ecuației de transport a neutronilor în plumb;
 - Validarea estimărilor privind protecția biologică.

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.



- Validarea măsurătorilor necesare îmbunătățirii datelor nucleare
 - Reducerea incertitudinii secțiunilor de interacție cu neutroni ale Pb, ^{238}U , ^{241}Pu etc.;
 - Reducerea incertitudinii secțiunilor de interacție ale actinidelor minore.

Experimentele de validare sunt realizate prin teste integrale, în principal, în reactorii nucleari de putere zero. Sistemele europene de acest tip sunt prezentate în tabelul următor.

Tabelul 3.8 – Reactorii europeni de putere zero

Instalația	Caracteristici principale	Disponibilitate	Relevanță
MASURCA	Reactor rapid pentru măsurători de rețea – reactivitate, reflector și protecție biologică compactă	2017	Mare
VENUS	Reactor rapid destinat cercetării și dezvoltării sistemelor SFR, LFR și ADS	2011	Mare
LR-0	Reactor termic de tip VVER cu mai multe zone, inclusive zone de spectru rapid	Acum	Medie
TAPIRO	Reactor rapid destinate studiilor dozimetrice și de protecție biologică	Acum	Mare

O anumită experiență privind tehnologia LFR a fost acumulată în instalația VENUS, în special în ceea ce privește masa critică, eficacitatea barelor de control și efectul de temperatură în agentul de răcire.

După efectuarea experimentelor, configurația reprezentativă pentru LFR a fost demontată. Cu toate acestea, sunt necesare experimente suplimentare care ar putea fi realizate în celelalte instalații menționate.

Experimentele privind secțiunile de interacție cu neutroni ale materialelor de interes sunt realizate în instalații dedicate, precum: European n-TOF (la CERN) și EUFRAT (la JRC în Geel) sau în reactori de putere zero având spectrul de neutroni potrivit pentru realizarea acestora (TAPIRO).

3.9. Sinteza principalelor direcții de cercetare - dezvoltare

Studiile și evaluările efectuate au condus la identificarea principalelor direcții de cercetare – dezvoltare și a nivelului lor de prioritate a caror sinteza este prezentată în Tabelul 3.9.

Domeniu	Nivel de prioritate	Necesar activități de cercetare-dezvoltare
Coroziune	Inalt	- Dezvoltarea sau îmbunătățirea proceselor de producție pentru noi materiale și acoperiri (fiabilitatea procesului la scară industrială, investigarea fabricării și tehnicilor de îmbinare, definirea noilor standarde de calificare, etc). - Caracterizarea completă a materialelor și a noilor tipuri de acoperiri (compatibilitatea cu plumbul topit și integritatea structurală asociată, efectul iradierii, comportamentul la fluaj, oboseală și „fretting” (uzură și uneori deteriorarea prin coroziune a suprafețele de contact prin frecare, vibrații, etc.).
Error! Reference source not found. ziune	Mediu	- Îmbunătățirea materialelor de tip „MAX phase” (ce îmbină proprietăți mecanice și termice deosebite cu rezistența la coroziune și toleranța la iradierea cu neutroni) privind prelucrabilitate, manevrabilitate, ductilitate, rezistență la uzură, etc). - Dezvoltarea acoperirilor care vor fi depuse pe materialul de bază din oțel (rezistență la uzură, aderență, regenerare, ...). - Dezvoltarea / îmbunătățirea proceselor de producție pentru materiale / acoperiri sau tehnici inovatoare (de exemplu, sinterizare în plasmă). -Funcționare fiabilă pe termen lung.
Chimia plumbului	Inalt	- Optimizarea procesului de control al oxigenului (în configurații de tip piscină, amplasarea instrumentatiei de monitorizare, amplasarea / eficacitatea dispozitivelor de control al concentrației oxigenului). - Optimizarea procesului de control al impurităților (în configurații de tip piscină, locația prelevării de plumb, tipul și locația dispozitivelor de filtrare și extragere a impuritatilor). - Fiabilitatea și precizia instrumentației (inclusiv senzorul de oxigen, tehnicile de monitorizare a impurităților). - Studiul fenomenelor de bază ale transferului de masă într-un sistem de tip piscină pe termen lung. - Extinderea tehnicilor de monitorizare și control a oxigenului și a impurității în lichid conduce la dezvoltarea facilităților de testare a materialelor.

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.



Domeniu	Nivel de prioritate	Necesar activități de cercetare-dezvoltare
Racirea plumbului	Mediu	-Înțelegerea parametrilor care conduc la solidificarea și topirea metalelor grele lichide. - Evaluarea modelelor de solidificare din aplicațiile convenționale de turnare industrială. -Testele experimentale ce vizează observarea și înțelegerea modului de formare a frontului de solidificare. - Dezvoltarea modelelor de calcul de dinamica fluidelor (CFD) și verificarea / validarea rezultatelor.
Analize seismice	Inalt	- Revizuirea și aplicabilitatea standardelor și metodologiilor utilizate în industria nucleară. -Verificarea datelor suplimentare necesare pentru calificarea izolatorilor seismici necesară în procesul de licențiere a reactorului.
Flotabilitate	Scazut	-Revizuirea experimentelor pentru identificarea potențialului prejudiciu legat de regimul de convecție mixtă. -Evaluarea geometriilor neconvenționale ale piscinei reactorului și a modelelor de curgere la schimbătorul de căldură (modelare și validare CFD prin experimente la scara redusă) . -Proiectarea și calificarea soluțiilor pentru componentele mecanice (sisteme de fixare, sisteme de manipulare).
Opacitatea plumbului	Mediu	-Verificarea compatibilității tehnicilor existente (dezvoltate și utilizate în apă, sodiu sau LBE la temperaturi mai mici). -Dezvoltarea de noi tehnici dedicate scanării / reconstrucției sub plumb, examinării nedistructive sub plumb. -Îmbunătățirea tehnicilor existente sau recent dezvoltate pentru a reduce timpul de întrerupere a instalației pentru inspecții planificate și neplanificate. -Definirea strategiei și identificarea / dezvoltarea echipamentelor necesare extragerii componentelor pentru examinarea și repararea în afara piscinei. -Definirea strategiei și identificarea / dezvoltarea echipamentelor necesare drenării parțiale a sistemului de răcire a reactorului.

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.



Domeniu	Nivel de prioritate	Necesar activități de cercetare-dezvoltare
Toxicitatea plumbului	Scazut	-Revizuirea ghidurilor, recomandărilor și a obligațiilor stipulate în legislația națională.
Procesul de curățare (îndepărtare) a plumbului	Scazut	-Încorporarea procedurilor de curățare a plumbului încă din stadiul de proiectare a reactorului/componentelor/instalațiilor (prin cerințe de dispunere a acestora pentru facilitarea dirijării componentelor către zonele de curățare și alocarea spațiului pentru sistemele auxiliare necesare).
Retenția elementelor radio-toxice	Mediu	-Revizuirea sistematică a funcțiilor recomandate pentru eliberarea de radionuclizi. -Înțelegerea proceselor de eliberare a elementelor diferite de procesul de evaporare a acestora. -Re-determinarea experimentală a retenției de radionuclizi în plumb în condiții reprezentative pentru reactorul răcit cu plumb (valorile de temperatură și concentrația de oxigen).
Interacțiunea combustibil-plumb topit	Înalt	-Extinderea proprietăților termodinamice ale speciilor chimice prin mijloace teoretice și experimentale. -Extinderea studiilor la combustibili nucleari avansați de interes pentru producția industrială. -Tehnici de modelare (simulare) pentru antrenarea și transportul particulelor de combustibil / reziduurilor în plumbul topit.

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.



Concluzii

Expertiza acumulată în operarea infrastructurilor experimentale existente precum și în activitățile de cercetare dedicate dezvoltării de noi modele de calcul și simulare a fenomenologiei complexe LFR nu este de neglijat. Cu toate acestea, înainte de a aborda problema implementării industriale, sunt necesare noi eforturi pentru a asigura o bază robustă în abordarea provocărilor de securitate nucleară și a cerințelor de licențiere, precum și pentru furnizarea întregului suport necesar dezvoltării și implementării opțiunilor tehnice ce asigură o competitivitate superioară.

Investigațiile și evaluările efectuate și prezentate în acest raport privind identificarea aspectelor tehnologiei LFR care necesită investigații suplimentare datorită impactului acestora asupra securității nucleare și funcționării în condiții de siguranță a instalațiilor nucleare, a soluțiilor tehnologice inovative, precum și a oportunităților oferite de dezvoltarea și viitoarea implementare în România a unor infrastructuri experimentale noi (HELENA-2, ELF, METIN POT și HANDS ON) au condus la identificarea principalelor direcții de cercetare – dezvoltare și a nivelului lor de prioritate.

În acest cadru, s-a demonstrat că infrastructura ALFRED, dacă este susținută de un program dedicat de cercetare și dezvoltare, este capabilă să facă față nevoilor și provocărilor viitoare ale tehnologiei LFR.

Acest lucru se datorează în primul rând faptului că infrastructura ALFRED este capabilă să îmbine în mod cuprinzător nevoile de cercetare și dezvoltare cu strategiile de diminuare a unor efecte încă din faza de proiectare oferite de abordarea sa etapizată, exploatând utilizarea de soluții tehnologice cu un nivel consistent de dezvoltare.

În acest fel, infrastructura ALFRED este capabilă să umple lacunele existente, precum și să sprijine opțiuni și strategii tehnologice alternative pentru prevenirea sau atenuarea riscurilor asociate.

Mai mult, ALFRED este considerat un candidat credibil și valoros ca reactor de tip modular răcit cu plumb, reprezentând astfel o oportunitate pe termen scurt de a exploata comercial tehnologia LFR.

Referințe

1. Handbook on Lead-bismuth Eutectic Alloy and Lead Properties, Materials Compatibility, Thermalhydraulics and Technologies, OECD/NEA No. 7268 (2015).
2. “Liquid metal embrittlement susceptibility of ferritic–martensitic steel in liquid lead alloys”, J. Van den Bosch, R.W. Bosch, D. Sapundjiev, A. Almazouzi, Journal of Nuclear Materials 376 (2008) 322–329.
3. Liquid-metal corrosion of steel in HLM, KIT. Heavy Liquid Metal Summer School (2015) (<https://publikationen.bibliothek.kit.edu/230103308/3816984>).
4. “Long term corrosion resistance of alumina forming austenitic stainless steels in liquid lead”, J.Ejenstam, P. Szakalos, Journal of Nuclear Materials 461 (2015) 164–170.
5. “Behavior of steels in flowing liquid PbBi eutectic alloy at 420–600 °C after 4000–7200 h”, G. Muller, A. Heinzl, J. Konys, G. Schumacher, A.Weisenburger, F. Zimmermann, V. Engelko, A. Rusanov, V.Markov, J. Nucl. Mater., 335 (2004) 163-168
6. Corrosion resistant alumina-forming alloys for lead-cooled fast reactors Doctoral Thesis in Chemistry Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden 2015
7. Oxide-Dispersed-Strengthened Alloys in Nuclear Design Max Quinn, Submitted as coursework for PH241, Stanford University, Winter 2012
8. Structural Materials for Generation IV Nuclear Reactors, pp.441-470-SiCf/SiC composites as core materials for Generation IV nuclear reactors. OI: 10.1016/B978-0-08-100906-2.00012-4
9. “A review of refractory metal alloys and mechanically alloyed-oxide dispersion strengthened steels for space nuclear power systems”, M. S. El-Genk, J. M. Tournier, Journal of Nuclear Materials 340 (1):93-112 (2005).
10. F. García Ferré, A. Mairov, D. Iadicicco, M. Vanazzi, S. Bassini, M. Utili, M. Tarantino, M. Bragaglia, F.R. Lamastra, F. Nanni, L. Ceseracciu, Y. Serruys, P. Trocellier, L. Beck, K. Sridharan, M.G. Beghi, F. Di Fonzo, “Corrosion and radiation resistant nanoceramic coatings for lead fast reactors”, Corros. Sci. 124 (2017) 80-92.
11. Kondo, M. et al., “Metallurgical Study on Erosion and Corrosion Behaviors of Steels Exposed to Liquid Lead-bismuth Flow”, Journal of Nuclear Materials, Vol. 343, pp. 349-359 (2005).
12. Rishel, D.M., F.S. Pettit and N. Birks, “Some Principle Mechanisms in the Simultaneous Erosion and Corrosion Attack of Metals at High Temperatures”, Materials Science and Engineering A, 143, p. 197 (1991).

13. Yachmenyov, G.S. et al., "Problems of Structural Materials Corrosion in Lead-bismuth Coolant", Proceedings of Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technology, Vol. 1, Obninsk, Russian Federation, pp. 133-140 (1999).
14. J.-L. Courouau, F. Balbaud-Célérrier, V. Lorentz, T. Duffrenoy, "Corrosion by liquid sodium of materials for sodium fast reactors: the CORRONa testing device", Proceedings of ICAPP 2011, Nice, France (2011).
15. Weisenburger, A. et al., "T91 Cladding Tubes with and without Modified FeCrAlY Coatings Exposed in LBE at Different Flow, Stress and Temperature Conditions", Journal of Nuclear Materials, Vol. 376, pp. 274-281 (2008).
16. Barsoum, M. et Radovic, M., "Mechanical Properties of the MAX Phases", Annual Review of Materials Research, 41. 195-227 (2011).
17. Wan D, Zhou Y, Hu C, et al. "Improved strength-impairing contact damage resistance of Ti₃Si(Al)C₂/SiC composites", J Eur Ceram Soc 2007, 27: 2069–2076 (2007).
18. Gessi A., Weisenburger A., Deliverable D38 of 6th Framework Programme, Project ELSY FI6W – 036439 (2010).
19. Desportes, C. et al., Électrochimie des solides, EDP Sciences – Presses universitaires deGrenoble, ISBN 2.7061.0585.1 (1994).
20. S. Bassini, A. Antonelli, I. Di Piazza, M. Tarantino, "Oxygen sensors for heavy liquid metal coolants: Calibration and assessment of the minimum reading temperature", J. Nucl. Mater. 486 (2017) 197-205.
21. G. Manfredi, J. Lim, K. Rosseel, J. Van den Bosch, Th. Doneux, C. Buess-Herman, A. Aerts, "Comparison of solid metal-metal oxide reference electrodes for potentiometric oxygen sensors in liquid lead-bismuth eutectic operating at low temperature ranges", Sensor. Actuat. B-Chem 214 (2015) 20-28.
22. J.-L. Courouau, P. Trabuc, G. Laplanche, Ph. Deloffre, P. Taraud, M. Ollivier, R. Adriano, S. Trambaud, "Impurities and oxygen control in lead alloys", J. Nucl. Mater. 301 (2002) 53-59.
23. Perry, R.H. (1997), Perry's Chemical Engineers' Handbook, 7th edition, McGraw-Hill, New York.
24. J.-L. Courouau, S. Sellier, F. Balbaud, K. Woloshun, A. Gessi, P. Schuurmans, M. Ollivier, C. Chabert, "Initial start-up operations chemistry analysis for MEGAPIE", 5th MEGAPIE Technical Review Meeting, Nantes, France, 2004.
25. D. Martelli, S. Bassini, M. Tarantino, I. Di Piazza, "CIRCE-ICE experimental activities in support of LMFR Design", IAEA FR17 Paper ID 89, International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, 26-29 June 2017, Yekaterinburg, Russian Federation.

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.



-
26. R. Sh. Askhadullin, A. N. Storozhenko, V. M. Shelemetiev, A. N. Skomorokhov, R. P. Sadovnichiy, A. Yu. Legkikh, "Sensors to control dissolved oxygen concentration in heavy liquid metal coolants", IAEA-CN245-448, International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, 26-29 June 2017, Yekaterinburg, Russian Federation.
 27. I. Ricapito, C. Fazio, G. Benamati, "Preliminary studies on PbO reduction in liquid Pb-Bi eutectic by flowing hydrogen", J. Nucl. Mater. 301 (2002) 60-63.
 28. H. O. Nam, J. Lim, D. Y. Han, I. S. Hwang, "Dissolved oxygen control and monitoring implementation in the liquid lead-bismuth eutectic loop: HELIOS", J. Nucl. Mater. 376 (2008) 381-385.
 29. H. Lefhalm, J. U. Knebel, K. J. Mack, "Kinetics of gas phase oxygen control system (OCS) for stagnant and flowing Pb-Bi systems", J. Nucl. Mater. 296 (2001) 301-304.
 30. G. Muller, A. Heinzl, G. Schumacher, A. Weisenburger, "Control of oxygen concentration in liquid lead and lead-bismuth", J. Nucl. Mater. 321 (2003) 256-262.
 31. P. N. Martynov, R. Sh. Askhadullin, A. A. Simakov, A. Yu. Chaban', A. Yu. Legkikh, "Designing mass exchangers for control of oxygen content in Pb-Bi (Pb) coolants in various research facilities", ICONE17-75506, Proceedings of the 17th International Conference on Nuclear Engineering ICONE17, July 12-16, 2009, Brussels, Belgium.
 32. M. Kondo, M. Takahashi, K. Miura, T. Onizawa, "Study on control of oxygen concentration in lead-bismuth flow using lead oxide particles", J. Nucl. Mater. 357 (2006) 97-104.
 33. A. Marino, J. Lim, S. Keijers, J. Van den Bosch, J. Deconinck, F. Rubio, K. Woloshun, M. Caro, S. A. Maloy, "Temperature dependence of dissolution rate of a lead oxide mass exchanger in lead-bismuth eutectic", J. Nucl. Mater. 450 (2014) 270-277.
 34. C. Fazio, I. Ricapito, G. Scaddozzo, G. Benamati, "Corrosion behaviour of steels and refractory metals and tensile features of steels exposed to flowing PbBi in the LECOR loop", J. Nucl. Mater. 318 (2003) 325-332.
 35. Iida, T. and R.I.L. Guthrie, The Physical Properties of Liquid Metals, Clarendon Press, Oxford (1988).
 36. Kirillov, P.L. et al. (eds.), "Thermophysical Properties of Materials for Nuclear Engineering: A Tutorial and Collection of Data", IAEA, Vienna (2008).
 37. Miller, R.R., "Physical Properties of Liquid Metals", Liquid Metals Handbook, Report NAVEXOS, R.N. Lyon (ed.), US Gov. Pt. Office, Washington DC, 2nd edition (rev.), ORNL, Tennessee (1951).

-
38. J. P. Davim, "Traditional Machining Processes: Research Advances", Springer (2014).
 39. P. L. Menezes, M. Nosonovsky, S. P. Ingole, S. V. Kailas, M. R. Lovell, "Tribology for Scientists and Engineers: From Basics to Advanced Concepts", Springer Science & Business Media (2013).
 40. SESAME – "Thermal-Hydraulics Simulations and Experiments for the Safety Assessment of Metal Cooled Reactors", H2020 Framework Programme, EURATOM Grant Agreement N. 654935 (www.sesame-h2020.eu).
 41. Caramello M., Gregorini M., Bertani C., De Salve M., Alemberti A., Panella B., Thermal hydraulic analysis of a passively controlled DHR system, Progress In Nuclear Energy. Vol. 99, pp. 127-139 (2017).
 42. SILER – "Seismic-Initiated events risk mitigation in LEad-cooled Reactors", Framework Programme 7, EURATOM Project ID 295485 (www.siler.eu).
 43. ESNII plus – "Preparing ESNII for HORIZON 2020", Framework Programme 7, EURATOM Project ID 605172.
 44. Boussinesq, J., "Essai sur la théorie des eaux courantes", Thesis presented at the French Academy of Sciences, Paris (1872).
 45. Sparrow, E.M., R. Eichhorn and J.L. Gregg, "Combined Forced and Free Convection in a Boundary Layer Flow", Physics of Fluids, Vol.2, 3, pp. 319-328 (1959).
 46. Archimedes, "On Floating Bodies I", in "The Thirteen Books of Euclid's Elements". The works of Archimedes (Encyclopedia Britannica, 1990).
 47. M. Dierckx, W. Leysen and D. Van Dyck, "Overview of the ultrasonic instrumentation research in the MYRRHA project", 4th Int. Conf. on Advancements in Nuclear Instrumentation Measurement Methods and their Applications (ANIMMA), Lisbon (2015).
 48. R. Kazys, A. Voleisis, R. Sliteris, B. Voleisiene, L. Mazeika, P. H. Kupschus, H. Aït Abderrahim, "Development of Ultrasonic Sensors for Operation in a Heavy Liquid Metal", IEEE Sensors Journal, Vol. 6, No. 5 (2006).
 49. D. Van Dyck and M. Dierckx, "An Ultrasonic Fuel Identification System for Liquid Metal Cooled Reactors Resilient Against Multiple Transducer Failures", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 61, no. 4, (2014).
 50. E. Jasiuniene, R. Kažys, L. Mažeika, A. Gusarov, M. Schyns, M. Dierckx, H. Aït Abderrahim, "Acoustic computer model for ultrasonic imaging of heavy liquid metal nuclear reactor", IEEE 978-1-4244-6494-4/10 (2010).
 51. Cazalet, J., Ceccato, S., Benoist, P., Gondard, C., and Viard, J. "Inspection of Super Phenix reactor vessels with the MIR device", (CEA-CONF-10471), France (1990).
 52. A. P. Singh, C. Rajagopalan, V. Rakesh, S. Rajendran, S. Venugopal, K. V. Kasiviswanathan, T. Jayakumar, "Evolution in the design and development of the in-service inspection device for the Indian 500 MWe

- Fast Breeder Reactor”, Nuclear Engineering and Design 241, 3719– 3728 (2011).
53. H.-T. Chien, T. Elmer, D. M. Engel and W. P. Lawrence, “Development and Demonstration of Ultrasonic Under-Sodium Viewing System for SFRs”, Argonne National Laboratory, Argonne, IL USA (2015).
54. Westinghouse Electric Company, LLC, “RCCA Eddy Current and Ultrasonic Inspection (14x14, 15x15, 17x17)” (2014).
55. Westinghouse Electric Company, LLC, “Automated Fuel Inspection System Services” (2014).
56. Westinghouse Electric Company, LLC, “DMIMS-DX Digital Metal Impact Monitoring System” (2014).
57. LFR-GW-GEI-001, Rev. A, “Lead Fast Reactor Primary System Inspection Technologies and Techniques: a preliminary assessment” (2018).
58. IAEA Safety guide No. NS-G-2.6 Maintenance, Surveillance and In-service Inspection in Nuclear Power Plants.
59. “Sodium-Cooled Nuclear Reactors”, e-den, Paris, CEA Saclay et Groupe Moniteur, pp. 127-134 (2016).
60. 29 CFR 1910.1025, “Occupational Safety and Health Standards Toxic and Hazardous Substances”.
61. Council Directive 98/24/EC, “On the protection of the health and safety of workers from the risks related to chemical agents at work” (1998).
62. NNFIS-LP3-021 Rev. 0, “Metodiche di cleaning per componenti LFR/SFR)” (2011).
63. K. Pruksathorn, S. Damronglerd, “Lead Recovery from Waste Frit Glass Residue of Electronic Plant by Chemical-Electrochemical Methods”, Korean J. Chem. Eng., 22(6), 873-876 (2005).
64. Kh. Gholivand, M. Khosravi, S.G. Hosseini, M. Fathollahi, “A novel surface cleaning method for chemical removal of fouling lead layer from chromium surfaces”, Appl. Surf. Sci. 256 (2010).
65. S. Saito, T. Sasa, M. Umeno, Y. Kurata, K. Kikuchi, M. Futawaka, “Technology for cleaning of Pb-Bi adhering to steel. Basic Test”, JAERI-Tech2004-074 (2004).
66. Ausländer, J.S. and J.I. Georgescu, “On the Vapour Pressure of Polonium at Room Temperature”, 1st International Conference on the Peaceful Use of Atomic Energy, Geneva, 1955, pp. 389-391 (1956).
67. Abakumov, A.S. and Z.V. Ershova, “Vapor Tension of Polonium and Lead Polonide, Radiokhimiya”, Vol. 16, pp. 397-401, Soviet Radiochemistry, Vol. 16, pp. 396-399 (1974).
68. Abakumov, A.S. and Z.V. Ershova, “Vapor Tension and Thermal Dissociation of Polonium Dioxide”, Soviet Radiochemistry, Vol. 16, pp. 400-403 (1974).

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.



-
69. Abakumov, A.S., "Thermal Reactions of Polonium", Russ. Chem. Rev., Vol. 51, pp. 622-629 (1982).
 70. Petryanov, I.V. et al., "Formation and Emission of a Gaseous Fraction of Polonium from Its Solid Preparations", Doklady Biophysics, 322, pp. 49-51 (1992).
 71. Borisov N.B. et al., "Specific Properties of Polonium Aerosols", Colloid J. Russ. Acad. Sci., 57, pp. 7-10 (1995).
 72. Li, N., E. Yefimov and D. Pankratov, Polonium Release from an ATW Burner System with Liquid Metal Lead-bismuth Coolant, LA-UR-98-19-95, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM (1998).
 73. Larson, C.L., "Polonium Hydride Stripping and Formation of Rare-Earth Polonides", Design of an Actinide Burning, Lead or Lead-bismuth Cooled Reactor that Produces Low Cost Electricity, FY02 Annual Report, October 2002, INEEL/EXT0201249/ MITANPPR092, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory/Bechtel BWXT Idaho, LLC (2002).
 74. Neuhausen, J., U. Köster and B. Eichler, "Investigation of Evaporation Characteristics of Polonium and Its Lighter Homologues Selenium and Tellurium from Liquid Pb-Bi-Eutecticum", Radiochim. Acta, Vol. 92, pp. 917-923 (2004).
 75. Neuhausen, J., "Gas Phase Concentrations of Volatile Nuclear Reaction Products in the MEGAPIE Expansion Tank, Part 2: Polonium Evaporation", Annual Report 2005, Laboratory for Radiochemistry and Environmental Chemistry, Paul Scherrer Institut, Switzerland, p. 45 (2005).
 76. Ohno, S. et al., "Equilibrium Evaporation Behaviour of Polonium and its Homologue Tellurium in Liquid Lead-bismuth Eutectic", J. Nucl. Sci. Technol., 43, pp. 1359-1369 (2006).
 77. Obara, T. et al., "Polonium Evaporation and Adhesion Experiments for the Development of Polonium Filter in Lead-bismuth Cooled Reactors", Progress in Nuclear Energy, 50, pp. 556-559 (2008).
 78. Gonzalez Prieto, B. et al., "Equilibrium Evaporation of Trace Polonium from Liquid Lead-bismuth Eutectic at High Temperature", Journal of Nuclear Materials, 450, pp. 299-303 (2014).
 79. Gonzalez Prieto, B. et al., "Use of the Transpiration Method to Study Polonium Evaporation from Liquid Lead-bismuth Eutectic at High Temperature", Radiochim. Acta, DOI 10.1515/ract-2014-2263 (2014).
 80. Gonzalez Prieto, B. et al., "Non-Uniform Polonium Distribution in Lead-bismuth Eutectic Revealed by Evaporation Experiments", J. Radioanal. Nucl. Chem., DOI 10.1007/s10967-014-3264-1 (2014).
 81. Rizzi, M. et al., "Polonium Evaporation from Dilute Liquid Metal Solutions", J. Nucl. Mater., 450, 304-313.

L 4.2 - Studiu de sinteză a aspectelor specifice LFR. Provocări specifice tehnologiei plumbului.



-
82. Hill, K.D. and M. Gotoh, "The Vapour Pressure of Caesium between 370°C and 660°C", *Metrologia*, 33, pp. 307-317 (1996).
 83. De Wijs, G. A., Pastore, G., Selloni, A. & van der Lugt, W. First-principles molecular-dynamics simulation of liquid CsPb. *The Journal of Chemical Physics* 103, 5031–5040 (1995).
 84. Sevov, S. C. Zintl phases. *Intermetallic compounds*, vol.3, Principle and practice (2002).
 85. Schäfer, H., Eisenmann, B. & Müller, W. Zintl Phases: Transitions between Metallic and Ionic Bonding. *Angewandte Chemie International Edition in English* 12, 694–712 (1973).
 86. Yamshchikov, L.F., S.P. Raspopin and V.N. Gusev, "Thermodynamic Characteristics of Cs in Pb Melts", *Rasplavy*, 2, pp. 34-36 (2001).
 87. McBride, B.J., M.J. Zehe and S. Gordon, NASA Glenn Coefficients for Calculating Thermodynamic Properties of Individual Species, NASA/TP2002211556, Glenn Research Center, Cleveland, Ohio (2002).
 88. Barin, I., *Thermochemical Data of Pure Substances*, 2nd Ed., VCH, Weinheim (1993).
 89. Skovorodko, S. N. & Mozgovoi, A. G. The solubility of inert gases in heavy liquid-metal heat-transfer agents at high temperatures. *High Temperature* 48, 603–606 (2010).
 90. Johnson, G. W. & Shuttleworth, R. The solubility of krypton in liquid lead, tin and silver. *Philosophical Magazine* 4, 957–963 (1959).
 91. Fazio, C. et al. The MEGAPIE-TEST project: Supporting research and lessons learned in first-of-a-kind spallation target technology. *Nuclear Engineering and Design* 238, 1471–1495 (2008).
 92. Opie, W. R. & Grant, N. J. Institute of Metals Division - Solubility of Hydrogen in Molten Lead (Correction, p. 528). *Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers* 191, 244–245, 528 (1951).
 93. Hoch, M. "The solubility of hydrogen, deuterium and tritium in liquid lead-lithium alloys", *Journal of Nuclear Materials* 120, 102–112 (1984).
 94. Larsen, E. M., Ortman, M. S. & Plute, K. E. "Comments on the hydrogen solubility data for liquid lead, lithium, and lithium-lead alloys and review of a tritium-solubility model for lithium-lead alloys", (Wisconsin Univ., Madison (USA). Dept. of Nuclear Engineering: 1981).
 95. Wu, C. H. The solubility of deuterium in lithium-lead alloys. *Journal of Nuclear Materials* 114, 30–33 (1983).
 96. Madrid, Y. & Cámara, C. Lead hydride generation atomic absorption spectrometry: An alternative to electrothermal atomic absorption spectrometry. A review. *The Analyst* 119, 1647–1658 (1994).

-
97. Miura, T., T. Obara and H. Sekimoto, "Removal of Polonium Contamination by Lead-bismuth Eutectic in Nuclear Systems", 11th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE11), Tokyo, 20-23 April 2003, ICONE11-36045 (2003).
 98. Miura, T., T. Obara and H. Sekimoto, "Polonium Contamination Removal Experiment For Lead-bismuth Cooled Fast Reactor", Proc. of the 2005 Int. Congress on Advances in Nuclear Power Plants (ICAPP'05), Seoul, Korea, 15-19 May 2005, Paper 5088 (2005).
 99. Obara, T. et al., "Removing Effect of Polonium Contamination by LBE in Various Baking Conditions", Trans. American Nuclear Society, 87, p. 539 (2002).
 100. Obara, T. et al., "Preliminary Study of the Removal of Polonium Contamination by Neutron-Irradiated Lead-bismuth Eutectic", Annals of Nucl. Energy, Vol. 30, pp. 497-502 (2003).
 101. Obara, T., T. Miura and H. Sekimoto, "Polonium Contamination Removal from Stainless Steel by Baking Method", Trans. American Nuclear Society, 91, pp. 483-484 (2004).
 102. MYRTE – "MYRRHA Research and Transmutation Endeavour", H2020 Grant agreement ID: 662186.
 103. Report RDS/2013/036, "Report sulla interazione fuel-coolant in sistemi LFR" (2031, in Italian).