



WP1-L1.3
Raport privind definirea conceptuală a
instalației Meltin’Pot
Pachet de Lucru: WP1
Activitatea: A1.1-3

Responsabil livrabil: Marin CONSTANTIN (RATEN ICN)
Autori: Marin CONSTANTIN

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
Șef compartiment MC	Doru SAVU		
Director Științific:	Alexandru TOMA		
Director/Responsabil Proiect:	Daniela DIACONU		
Responsabil Pachet de Lucru	Marin CONSTANTIN		
Responsabil Livrabil	Marin CONSTANTIN		
Autori:	Marin CONSTANTIN		

CUPRINS

Rezumat	4
1. Introducere	5
2. Scop si obiective	12
3. Necesitatea si oportunitatea realizării investiției	14
4. Fenomenologie investigata	16
4.1 Transportul fragmentelor de fisiune	16
4.2 Fragmentarea combustibilului si relocalizarea acestuia	22
5. Rezultate așteptate	24
6. Performante tehnice	25
7. Structura conceptuala.....	26
7.1 Instalația experimentală Meltin’Pot_1 dedicată investigării interacțiunii dintre combustibil si plumbul topit	26
7.2 Instalația experimentală Meltin’Pot_2 dedicată investigării dispersiei/relocalizării combustibilului	29
7.3 Instalația experimentală Meltin’Pot_3 dedicată investigării dispersiei produșilor de fisiune.....	31
7.4 Instalația experimentală Meltin’Pot_4 dedicată investigării retenției si dispersiei Poloniului	33
8. Elemente de investigație pentru proiectul conceptual	36
9. Recomandări	37
10. Concluzii.....	38
11. Referinte.....	39
Glosar	40

Rezumat

Prezentul raport conține elementele de definire conceptuală pentru instalația Meltin'Pot. Aceasta este o instalație experimentală destinată investigării fenomenologiei asociate accidentelor severe în sisteme nucleare cu neutroni rapizi și răcire cu plumb pur. În principal este vizată investigarea interacțiunii dintre combustibil, teacă și agentul de răcire. Instalația va fi structurată în patru module experimentale vizând următoarele investigații: (1) interacțiunea combustibilului nuclear cu plumbul topit, (2) dispersia/relocalizarea fragmentelor de combustibil, (3) retenția produșilor de fisiune în plumb topit, transportul acestora către gazul de acoperire, (4) retenția și dispersia poloniului. Modulele experimentale vor fi amplasate într-o celulă post-iradiere. În prima etapă când se vor investiga elemente chimice (izotopi stabili) cel de-al treilea modul poate fi amplasat într-o boxă etanșă prevăzută cu mănuși de manipulare. Instalațiile vor cuprinde instrumentație adecvată de monitorizare și achiziție de date, precum și aparatură de analiză de laborator cuplată. Elementele prezentate sunt cerințe pentru activitatea de proiectare conceptuală. Pe baza proiectului conceptual se va realiza studiul de fezabilitate.

Raportul prezintă într-o secțiune separată fenomenologia investigată, indicând elementele de investigație experimentală necesare pentru dezvoltarea tehnologiei LFR și implementarea demonstratorului ALFRED. Rezultatele așteptate și performanțele tehnice solicitate sunt de asemenea prezentate în secțiuni dedicate. Raportul prezintă structura conceptuală a instalației experimentale. De asemenea sunt formulate recomandări pentru elaborarea proiectului conceptual și concluzii.

1. Introducere

Electricitatea este o cerință vitală a societății, iar reducerea emisiilor o prioritate majoră. Scenariul de limitare a creșterii temperaturii medii globale (2050) la 1.5°C necesită o pondere de 30% (AIEA, NEA, NEI, EIA) a electricității nucleare.

Domeniul nuclear a parcurs o etapă importantă în dezvoltare susținând progresul economic al țărilor care au decis implementarea unor programe specifice, pe baza competitivității și a performanței ridicate în exploatare.

În dezvoltarea domeniului nuclear este bine cunoscut conceptul de generație de reactori nucleari. Majoritatea centralelor nucleare aflate în operare aparțin generației II. Multe dintre sistemele aflate în construcție sau în proiectare avansată sunt de Generație III sau III+. Sistemele inovative aflate în momentul de față în faza conceptuală sau în proiectare sunt sisteme de ultimă generație, denumite Generația IV.

În ultimii ani au fost depuse eforturi importante pentru dezvoltarea unor sisteme nucleare inovative (de Generație IV, GenIV [1]) orientate către: (1) creșterea gradului de securitate, (2) creșterea eficienței utilizării resurselor, (3) reciclarea combustibilului, (4) reducerea volumului și toxicității deșeurilor, (5) competitivitate economică înaltă.

Forumul Internațional GenIV [1] a selectat 6 sisteme care pot atinge obiectivele, între acestea tehnologia reactorilor rapizi răciți cu plumb, LFR (Lead Fast Reactor). Comisia Europeană susține dezvoltarea LFR și a inclus demonstratorul tehnologiei (reactorul ALFRED [2]) în documentele sale strategice SET Plan [3], SNETP Strategic Agenda [4], ESNII Roadmap [5]. În martie 2018, în urma analizei maturității tehnologice [6], Comitetul Executiv ESNII a avansat ALFRED în prima linie de priorități, prevăzând construcția acestuia până în 2028.

Pe baza participării RATEN ICN într-un număr mare de proiecte Euratom FP6, FP7, H2020 (dedicate LFR) și a dezvoltării capacităților de cercetare, în 2011, Guvernul României a exprimat disponibilitatea pentru construirea demonstratorului ALFRED în România. În decembrie 2013 a fost constituit consorțiul internațional FALCON pentru implementarea ALFRED în România. Platforma nucleară Mioveni este aleasă ca amplasament de referință [7], pe baza avantajelor sale (amplasament nuclear existent, utilități și protecție fizică, proximitatea specialiștilor, acceptanța publică).

Proiectul ALFRED este inclus în Strategia Națională de Cercetare-Dezvoltare-Inovare 2015-2020 și în Strategia de Specializare Inteligentă a Regiunii Sud Muntenia. În 2017, proiectul ALFRED a fost inclus în Roadmap-ul național al infrastructurilor de cercetare.

Proiectul ALFRED [7] constă în construcția a 6 instalații experimentale (infrastructura suport), realizarea demonstratorului și a unui Hub de coordonare. Instalațiile experimentale sunt destinate testării, demonstrării, calificării

componentelor LFR, precum si validării si verificării instrumentelor/metodologiilor de calcul.

Infrastructura ALFRED consta in construcția a 6 instalații experimentale (**ATHENA**, **ChemLab**, **HELENA2**, **ELF**, **HandsOn**, **Meltin’Pot**), **reactorul de demonstrație ALFRED** si un **Hub** de coordonare.

Instalațiile experimentale sunt destinate realizării de cercetări specific tehnologiei LFR (regimuri termohidraulice, controlul chimic al oxigenului si impurităților, comportarea materialelor in regimuri de coroziune si eroziune, transportul elementelor si speciilor chimice in mediu de plumb topit si in gazul de acoperire, precum si testării, demonstrării si calificării componentelor LFR, a validării si verificării instrumentelor/metodologiilor de calcul. Sunt vizate, pe de alta parte, cercetări sinergice cu alte domenii (precum folosirea sistemelor LFR pentru stocare energetica).

Aceste 6 instalații experimentale au rolul de a susține procesul de autorizare a demonstratorului ALFRED, precum si pentru investigarea aspectelor deschise ale tehnologiei LFR.

ATHENA si ChemLab sunt doua instalații experimentale cuplate. ATHENA este o instalație de tip piscina destinata testării regimurilor termohidraulice in volume mari de plumb, precum si comportării echipamentelor in regim de curgere, coroziune si eroziune).

ChemLab este un laborator dedicat investigării chimiei plumbului si gazului de acoperire. El dispune de instalații si aparatura specifica de analiza. Laboratorul va acoperi cerințele de investigații chimice in tehnologia LFR, deservind întreg clusterul de instalații experimentale suport. Din punct de vedere al activităților principale ChemLab va funcționa in mod cuplat cu instalația ATHENA. Din acest motiv, precum si pentru reducerea costurilor de investiție si a celor de operare ATHENA si ChemLab au fost proiectate sa fie realizate într-o clădire unica.

Cele doua instalații nu fac obiectul documentațiilor tehnice propuse sa fie realizate in cadrul pachetului 1 al proiectului PRO-ALFRED, deoarece documentația tehnica a fost elaborată anterior, prin eforturi ale parteneriatului internațional FALCO (consorțiul pentru implementarea ALFRED in Romania). Cele doua instalații au fost propuse in cadrul unui proiect comun pentru finanțare in cadrul POC, secțiunea „Mari infrastructuri de cercetare”. Proiectul este intitulat „ALFRED – Etapa 1 ATHENA si ChemLab” (ATHENA- Instalația Avansată pentru Experimente Termohidraulice în Aplicații Nucleare, ChemLab - Laboratorul Chimic LFR). In momentul de fata proiectul se afla in procesul de evaluare tehnica si financiara in cadrul POC.

In cadrul proiectului PRO-ALFRED, pachetul de lucru WP1, va fi realizata documentația tehnica pentru instalațiile: HELENA2, ELF, Melting’Pot, HandsON, precum si pentru centrul de coordonare (Hub).

Documentația va consta in:

- (1) elemente de definire pre-conceptuala (pentru HELENA2, ELF, Melting’Pot, HandsON si Hub),
- (2) proiecte conceptuale (pentru HELENA2, ELF si Hub)
- (3) studii de fezabilitate (pentru HELENA2 si ELF).

L1.3 – Raport privind definirea conceptuala a instalației Meltin’Pot



Tot in cadrul pachetului WP1 va fi investigata posibilitatea de amplasare optima a instalațiilor experimentale, reactorului de demonstrație ALFRED, precum si a centrului de coordonare, pe platforma nucleara de la Mioveni, având in vedere suprafețele de teren propice construcțiilor si disponibile, proximitatea utilităților, precum si ansamblul de instalații nucleare existente pe platforma.

O prezentare sintetica a ansamblului de instalații experimentale si a centrului de coordonare este conținută in Tabelul 1.1.

Tabelul 1.1 Prezentare sintetica a instalațiilor experimentale din proiectul PRO-ALFRED si a Centrului de Coordonare

	Obiectivul de investiție	Rol si funcționalitate
1	HELENA2, Instalație de tip bucla pentru testarea componentelor in diverse regimuri termohidraulice	- testarea comportării casetelor de combustibil, precum si a barelor de control din reactorii nucleari de tip LFR, - investigarea comportării componentelor si echipamentelor (spre exemplu pompe si vane) in regimuri termohidraulice de curgere forțată si curgere naturala, inclusiv testarea la coroziune. - testarea, la scara reala, a comportării casetelor de combustibil pentru demonstratorul ALFRED in regimurile specifice de curgere.
2	ELF, Instalație de tip piscina pentru realizarea testelor de anduranță pentru componente, echipamente, sisteme LFR	- simulare electrica a zonei active ALFRED pentru reprezentarea termohidraulica la o scara cat mai apropiata de cea reala, - realizarea de teste de anduranță pentru funcționarea componentelor, echipamentelor si sistemelor aferente reactorului de demonstrație ALFRED, precum si măsurarea caracteristicilor de fiabilitate
3	HandsON, Instalație pentru testarea manevrabilității casetelor de combustibil si a barelor de control si securitate	- manipularea casetelor de combustibil si a casetelor conținând elementele de control-comanda si de securitate, precum si a casetelor de reflector la scara reala a demonstratorului ALFRED - testarea funcționarii sistemului de transfer a combustibilului ars prin intermediul containerului si al ecluzei de transfer
4	Meltin’Pot,	- investigarea fenomenologiei asociate accidentelor severe in sisteme nucleare cu

L1.3 – Raport privind definirea conceptuala a instalației Meltin’Pot



	Instalație pentru investigarea transportului de produși de fisiune și a fragmentării combustibilului intrat în contact cu plumbul lichid	- neutroni rapizi și răcire cu plumb pur - obținerea de date experimentale despre depozitarea produșilor de fisiune în plumb și pe materialele structurale, precum și despre transferul în gazul de acoperire - investigarea fenomenologiei interacțiunii a pastilelor de combustibil cu plumbul topit și obținerea de date experimentale privind transportul fragmentelor și formarea de configurații stabile
5	Hub, Centrul de Coordonare	- găzduirea logisticii pentru management în acces deschis și a activităților de educație și formare

ALFRED este reactorul de demonstrație al tehnologiei LFR. Principalele caracteristici sunt prezentate în Tabelul 1.2.

Tabelul 1.2 Principalele caracteristici tehnice ale demonstratorului ALFRED

Putere termică [MW _{th}]	300
Putere electrică [MW _e]	125
Agent de răcire (circuit primar)	Plumb pur
Sistemul primar	Tip piscină, compact
Circulația agentului de răcire în primar: - operare normal - situații de urgență	Circulație forțată Circulație naturală
Viteza maximă de circulație a plumbului [m/s]	2
Temperatura de intrare (zona activă) [°C]	400
Temperatura de intrare în generatorul de abur [°C]	480
Ciclul de răcire în secundar	Apa - abur supraîncălzit
Temperatura apei de alimentare (feed-water) [°C]	335
Presiunea aburului [(MPa)]	18
Eficiența ciclului [%]	40
Deteriorarea structurală maximă, DPA maxim [dpa]	2
Tip combustibil	MOX (îmbog. max Pu 30%)
Grad de ardere maxim la descărcare [MWd/kg-HM]	90÷100
Deteriorarea maximă a tecilor prin interacțiunea cu neutronii [dpa]	100
Temperatura maximă a tecii la operare normală [°C]	550

În figura 1.1 este prezentată schema conceptuală a reactorului ALFRED (zona activă și circuitul primar).

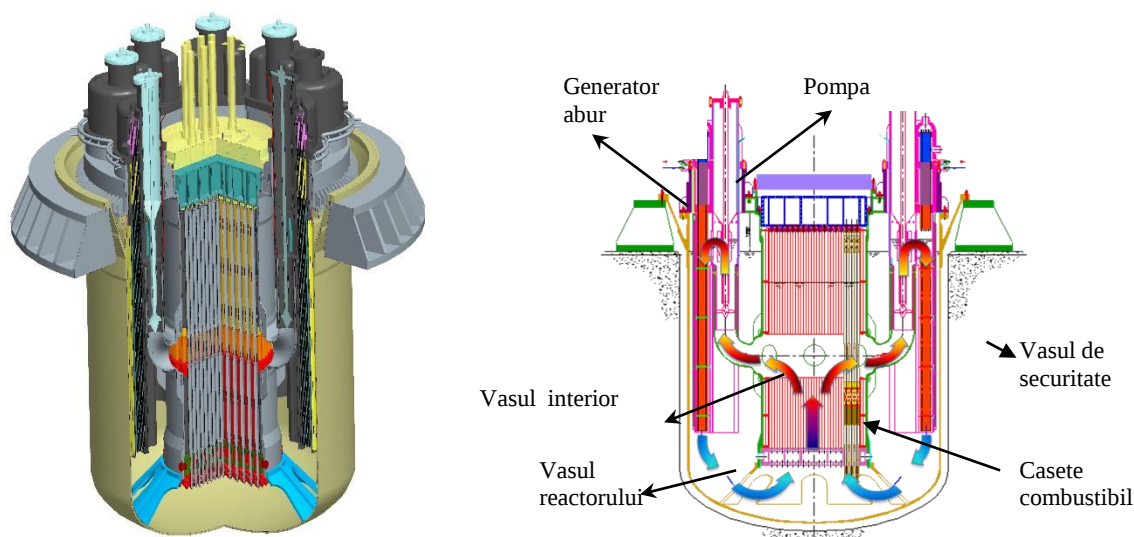


Fig. 1.1 ALFRED - Schita 3D si sectiune verticala in zona activa si in circuitul primar

Configurația sistemului primar este de tip piscina, caracterizata de o geometrie compacta cu generatorii de abur direct inserați in plumbul topit din piscina. Fiecare generator de abur este prevăzut cu o pompa de circulație forțată a agentului de răcire. Piscina este formata dintr-un vas (numit vasul reactorului, RV) cilindric avand partea inferioara toro-sferica. Vasul este ancorat de cavitatea reactorului prin suportul de vas aflat in partea superioara (Fig.1.1).

Un al doilea vas (numit vasul de securitate, SV) este situat coaxial cu RV si solidar cu structura de beton a cavității reactorului. Intre RV si SV este prevăzut un interstițiu suficient de mare pentru realizarea activităților de inspecție (ISI). De asemenea, prin intermediul interstițiului vasul SV poate fi răcit de către același sistem care răcește structura de beton a cavității. Sistemul este inserat in beton si este independent de sistemul de răcire al reactorului. Prezenta RV si SV este gândita sa rezolve eventualitatea scurgerilor plumbului lichid din RV in cazul fisurării acestuia. Scurgerile vor fi reținute in SV, prevenind scăderea nivelului plumbului lichid in RV.

Zona activa consta in casete hexagonale grupând elemente combustibile cilindrice plasate in rețea hexagonală. Combustibilul este de tip MOX cu pastile prevăzute cu un orificiu central in vederea reținerii gazelor de fisiune si acomodării dilatării radiale. Înălțimea zonei active este redusa (0.6 m), ceea ce favorizează circulația naturală, in cazul pierderii circulației forțate.

Configurația zonei active (Fig. 1.2) include 171 casete de combustibil, 12 bare de control si 4 bare de securitate, înconjurata de 108 casete de reflector ($ZrO_2-Y_2O_3$) care realizează si funcția de protecție la radiație a vasului interior.

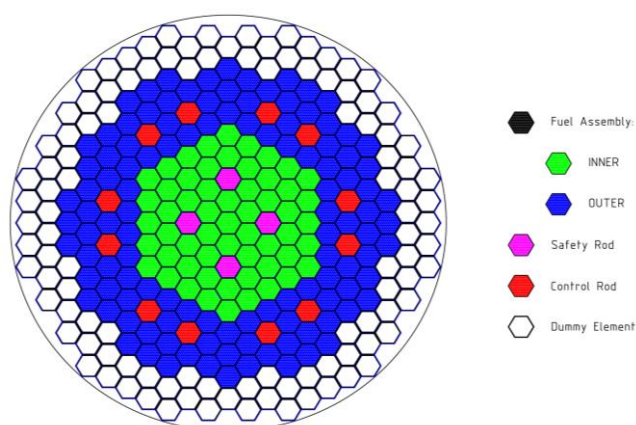


Fig. 1.2 ALFRED –configurația zonei active

Din punct de vedere al opririi reactorului, ALFRED este echipat cu doua sisteme diferite, redundante:

- (1) sistemul de bare de control (CR) utilizate pentru controlul normal al reactorului (pornire, oprire, controlul reactivității in timpul ciclului de combustibil), precum si pentru oprirea in caz de urgenta (SCRAM),
- (2) sistemul de bare de securitate (SR) utilizat doar pentru SCRAM.

Pentru ambele sisteme materialul absorbant utilizat este B_4C îmbogățit in B-10 (90%), iar tuburile de ghidaj sunt realizate din T91, tecile sunt din 15-15 Ti iar ZrO_2 (95%) - Y_2O_3 (5%) sunt utilizate pentru izolare si reflector.

Structura barelor CR consta dintr-un cluster de 19 pini absorbanti. Răcirea este asigurata prin circulația forțată/naturala a agentului din sistemul primar. Pinii sunt prevăzuți cu o zona de acumulare a gazelor (gas plenum), in partea superioara, in vederea colectării heliului si tritiului produse in reacțiile nucleare ale B-10. Barele sistemului CR sunt extrase in direcția inferioara (de sus in jos) si introduse prin deplasarea lor in sus datorita forței arhimedice.

Barele SR stau in situație normala in agentul de răcire. Barele sunt extrase in sus si inserate in jos împotriva forței arhimedice. Din acest motiv inserarea se realizează cu ajutorul unui sistem pneumatic. In cazul defectarii acestuia este prevăzută utilizarea unui sistem de balast (din tungsten) care sa forțeze căderea gravitaționala.

Generatorii de abur (SG) si pompele sistemului primar (PP) sunt integrate intr-o unitate unica, dispusa vertical. Fiecare SG consta din 542 tuburi baioneta imersate in piscina reactorului, pe o porțiune de 6 m din lungimea totala. Numărul de SG, precum si de PP, este de 8. Atât SG, cat si PP, sunt amplasate intre vasul interior si peretele RV. PP este plasata in partea calda a SG si antrenează prin partea de secțiune plumbul topit către SG. Acesta trece prin zona centrala a pompei (elicea de antrenare), apoi trece, prin orificiile de intrare, in SG, coboară prin tuburile baioneta si iese din SG. Motorul pompei este amplasat deasupra RV.

ALFRED este prevăzut cu doua sisteme independente, pasive si redundante de evacuare a căldurii reziduale (in cazul pierderii sistemului primar): DHR1 (Decay Heat Removal) si DHR2. Fiecare este compus dintr-un sistem de condensare a vaporilor de apa (Isolation Condenser, IC) conectat la partea secundara a fiecărui SG.

Sistemul secundar este bazat pe o configurație de turbina duala cu trei extracții in partea de presiune înaltă (HP) si încă trei in partea de presiune scăzută (LP).

De asemenea, ALFRED este prevăzut cu un sistem de încălzire a agentului de răcire. Sistemul lucrează atunci când reactorul este oprit (iar căldura reziduala insuficienta) in scopul asigurării unei temperaturi minime a plumbului pentru a preveni solidificarea acestuia.

Prezentul raport este dedicat prezentării rezultatelor studiului de definire a elementelor de baza pentru demararea activităților de realizare a proiectului conceptual, pentru instalația experimentală **Meltin'Pot**.

Meltin'Pot este o instalație experimentală destinată investigării fenomenologiei asociate accidentelor severe in sisteme nucleare cu neutroni rapizi si răcire cu plumb pur. In principal este vizată investigarea interacțiunii dintre combustibil, teaca si agentul de răcire. Instalația va fi de tip piscina de dimensiuni reduse destinată testării dispersării combustibilului in timpul unui accident sever, precum si retenției produșilor de fisiune. Instalația va cuprinde instrumentație adecvată de monitorizare si achiziție de date, precum si aparatura de analiza de laborator cuplata. Totodată instalația va permite investigarea fragmentării combustibilului in timpul unui accident sever si transportul acestor fragmente prin intermediul agentului de răcire. In acest scop pentru simularea transportului in configurația specifică este propusă realizarea unei bucle mici de circulație a plumbului.

2. Scop si obiective

Meltin'Pot este o instalație dedicată realizării de experimente de transfer și depozitare a produșilor de fisiune și a speciilor asociate, precum și mecanismului de fragmentare a combustibilului nuclear intrat în contact cu plumbul lichid și transportului fragmentelor în mediul de curgere.

Infrastructura de cercetare Meltin'Pot este formată din mai multe module experimentale, care operează cu plumb pur, pentru a investiga principalele fenomene legate de apariția accidentelor care conduc la fragmentarea și dispersia combustibilului în sisteme ale tehnologiei LFR.

Scopul principal constă în acoperirea cerințelor de date experimentale pentru simularea accidentelor severe și demonstrarea unor fenomene specifice tehnologiei LFR.

Obiectivul principal al realizării Meltin'Pot constă în:

(OP) construirea unei instalații experimentale care să ofere capacități pentru investigarea fenomenologiei asociate accidentelor severe în sistemele de tip LFR,

Obiectivul secundar constă în:

(OS) obținerea unei configurații care să permită studiul:

- (1) interacțiunii combustibil-lichid de răcire,
- (2) dispersiei și relocării combustibilului într-un scenariu de accident sever,
- (3) retenția produșilor de fisiune (PF) în plumb și / sau migrarea în gazele de acoperire,
- (4) retenției izotopilor poloniului în plumbul topit,
- (5) interacțiunii produșilor de fisiune (PF) cu vaporii de apă și gazul de acoperire, efectul de stripping al Po în gazul de acoperire.

Domeniul de temperaturi de funcționare, precum și cel de curgere vor acoperi regimurile de funcționare ale reactorului de demonstrație ALFRED.

În ceea ce privește investigația pe radioizotopii Po, atât impuritățile bismutului, cât și izotopul de plumb Pb-208 conținut în plumb natural (~ 56%) formează radioizotopi ai Poloniului prin reacții nucleare.

Mai mult, referindu-ne la conceptul GenIV LFR, generatoarele de abur sunt instalate direct în vasul principal al reactorului. Din acest motiv, accidentul de rupere a tuburilor generatorului de abur (SGTR) ridică o problemă de securitate în funcționare.

În caz de apariție, apa este injectată direct în piscina vasului principal, cu vaporizarea bruscă a apei injectate. În astfel de condiții, este importantă investigarea volatilizării Po și formarea de hidrați ai Po, deoarece, în general, fenomenul de stripping este mai pronunțat în prezența H_2 sau a vaporilor de apă [9]. Același lucru va fi investigat și în cazul produșilor de fisiune.

3. Necesitatea si oportunitatea realizării investiției

Infrastructura ALFRED este caracterizata de o înaltă complexitate si specializare. Este destinata dezvoltării tehnologice. Rezultatele sunt aplicabile direct in tehnologie si se pretează in măsură foarte mare pentru transfer tehnologic.

Datele experimentale in domeniul transportului de elemente chimice, specii chimice, precum si radionuclizi in mediu de plumb pur topit sunt foarte puține, iar cele existente nu sunt publice. Pentru implementarea procesului de autorizare exista o nevoie stringenta pentru date cat mai realiste pentru simularea situațiilor accidentale, inclusiv a accidentelor severe.

Astfel sunt necesare date privind retenția elementelor rezultate din fisiune (fragmente de fisiune) si a speciilor asociate acestora, inclusiv la nivel de structura izotopică, in mediul de plumb topit.

Instalația experimentală Meltin'Pot este destinata acoperirii următoarelor **necesități**:

- (1) obținerea de date experimentale privind retenția in mediu de plumb pur, aflat la temperaturile operaționale din ALFRED, a elementelor chimice si radioizotopilor de interes radiologic, rezultați in urma proceselor de fisiune cu neutroni rapizi,
- (2) investigarea formarii speciilor in mediul de plumb pur,
- (3) investigarea influenței solubilității speciilor in funcție de temperatura si curgere,
- (4) obținerea de date experimentale relevante despre procesul de fragmentare a pastilelor de combustibil nuclear intrate accidental in contact cu plumbul aflat la temperaturi mari
- (5) demonstrarea ipotezelor privind flotabilitatea fragmentelor de combustibil, antrenarea acestora de către mediul de curgere si formarea de configurații pentru care nu se poate avansa ipoteza re-criticității,
- (6) investigarea retenției produșilor de fisiune si ai poloniului in plumbul topit, precum si a transferului către gazul de acoperire,
- (7) acumularea de date experimentale necesare completării datelor existente si îmbunătățirii modelelor de simulare din programele de calcul.

Oportunitatea susținerii investiției este determinata de:

- (1) Existenta unui program de activități pregătitoare pentru implementarea reactorului de demonstrație ALFRED in Romania,
- (2) Acumularea de experiența in domeniul operării instalațiilor experimentale, inclusiv a celor pentru LFR, in RATEN ICN,

- (3) Posibilitatea de accesare a fondurilor nerambursabile, dedicate dezvoltării infrastructurilor de cercetare din Romania,
- (4) Impactul imediat pe care il poate aduce un program de investigații tehnico-științifice, în condițiile oportunităților existente pe piața privind dezvoltarea sistemelor de Generație IV.

4. Fenomenologie investigata

4.1 Transportul fragmentelor de fisiune

Instalația Meltin'Pot este destinată producerii de rezultate de investigație și date experimentale pentru transportul produșilor de fisiune (PF) în piscina cu plumb și în gazul de acoperire, împreună cu identificarea și analiza cantitativă a mecanismelor de atenuare a termenului sursă prin depunere, dizolvare, adsorbție, formarea de specii chimice cu mobilitate redusă, etc.

După eliberarea PF din elementele combustibile acestea vor difuza și vor avea reacții chimice în mediul de plumb topit.

În Tabelul 4.1 sunt prezentate principalele proprietăți fizice și chimice ale plumbului. De menționat faptul că structura izotopică a plumbului este dependentă de istoria de proveniență. Spre exemplu plumbul obținut din minereul de uraniu conține în principal Pb-206 și are o densitate de 11.27 g/cm³, în vreme ce plumbul obișnuit (structura izotopică din Tabelul 4.1) conține în mod predominant Pb-208 și are o densitate de 11.34 g/cm³.

Tabelul 4.1 Proprietăți fizice și chimice ale plumbului

Masa atomică	207.22
Număr atomic	82
Izotopi stabili	Pb204 (1.70%), Pb206 (25.1%), Pb207 (21.7%), Pb208 (52.3%)
Punct de topire (°C)	327.5
Punct de fierbere (°C)	1750
Densitate (g/cm ³)	11.34
Rezistivitate electrică (Ω.cm)	21.9*10 ⁻⁶
Potential de ionizare	
- primul electron	7.38
- al doilea electron	14.96

Din punct de vedere al evoluției unui accident sever în sistemele LFR, una dintre proprietățile de interes maxim este presiunea de vapori.

Presiunea de vapori pentru plumb lichid pur variază în domeniul de interes cuprins între temperatura de topire (327.5°C) și temperatura de fierbere (1750°C) conform expresiei [10]:

$$p_{Pb}^0 = 10^{-\frac{10130}{T} + 13.2848 - 0.985 \lg T}$$

unde p_{Pb}^0 este presiunea

de vapori în cazul unei componente pure. În cazul plumbului care conține și alte componente este nevoie de cunoașterea fracțiilor molare ale acestora. Spre exemplu,

daca exista un amestec de doua componente (A,B) atunci: $p_A = p_A^0 x_A$, unde x_A este fracția molară din amestec (soluție).

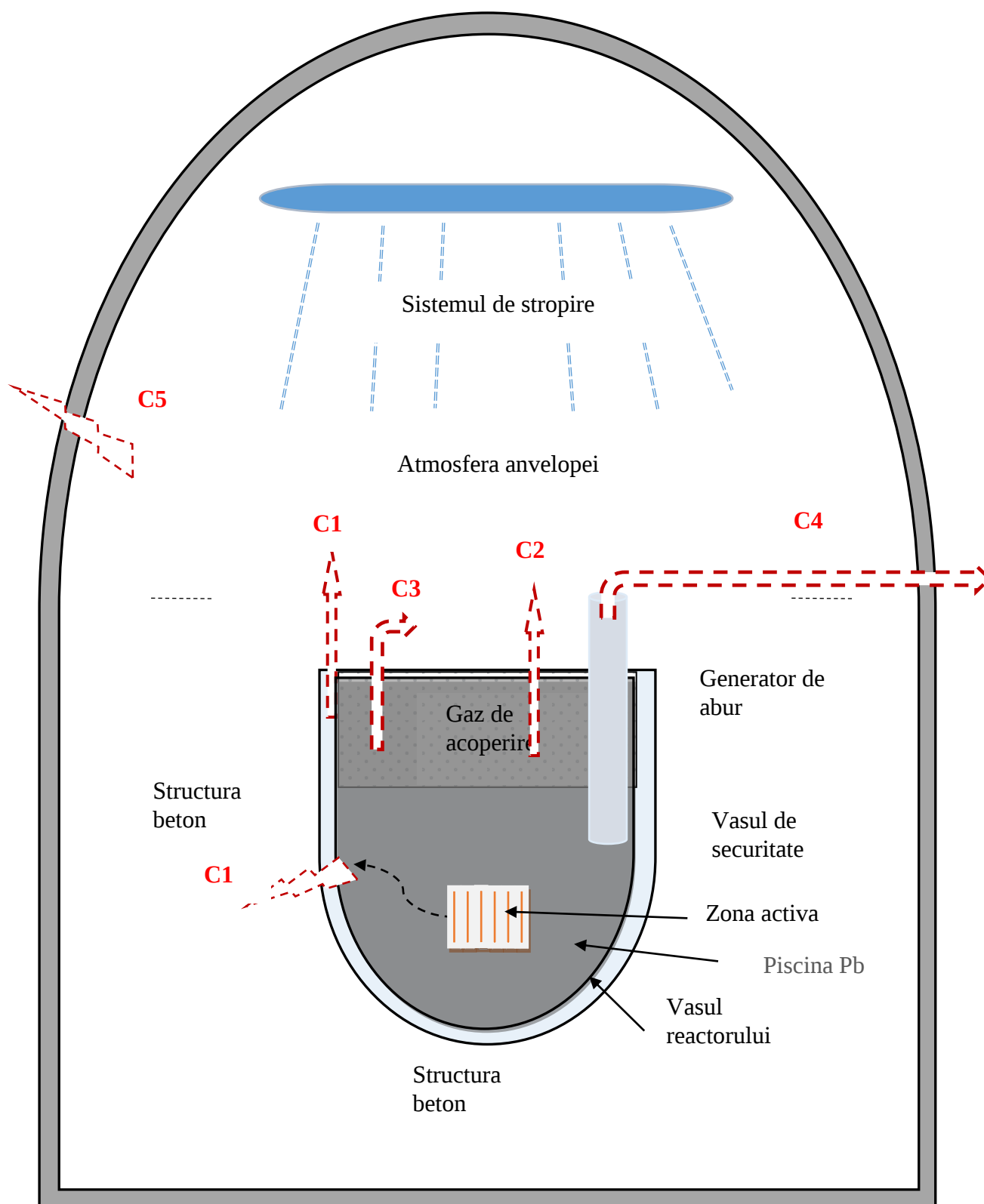


Fig. 4.1.1 Reactorul si anvelopa ALFRED – ilustrarea cailor posibile de transfer a izotopilor radioactivi

În Fig.4.1.1 sunt prezentate schematic principalele cai de transfer al produșilor de fisiune. Acestea sunt:

- (C1) ruperea vasului reactorului, eventual și a vasului de securitate,
- (C2) deteriorarea etanșeității vasului reactorului,
- (C3) defectarea sistemului gazului de acoperire, cu pierderea etanșeității acestuia,
- (C4) apariția unei cai de transfer între circuitul primar și cel secundar, în principal prin ruperea tuburilor generatorilor de abur,
- (C5) defectarea sistemului anvelopei, incluzând blocarea pe poziție deschisă a ventilației, fisurarea accidentală a anvelopei, etc.

Principalele fenomene care determină sau influențează transportul PF în vasul reactorului (Fig. 4.1.2) sunt: transformările de fază, depunerea, precipitarea, adsorbția/desorbția, disoluția/precipitarea, vaporizarea/condensarea, formarea de noi specii chimice.

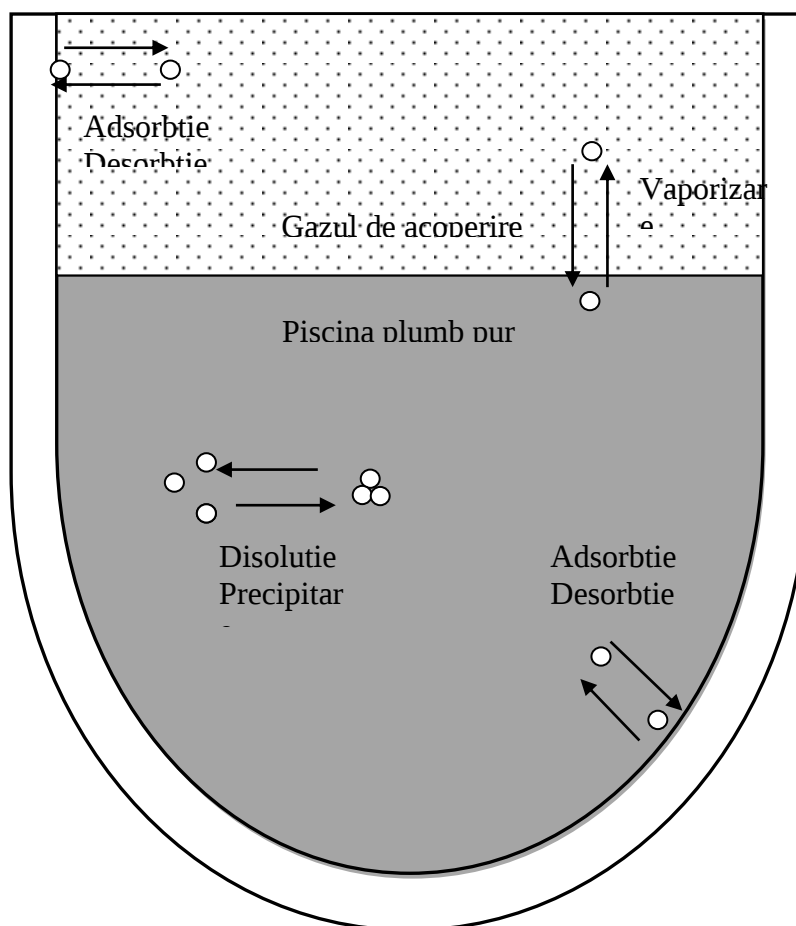


Fig. 4.1.2 Principalele fenomene care influențează transportul produșilor de fisiune în interiorul vasului reactorului

După deteriorarea barierei constituită de teaca combustibilului majoritatea PF acumulate în interstițiul pastile-teaca va fi direct evacuată în agentul de răcire.

PF volatili (sau speciile volatile formate) care nu au afinitate pentru plumb și care au un timp de înjumătățire mare (în comparație cu cel necesar traversării piscinei) vor ajunge, ca izotopi radioactivi, în gazul de acoperire.

În acest grup se regăsesc, spre exemplu, izotopii gazelor nobile apărute ca produși de fisiune, cum ar fi: ^{135}Xe ($T_{1/2}=5.3$ zile), ^{135}Xe ($T_{1/2}=9.2$ h), ^{131}Xe ($T_{1/2}=12.0$ zile), ^{85}Kr ($T_{1/2}=10.3$ zile). Acei izotopi ai gazelor nobile care au timp de înjumătățire mic se vor transforma în timpul procesului de transport (prin mediul de plumb topit) în alți izotopi, spre exemplu: $^{137}\text{Xe} \rightarrow 3.9 \text{ min} \rightarrow ^{137}\text{Cs}$.

PF ne-volatili, precum și toți produșii care au afinitate pentru Pb vor fi, în mod dominant, reținuți în volumul de agent de răcire aflat în piscina reactorului.

În cazul unui accident de vaporizare a plumbului acești produși vor ajunge în gazul de acoperire al piscinei sau, în anumite circumstanțe, direct în atmosfera anvelopei.

Tendința produșilor volatili este de a migra rapid către gazul de acoperire. Totuși, în cazul unei solubilități semnificative, migrația este încetinită. Din acest motiv secțiunea curentă discută aspectele privind solubilitatea produșilor de fisiune în mediul de plumb topit.

Legea lui Henry este una din principalele legi ale gazelor: „la temperatură constantă, cantitatea de gaz dizolvată într-un lichid, la saturație, variază direct proporțional cu presiunea parțială a gazului aflat în contact cu lichidul”.

Gazele se dizolvă în lichidele cu care vin în contact. Dacă temperatura crește, cantitatea de gaz dizolvată în lichid, la saturație, scade și invers, crește, în cazul scăderii temperaturii. Cantitatea este funcție atât de tipul lichidului, cât și de tipul gazului. Presiunea parțială a gazului dizolvat (solutul) A este:

$$p_A = K_{H,A} \cdot x_A$$

unde: $K_{H,A}$ este constanta lui Henry (pentru solutul A),

x_A este concentrația solutului A .

În cazul unui amestec de gaze cantitatea dizolvată pentru fiecare componentă va fi proporțională cu presiunea parțială a componentei aflate în contact cu lichidul. Spre exemplu în cazul aerului dizolvat în apă, cantitatea de oxigen dizolvată în lichid va fi proporțională cu $p_{O_2} = 0.84$ bar, iar cantitatea de azot dizolvată în același lichid va fi proporțională cu $p_{N_2} = 3.16$ bar.

Gazele se dizolvă în lichide, până când lichidul se va satura cu gaz dizolvat. Saturația corespunde cantității maxime de gaz pe care lichidul îl poate absorbi la o temperatură și presiune constantă. Gazul nu se mai dizolvă dacă presiunea sa în lichid este egală cu presiunea vaporilor de deasupra lichidului.

Gazele cele mai solubile prezintă, în condiții de temperatură constantă, valorile cele mai reduse ale constantei lui Henry.

Transferul de masă este unul dintre cele mai importante mecanisme care guvernează redistribuirea PF între regiunile reactorului și/sau în afara acestuia. Mecanismul este

puternic influențat de condițiile fizico-chimice în care se afla mediul în care se realizează transportul, în special de condițiile de termohidraulică:

- (1) în condiții stagnante (fără curgere) transportul este dominat de fenomenul de difuzie,
- (2) în condiții dinamice transferul de masă este în principal realizat ca efect al deplasării fluidului, al amestecării elementului sau speciei în cauza în fluid, adică pe baza fenomenului de difuzie convectivă.

Difuzia moleculară constă în deplasarea individuală și dezordonată a moleculelor într-un mediu sub influența agitației termice a mediului de transport. Ciocnirile conduc la frecvente schimbări ale vectorului vitezei. Transportul prin difuzie este lent. Viteza lui depinde puternic de temperatura mediului și de presiune. Difuzia are loc datorită diferențelor dintre parametrii locali ai diferitelor regiuni ale mediului, adică a lipsei de echilibru între regiuni:

- (1) existența unui gradient de concentrație (difuzia moleculară obișnuită),
- (2) existența unui gradient de temperatură (termodifuzia),
- (3) existența unui gradient de presiune (difuzia de presiune),
- (4) existența unei forțe exterioare asupra componentelor amestecului (difuzia forțată).

Transportul de substanță este proporțional cu mărimea gradientului.

Difuzia convectivă apare în fluide aflate în mișcare. Intensitatea acesteia depinde de dinamica fluidului (de caracteristicile curgerii) și de proprietățile de transport pentru elementul/specia considerată.

Convecția poate fi:

- (1) forțată – realizată cu aport de energie externă (pompe, agitatoare, etc.)
- (2) liberă – deplasarea fluidului este rezultatul unui gradient de densitate (generat de o diferență de concentrație sau de temperatură)

Difuzia convectivă este însoțită de difuzia moleculară, contribuția celor două mecanisme depinzând de condițiile termohidraulice.

Difuzia moleculară obișnuită este descrisă de legea I a lui Fick.

Deplasarea moleculelor are loc prin intermediul ciocnirilor succesive cu moleculele mediului. Viteza de transport prin difuzie este scăzută ca urmare a numărului mare de ciocniri și reorientării continue a vitezei în urma ciocnirilor.

Într-un sistem staționar, curentul de masă transferat printr-o suprafață S este proporțional cu gradientul de concentrație. Constanta de proporționalitate este coeficientul de difuzie. Pentru o specie A poate fi exprimată ca:

$$J_A = -D_A S \frac{dC_A}{dl}$$

Sau folosind densitatea de curent:

$$j_A = -D_A \frac{dC_A}{dl}$$

Cum curentul de substanță al unui solut (j_s) (denumit și viteză de difuzie sau viteză de transfer) este definit ca fiind cantitatea de substanță transferată în unitatea de timp prin unitatea de suprafață (S):

$$j_s = \frac{dm}{Sdt}$$

atunci se obține:

$$dm_A = -D_A S \frac{dC_A}{dl} dt$$

Semnul minus arata că difuzia are loc în sensul scăderii concentrației lui A.

Simularea fenomenului de difuzie a unui element sau specii chimice depinde de cunoașterea cu exactitate a coeficientului de difuzie, D. Din punct de vedere fizic acesta reprezintă capacitatea de migrare a unui component într-un mediu și depinde de: presiune, temperatură, natura componentelor, concentrație (la lichide). Pentru medii gazoase valorile coeficientului sunt cuprinse între $10^{-5} - 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, iar pentru medii lichide între $10^{-9} - 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$.

Difuzia convectivă are loc în fluidele aflate în mișcare. Transportul de substanță prin mecanism convectiv se datorează deplasării globale a fluidului și se exprimă în funcție de viteza medie locală. Curentul masic transferat prin difuzie convectivă este dat de produsul dintre debitul total de fluid și concentrația în amestec a speciei transferate:

$$J_A = m_v C_A = v S C_A$$

Curentul convectiv total J_A se exprima printr-o ecuație analogă relației lui Newton din transferul termic:

$$J_A = k_C \Delta C_A$$

k_C = coeficientul individual de transfer de masă

ΔC_A = diferența dintre concentrația salutului speciei A la interfață și concentrația (medie) a acestuia în masa fluidului în mișcare

Procesul de difuzie convectiva este descris prin intermediul ecuației diferențiale a difuziei (ecuația diferențială a distribuției de concentrație într-un fluid dinamic):

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + v_x \frac{\partial C_A}{\partial x} + v_y \frac{\partial C_A}{\partial y} + v_z \frac{\partial C_A}{\partial z} + C_A \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = D_{AB} \left[\frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \right]$$

ceea ce se poate scrie mai compact ca:

$$\frac{dC_A}{dt} + C_A \nabla v = D_{AB} \nabla^2 C_A$$

Prođușii volatili de interes pentru termenul sursa (I, Cs, Te) eliberați în agentul de răcire în urma deteriorării tecilor elementelor combustibile sunt transportați către gazul de acoperire sau sunt depozitați pe structurile existente.

Retenția în agentul de răcire este puternic influențată de formarea speciilor chimice. Iodul este un exemplu clar de element cu importanța în termenul sursa pentru care

datele termochimice actuale sunt insuficiente pentru a evalua, cu precizie, transferul către gazul de acoperire și, ulterior, formarea termenului sursă în atmosfera anvelopei.

4.2 Fragmentarea combustibilului și relocalizarea acestuia

După deteriorarea tecilor elementelor combustibile și eliberarea inventarului de pF din interstiții dintre pastilele combustibile și teacă pot avea loc diverse fenomene:

- (1) pătrunderea plumbului în interiorul tecii,
- (2) topirea combustibilului și relocalizarea topiturii în exteriorul tecii,
- (3) fragmentarea combustibilului,
- (4) relocalizarea fragmentelor de combustibil prin mecanismul de flotabilitate, precum și prin antrenarea de către curgerea mediului de răcire.

Fragmentarea combustibilului este definită ca orice separare a pastilei de combustibil în două sau mai multe părți. În timpul operației normale pastilele de combustibil oxidic (UO_2) sau oxidic mixt (MOX, UO_2 și PuO_2) sunt caracterizate de apariția a numeroase crăpături induse de stresul termic.

Fragmentarea este influențată de o serie de factori precum:

- (1) gradul de ardere al combustibilului,
- (2) temperatura mediului în care are loc fragmentarea,
- (3) proprietățile chimice ale mediului.

La valori mari ale gradului de ardere, prin producerea de gaze de fisiune și relocalizarea acestora, se formează o regiune coronară cu grad ridicat de porozitate, în pastilele combustibile. În plus în timpul unor condiții accidentale, precum pierderea agentului de răcire (LOCA) apare o fragmentare suplimentară datorată răspunsului termo-mecanic la tranzient.

Relocalizarea fragmentelor de combustibil constă în deplasarea fizică a fragmentelor apărute în interiorul sau în afara tecii. Pentru mișcarea în interiorul tecii se face distincție între relocalizarea radială și cea axială. Pentru lucrarea de față interesul este focalizat pe deplasarea în afara tecii și anume deplasarea fragmentelor rezultate în mediul de plumb topit pur..

Datorită densității mari a plumbului (11.34 g/cm^3) fragmentele de combustibil sunt împinse de jos în sus de forța arhimedică și au tendința de plutire. În cadrul ipotezelor de accident pentru sisteme LFR este presupus faptul că fragmentele de combustibil se vor acumula la interfața dintre plumbul lichid și gazul de acoperire. Mai mult, se presupune că sunt suficiente elemente care garantează imposibilitatea formării unei configurații geometrice care să permită atingerea condiției de criticitate (adică întreținerea reacției de fisiune în lanț).

Eliberarea fragmentelor din interiorul elementului combustibil este denumită în literatura de specialitate ca **dispersia combustibilului** („fuel dispersal”). Acesta

consta in ejectarea fragmentelor de combustibil sau a particulelor apărute printr-o ruptură a tecii și împrăștierea lor în mediul exterior elementelor de combustibil.

Modul în care se realizează dispersia combustibilului către suprafața liberă a plumbului topit conduce la ideea că nu este posibilă realizarea re-criticității.

Afirmația trebuie dovedită prin configurațiile experimentale care pot să apară în urma fragmentării elementelor combustibile.

Instalația experimentală va oferi posibilități pentru:

- (1) fragmentarea combustibilului sub influența temperaturii (încălzire electrică) și pătrunderii în interiorul tecii a plumbului topit,
- (2) identificarea tipologiilor posibile de fragmentare,
- (3) transportul fragmentelor în mediu de plumb topit, în regim de circulație naturală și regim de circulație forțată,
- (4) retenția produșilor de fisiune în plumbul topit, precum și migrarea către gazul de acoperire,
- (5) retenția și transportul poloniului format prin activarea unor izotopi ai plumbului și bismutului (aflat ca impuritate în piscina reactorului),
- (6) identificarea configurațiilor de fragmente rezultate.

5. Rezultate așteptate

- (1) Date de intrare pentru evaluarea depozitarii de produse de fisiune (elemente, radioizotopi, specii asociate) in plumb topit, constând in distribuții de concentrație per element/izotop, in piscina, funcție de temperatura,
- (2) Date de intrare pentru depunerea PF pe structuri, constând in distribuții de concentrație per element/izotop, pe elementele structurale existente in piscina, funcție de temperatură,
- (3) Chimia PF si a speciilor asociate in plumb topit, constând in specii formate, precum si structura pe specii
- (4) Transferul PF către gazul de acoperire, constând in concentrații per element/izotop, in regiunea gazului de acoperire, funcție de temperatură,
- (5) Date privind retenția Po in plumbul topit, transferul acestuia către gazul de acoperire, influenta injectiei de vapori de apa in sistem asupra migrării Po,
- (6) Tipologia fragmentării elementelor combustibile sub influența temperaturii si a plumbului topit, constând in setul de fragmentări apărute experimental si ponderea fiecărui tip din set,
- (7) Transportul fragmentelor in mediu de plumb topit, in regim de circulație naturală si regim de circulație forțată, constând in localizarea fragmentelor in anumite regiuni si timpii de transport.

6. Performante tehnice

Temperatura reglabila a Pb in domeniul [400, 750°C].

Grad de ardere al combustibilului iradiat: [10, 100 MWd/kg]

Tipul de combustibil investigat: (1) UO₂, (2) MOX,

Volumul de plumb pur din vasul principal: (1) 10 L (Meltin'Pot_1), (2) 5 L (pentru modulele Meltin'Pot_2, Meltin'Pot_3, Meltin'Pot_4)

Volum rezervor de stocare: 40 L,

Volum rezervor de depozitare: 40 L,

Amplasare: in celula post-iradiere (toate modulele cu observatia ca Meltin'Pot_3 poate fi plasat intr-o boxa cu manusi in cazul in care se va lucra cu elemente chimice neradioactive, in prima etapa a investigatiei),

Dimensiunile modulelor: restrictie privind sectiunea orizontala - mai mica decat trapa de acces intr-o celula existenta in RATEN ICN in cadrul laboratorului de examinare post-iradiere, LEPI (1.5x1.5m). In cazul unei instalatii mai mari se va asigura demontabilitatea componentelor si montarea cu ajutorul telemanipulatorului

7. Structura conceptuala

Meltin'Pot constă în principal din patru instalații (module) care funcționează independent unele de altele. Trei dintre ele vor fi operate în interiorul unei celule post-iradiere dedicate, în timp ce a patra instalație poate fi operată într-o boxa de laborator, prevăzută cu mănuși de acționare, amplasată într-o zonă non-nucleară. Dimensiunile celei post-iradiere sunt de aproximativ 6x6x8m, cu un acces prin partea superioară, printr-o trapa de 1,5x1.5m.

Modulele experimentale pot fi introduse în celula post-iradiere cu ajutorul podului rulant și prin așezarea/montarea în celula cu ajutorul sistemului de manipulare de la distanță, aflat în componența celulei. De asemenea, vor fi folosite penetrațiile existente ale celulei pentru preluarea de semnale de la senzorii instalației și achiziția de date de la aparatura de analiză plasată în celula.

În afara celor patru instalații, în interiorul celulei fierbinți vor fi amplasate două rezervoare de stocare:

- (1) rezervor de stocare a plumbului necesar pentru umplere care va conține plumbul pur,
- (2) rezervor de depozitare (rezervor de scurgere) care va colecta plumbul contaminat, rezultat din experimente.

Rezervoarele sunt instalate permanent în celula fierbinte și sunt conectate hidraulic, la diferite momente de timp, la cele patru instalații, prin intermediul unor sisteme de conectare/deconectare rapidă. Pentru rezervorul de evacuare este prevăzută o ecranare necesară pentru protecția la radiații.

În cele ce urmează sunt descrise succint cele patru instalații (module) propuse.

7.1 Instalația experimentală Meltin'Pot_1 dedicată investigării interacțiunii dintre combustibil și plumbul topit

Instalația Meltin'Pot_1 este destinată realizării configurației experimentale pentru studiul interacțiunii chimice dintre combustibil și lichidul de răcire (plumb). Experimentele necesare prevăd utilizarea combustibilului proaspăt (oxid de uraniu și MOX), precum și a combustibilului iradiat, la diferite grade de ardere (în domeniul 10 - 100 MWd/kg).

Deoarece este prevăzută investigarea comportării combustibilului ars în contact cu plumbul topit este necesară instalarea și manipularea la distanță a instalației, adică plasarea în celula fierbinte (celula post-iradiere).

În Fig. 7.1.1 este prezentată instalația experimentală Meltin'Pot_1. Componentele principale sunt:

- (1) vas principal umplut cu plumb, având în partea superioară (deasupra plumbului topit) un gaz de acoperire (gaz inert, spre exemplu Argon),

în care au loc reacțiile de interes. Vasul este prevăzut cu un capac etanșeizat. Vasul este proiectat să conțină aproximativ $V=10$ L de plumb pur. Domeniul de temperaturi de funcționare este $400-750^{\circ}\text{C}$,

- (2) sistem de control al gazului de acoperire; acesta are rolul de a monitoriza și controla presiunea gazului de acoperire, precum și compoziția chimică a acestuia,
- (3) un prim rezervor de stocare care conține plumb pur, cu o linie de umplere dedicată conectată la vasul principal,
- (4) un al doilea rezervor de stocare care conține plumbul contaminat rezultat din experimente, cu o linie de drenare dedicată conectată, la vasul principal,
- (5) sistem de monitorizare și control a celulei post-iradiere (inclusiv monitorizarea compoziției chimice),
- (6) sistem de monitorizare și control pentru presiunea atmosferei celulei (ușor sub-presurizată),
- (7) sisteme dedicate pentru injecția de pastile de combustibil în interiorul vasului principal. În acest scop, cantități fixe de combustibil vor fi eliberate în interiorul plumbului topit, aflat în vasul principal.

Pentru a reduce pierderile de căldură în mediu vasul principal, cele două rezervoare de depozitare, precum și liniile de umplere și drenare (adică conductele și vanele) vor fi izolate termic. Totodată vor fi prevăzute cu rezistențe de încălzire electrică, instalate pe suprafețele inferioare și pe cele laterale. Precauția este necesară pentru a evita apariția de puncte reci care pot conduce la solidificarea plumbului. Sistemul de încălzire al vasului principal va fi, cu predilecție, utilizat pentru a atinge intervalul de temperatură necesar pentru experimente.

Instrumentația instalației constă în principal din:

- (1) termocuple pentru monitorizarea temperaturii în vasul principal (adică, plumbul și gazul de acoperire),
- (2) termocuple de perete pentru monitorizarea temperaturii pe suprafața vasului principal, a rezervoarelor, precum și pe pereții conductelor,
- (3) traductoare de presiune pentru monitorizarea presiunii în interiorul gazului de acoperire,
- (4) instrumentația pentru analiza chimică a plumbului, spre exemplu SEM (microscopie electronică de scanare), cromatograf de gaze, XRD (difracție de raze X), spectroscop de masă, DSC (calorimetrie cu scanare diferențială), etc.

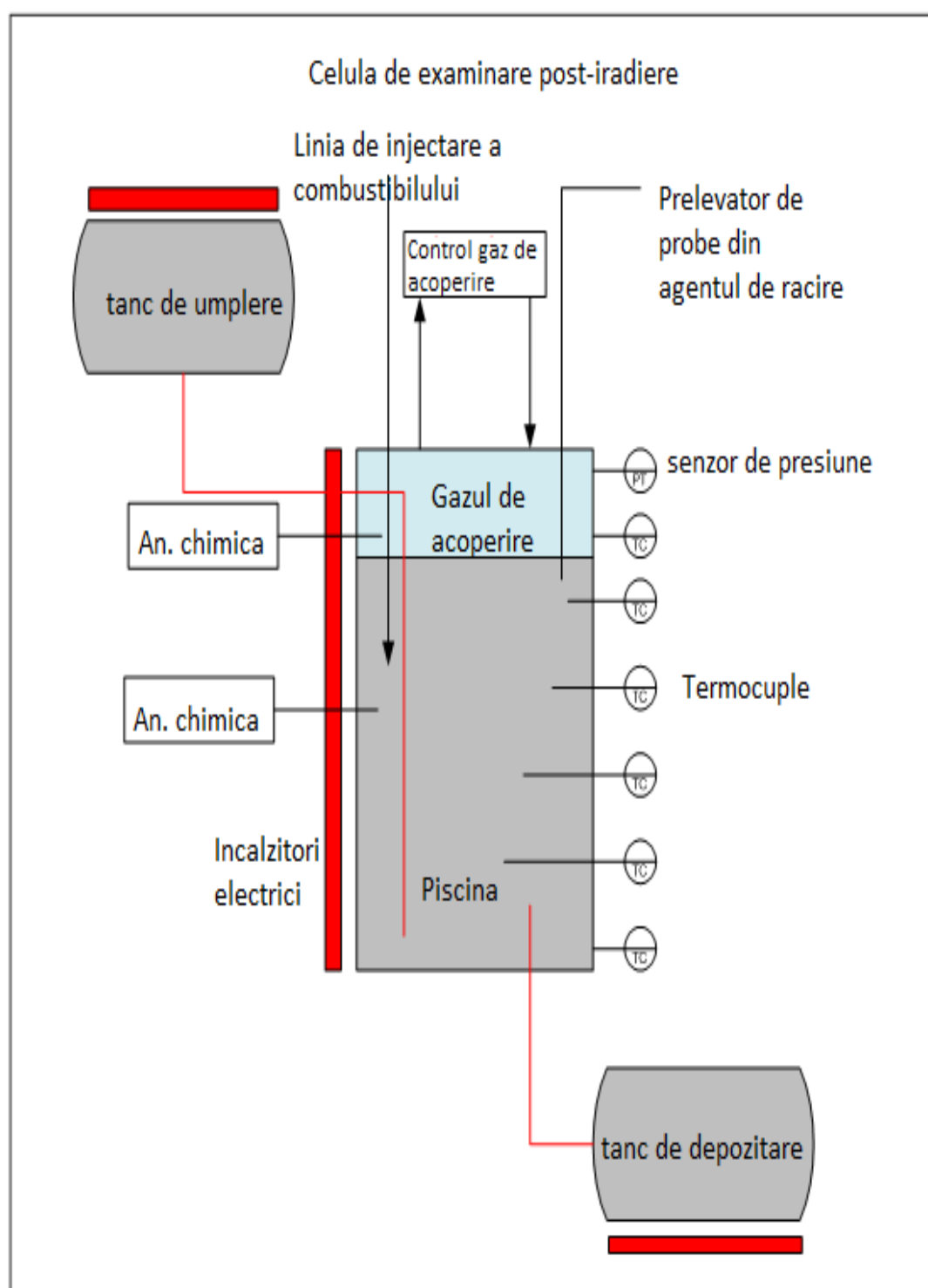


Fig.7.1.1 Structura conceptuala a modului Meltin'Pot_1

7.2 Instalația experimentală Meltin'Pot_2 dedicată investigării dispersiei/relocalizării combustibilului

Instalația Meltin'Pot_2 este destinată investigării dispersiei combustibilului și relocarea acestuia în lichidul de răcire după un accident sever.

Instalația va funcționa într-o celulă fierbinte din cauza utilizării de combustibil iradiat. Experimentele urmăresc să evalueze mecanismele de dispersie a combustibilului proaspăt și a celui iradiat (în funcție de gradul de ardere). Mai mult, vor fi testate diferite compoziții ale combustibilului în interacțiune cu plumbul aflat la temperaturi diferite.

Componentele necesare sunt similare cu cele ale instalației Meltin'Pot_1:

- (1) o regiune de tip placă, reprezentând o secțiune a vasului reactorului, umplută cu plumb topit, acoperit cu gaz inert (argon) și prevăzută cu capac pentru etanșeizare; în interiorul acestei regiuni au loc reacțiile de interes. Volumul interior este de aproximativ 5 L. Sistemul este izolat termic și este echipat cu rezistențe electrice pentru încălzire, pentru a menține temperatura plumbului în domeniul de interes al experimentelor planificate (400-750 °C),
- (2) un sistem de control al gazului de acoperire, care monitorizează și controlează presiunea gazului de acoperire, precum și compoziția chimică a acestuia,
- (3) două rezervoare de depozitare pentru umplerea plumbului pur și evacuarea plumbului contaminat,
- (4) sistem de monitorizare a celulei fierbinți (inclusiv monitorizarea compoziției chimice),
- (5) sistem de control al celulei pentru presiunea atmosferei din celula (ușor sub-presurizată);
- (6) sistem dedicat injectiei de combustibil (pastile, fragmente) în interiorul vasului principal.

Schema conceptuală a instalației experimentale Meltin'Pot_1 este prezentată în Figura 7.2.1.

Instrumentația necesară constă, în principal, din:

- (1) termocuple pentru monitorizarea temperaturii în vasul principal (adică în volumul de plumb topit și în gazul de acoperire),
- (2) termocuple de perete pentru monitorizarea temperaturii pe pereții vasului principal, ai rezervoarelor și pe pereții conductelor,
- (3) traductoare de presiune pentru monitorizarea presiunii în interiorul gazului de acoperire,

- (4) sistem de scanare gamma pentru monitorizarea concentrației și depunerilor de fragmente de combustibil de-a lungul plăcii și/sau dispersarea acestora în lichidul de răcire,
- (5) instrumentație pentru măsurarea coeficienților de difuzie a combustibilului în plumb.

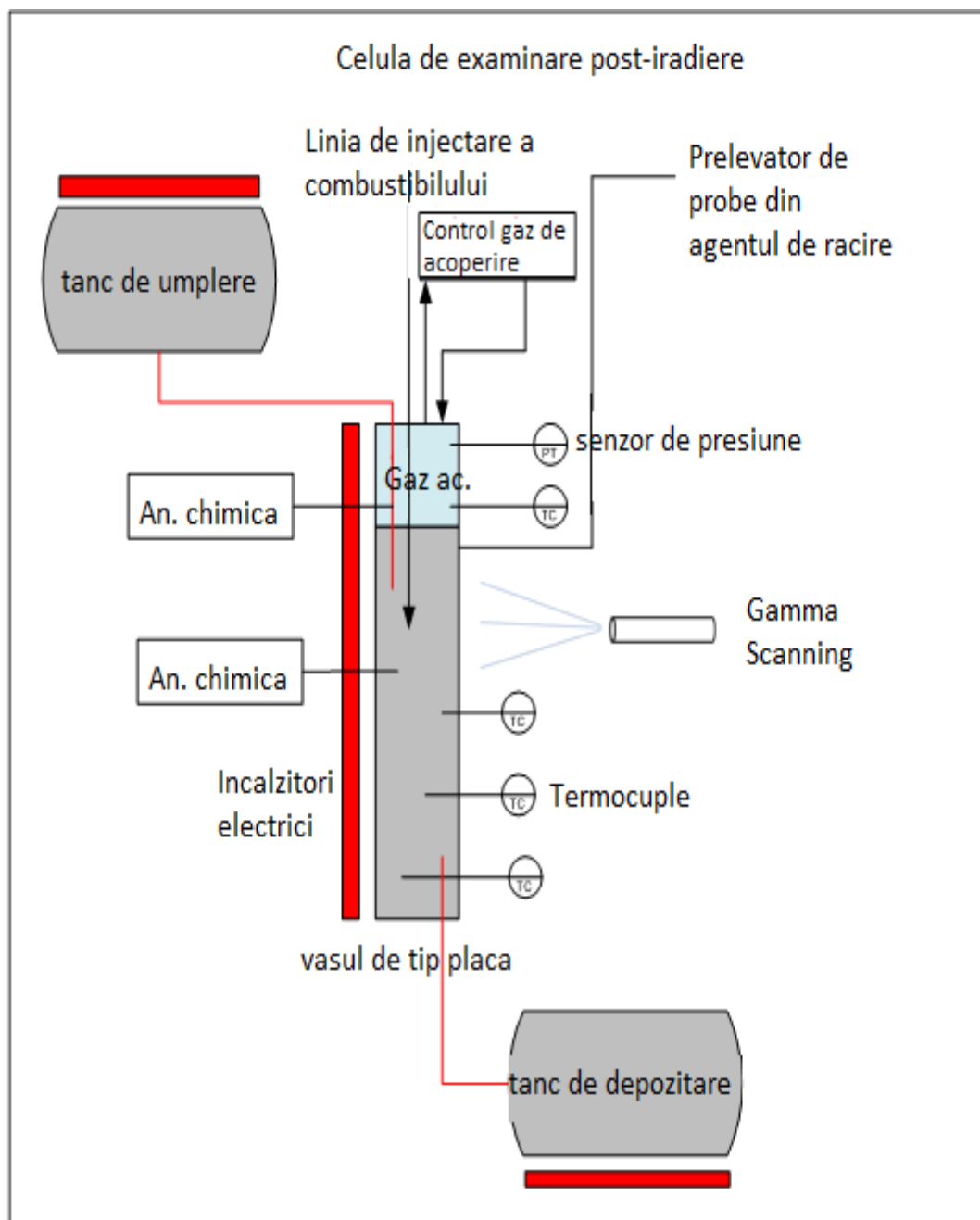


Fig.7.2.1 Structura conceptuală a modului Meltin'Pot_2

7.3 Instalația experimentală Meltin'Pot_3 dedicată investigării dispersiei produșilor de fisiune

Instalația Meltin'Pot_3 este destinată investigării retenției produșilor de fisiune (PF) în plumb și/sau migrația acestora în gazul de acoperire. În acest scop, experimentele prevăd utilizarea izotopilor stabili, reprezentând din punct de vedere al comportamentului chimic produși radioactivi. Sistemul poate fi găzduit într-o boxă prevăzută cu mănuși de manipulare.

Instalația este formată din următoarele componente (Figura 7.3.1):

- (1) vas principal, umplut cu plumb, cu gaz inert (argon) și capac de etanșeizare, în care se injectează elementele chimice studiate (ca izotopi stabili). Volumul interior al vasului este de aproximativ 5 l. Vasul este izolat termic și echipat cu rezistențe electrice de încălzire, pentru a menține sistemul în domeniul de temperatură de 400-750 ° C,
- (2) un sistem de control al gazului de acoperire, care monitorizează și controlează presiunea gazului de acoperire, precum și compoziția chimică a acestuia,
- (3) două rezervoare de depozitare pentru umplerea instalației cu plumb pur și drenarea plumbului folosit,
- (4) sistem de control al boxei cu mănuși (inclusiv monitorizarea compoziției chimice),
- (5) sistem de control al boxei cu mănuși pentru presiunea din interiorul acesteia (ușor sub-presurizată),
- (6) sisteme dedicate pentru injectarea izotopilor în interiorul vasului principal.

Instrumentația constă în principal din:

- (1) termocuple în volum și de perete pentru monitorizarea temperaturii în vasul principal (volumul de plumb topit, volumul de gaz de acoperire) și temperatura pe pereții vasului principal, ai rezervoarelor de depozitare și pe pereții conductelor,
- (2) traductoare de presiune pentru monitorizarea presiunii în interiorul gazului de acoperire,
- (3) instrumente pentru analiza chimică a plumbului, spre exemplu SEM (microscopie cu electroni de scanare), cromatograf pentru gaze, difracție de raze X, spectroscopie de masă, DSC (calorimetrie cu scanare diferențială), etc.

În cazul în care obiectivele experimentale vor fi redefinite pentru investigarea retenției și transferului PF radioactivi instalația Meltin'Pot_3 poate fi găzduită în

interiorul celulei post-iradiere. În acest caz, va fi prevăzută o instrumentație dedicată pentru măsurarea dozelor.

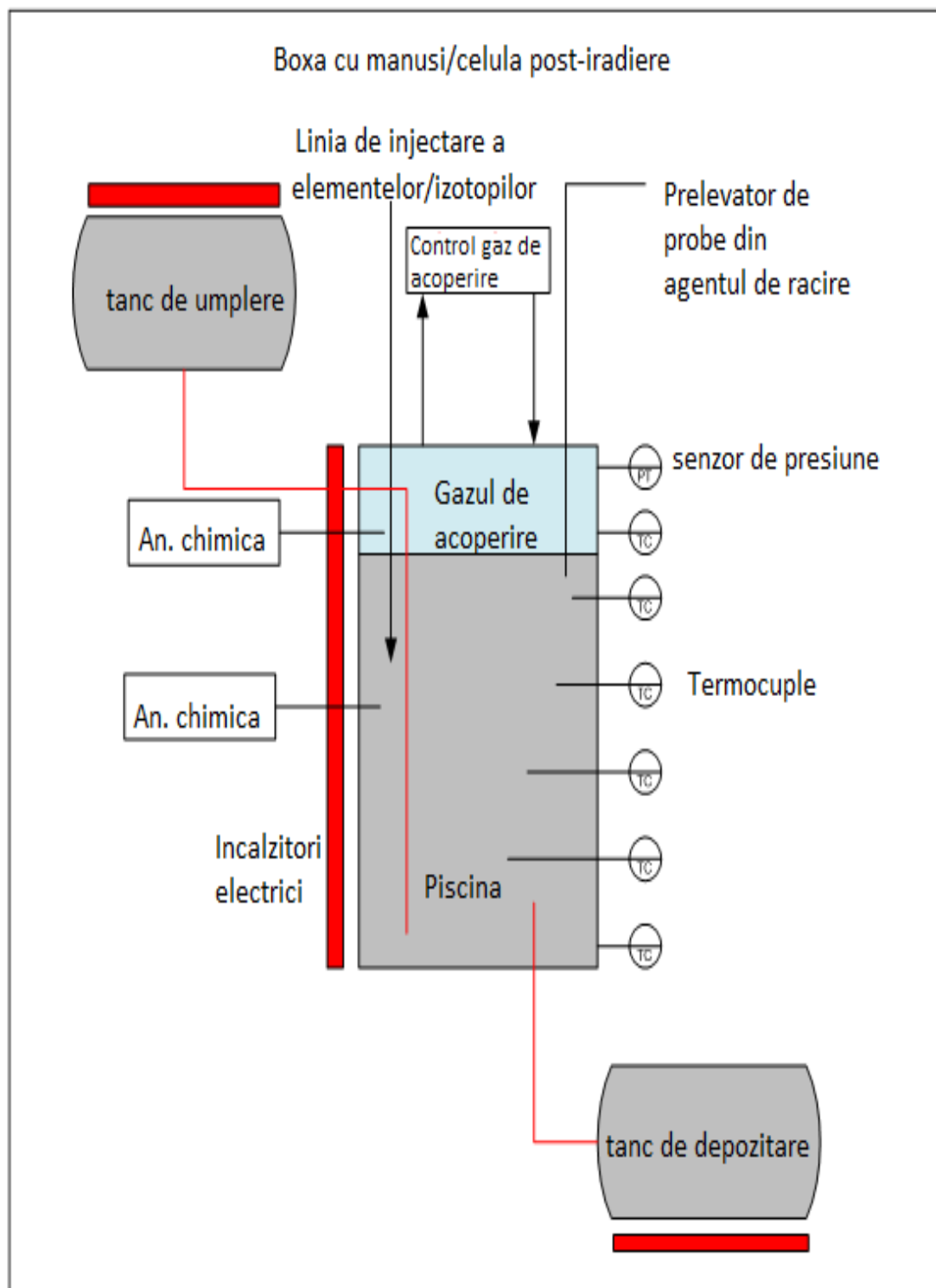


Fig.7.3.1 Structura conceptuală a modului Meltin'Pot_3

7.4 Instalația experimentală Meltin'Pot_4 dedicată investigării retenției și dispersiei Poloniului

Instalația Meltin'Pot_4 este destinată investigării retenției în plumb a Poloniului, un element cu riscuri radiologice și toxicologice mari și un subiect sensibil al tehnologiei LFR.

În special, este prevăzută investigarea volatilității Po la diferite concentrații ale acestuia în plumb. În acest sens se va ține cont de concentrația maximă (calcul conservativ) de Po în ALFRED, de inventarul total al plumbului și activitatea maximă permisă a celulei post-iradiere. Pe baza acestor considerații va fi fixată cantitatea totală de izotopi care trebuie diluați în plumbul topit al instalației experimentale Meltin'Pot_4.

Mai mult, va fi prevăzută o buclă de apă și o buclă de gaz, conectate la vasul principal în vederea investigării influenței apei (aburului) și a gazului (de exemplu, Ar) asupra volatilizării izotopilor Po în plumb prin fenomenul de „stripping”.

Instalația este formată din următoarele componente (Figura 7.4.1):

- (1) vas principal, umplut cu plumb, acoperit în partea superioară de gaz inert (argon), etanșeizat cu capac, în care se vor injecta izotopii Po. Volumul interior al vasului este de aproximativ 5 l. Vasul principal este izolat termic și echipat cu rezistențe electrice de încălzire, pentru a menține temperatura în domeniul 400-750 ° C,
- (2) un sistem de control al gazelor de acoperire, care monitorizează și controlează presiunea gazului de acoperire, precum și compoziția chimică a acestuia,
- (3) două rezervoare de depozitare pentru umplerea plumbului pur și evacuarea plumbului contaminat,
- (4) sistem de control al celulei fierbinți (inclusiv monitorizarea compoziției chimice),
- (5) sistem de control al celulei pentru presiunea în atmosferă (ușor sub-presurizată),
- (6) sisteme dedicate pentru injectarea de Po în vasul principal,
- (7) bucla pentru injectia de gaze în interiorul vasului principal,
- (8) bucla dedicată injectării apei în interiorul vasului.

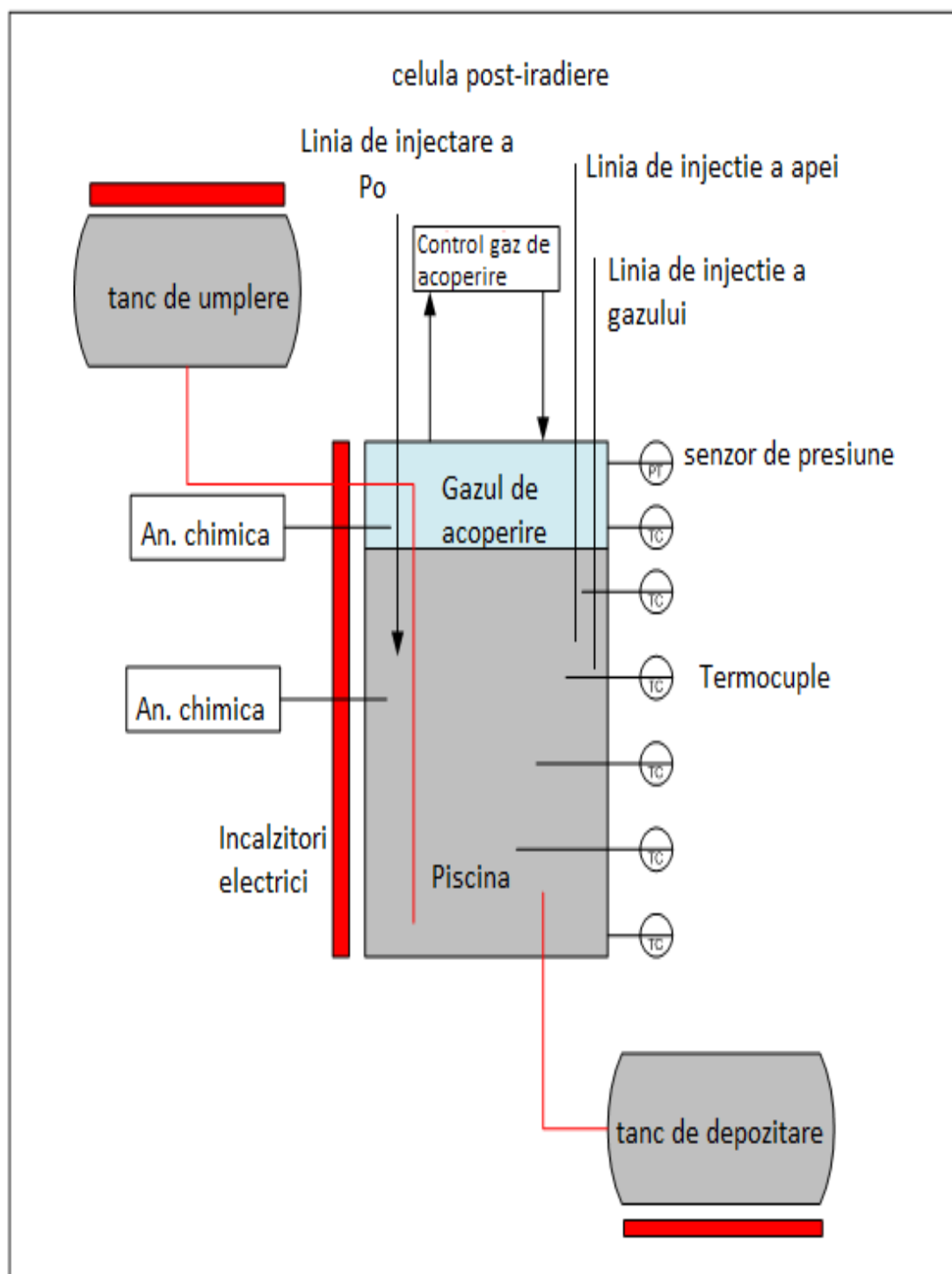


Fig.7.4.1 Structura conceptuală a modului Meltin'Pot_4

Instrumentația constă în principal din:

- (1) termocuple de volum și de perete pentru monitorizarea temperaturii în vasul principal (în volumul de plumb topit și în

cel de gaz de acoperire) și temperatura pe pereții vasului, ai rezervoarele de depozitare, precum și pe pereții conductelor,

- (2) traductoare de presiune pentru monitorizarea presiunii în interiorul gazului de acoperire,
- (3) instrumentație pentru analiza chimică a plumbului și a gazului de acoperire, de exemplu, microscopie electronică de scanare (SEM), cromatografie de gaz, difracție cu raze X (XRD), spectroscopie de masă, calorimetrie cu scanare diferențială (DSC), termo-cromatografie (TC) etc,
- (4) Instrumentație pentru măsurarea dozelor.

8. Elemente de investigație pentru proiectul conceptual

În cadrul proiectului conceptual vor fi investigate următoarele:

- (1) Stabilirea celulei de amplasare din cadrul laboratorului de examinare post-iradiere,
- (2) Definirea de soluții de proiectare pentru cele patru module ale instalației dedicate investigării:
 - interacțiunii combustibilului nuclear cu plumbul topit,
 - dispersiei/relocalizării fragmentelor de combustibil,
 - retenției produșilor de fisiune în plumb topit, transportul acestora către gazul de acoperire,
 - retenției și dispersiei poloniului.
- (3) Definirea instrumentației de măsurare și control a fenomenelor investigate, stabilirea parametrilor de performanță,
- (4) Adoptarea unei strategii de lucru bazată pe:
 - a) parcurgerea unei prime etape în care se va lucra cu substanțe neradioactive,
 - b) trecerea ulterioară la investigarea comportamentului radioizotopilor.
- (5) Aspecte privind regimul de operare și cel de întreținere al celor patru module experimentale ale instalației Meltin'Pot.

9. Recomandări

În vederea implementării realizării proiectului conceptual al instalației experimentale Meltin’Pot și ulterior a implementării, în orizontul de timp planificat pentru realizarea reactorului de demonstrație ALFRED, sunt recomandate următoarele acțiuni:

- (1) investigarea posibilităților de amplasare pe platforma nucleară de la Mioveni, în cadrul laboratorului de examinare post-iradiere, într-una din celulele fierbinți existente, ținând cont de utilizarea acestora pentru alte experimente și de disponibilitatea pe termen lung,
- (2) discutarea amplasării sistemelor de achiziție și analiza în interiorul celulei sau în afara acesteia și identificarea soluției optime,
- (3) realizarea proiectului conceptual în care să fie introduse detaliile constructive, funcționale, precum și cele necesare pentru instrumentație.

10. Concluzii

(C1) Raportul prezinta elementele fenomenologice necesare sa fie investigate in cadrul studiilor experimentale pentru accidente severe in tehnologia LFR in vederea identificării configurațiilor pe baza cărora sa fie definita instalația Meltin'Pot.

(C2) Meltin'Pot va permite realizarea de studii privind retenția produșilor de fisiune, a radioizotopilor si speciilor asociate in mediul de plumb lichid, depozitarea acestora pe elementele structurale, precum si transportul acestora catre gazul de acoperire.

(C3) Instalația experimentală va avea un modul dedicat investigării retenției si transportului poloniului in volumul de plumb, migrației către gazul de acoperire, precum si influenței injecției de vapori de apă in volumul de plumb topit,

(C4) Meltin'Pot va permite realizarea de studii privind fragmentarea pastilelor de combustibil in contact cu plumbul lichid si dispersarea acestora in mediul agentului de răcire, in regim de circulație naturala, precum si formarea unor configurații de fragmente de combustibil la interfața dintre plumb si gazul de acoperire.

(C5) Lucrarea oferă elementele conceptuale principale (structura geometrică a instalației pentru fiecare dintre cele patru module propuse, componente, funcționalitate, instrumentație) in vederea lansării activității de proiectare conceptuală, pe baza căreia se va realiza, ulterior, studiul de fezabilitate.

(C6) Lucrarea oferă un set de recomandări pentru realizarea proiectului conceptual, inclusiv formularea principalelor elemente de investigație necesare.

11. Referinte

- [1] https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_59461/generation-iv-systems
- [2] “ALFRED, Advanced Lead-cooled Fast Reactor Demonstrator”, GIF, September, 2018
- [3] EU, 2017, „The Strategic Energy Technology Plan (SET Plan)”, DG RTD, DG Energy, JRC doi:10.27777/48982.
- [4] SNETP Strategic Research and Innovation Agenda, February 2013
- [5] <http://www.snetp.eu/esnii/>
- [6] P. Agostini, A. Alemberti, M. Apostol, M. Constantin, D. Diaconu, M. Frignani, G. Grasso, D. Gugiu, M. Nitoi, M. Tarantino, I. Turcu, G. Villabruna, „Elements of the ALFRED Project”, FALCON-PUB-GOP-001, prezentat la sedinta Comitetului Executiv ESNII, Brussels, 21 martie 2018
- [7] M. Constantin, „Elemente strategice privind dezvoltarea filierei LFR in cadrul FALCON”, RATEN-ICN, RI-11358-2017
- [8] M. Teodorescu, „Studiu privind amplasarea instalațiilor experimentale suport pe amplasamentul ICN”, PRO-ALFRED, WP1-L1.6, Nov. 2019
- [9] M. Jolkkonen, J. Wallenius, Report on source term assessment for the ETDR (ALFRED), deliverable LEADER, WP5, 2013
- [10] O. Kubaschewski, and C.B. Alcock, “Metallurgical Thermochemistry”, 5th ed. Pergamon Press, Oxford, 1979

Glosar

AIEA=Agenția internațională pentru energie atomică,
ALFRED (Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator)=Demonstratorul european al tehnologiei reactoarelor rapide răcite cu plumb,
ATHENA=instalație experimentală de tip piscină, pentru tehnologia LFR,
ChemLab=laboratorul chimic dedicat tehnologiei LFR,
CR (Control Rods)=bare de control și comanda,
DHR (Decay Heat Removal)=sistemul de evacuare a căldurii reziduale,
Dpa (deplacement per atom)=indicator de impact al radiației asupra materialelor, deplasări per atom,
EIA (Energy International Agency)=Agenția Internațională pentru energie,
ESNII (European Sustainable Nuclear Industry Initiative)=Inițiativa industriei nucleare europene,
HLM (Heavy Liquid Metal)= tehnologii bazate pe metale grele lichide,
HP (High Pressure)= partea de înaltă presiune,
IC (isolation condenser)= sistem de condensare a aburului,
ISI (in-service inspectie)= activități de inspecție,
LFR (Lead Fast Reactors)= tehnologia reactorilor cu neutroni rapizi, răciți cu plumb,
LEPI=laborator pentru examinări post-iradiere
LOCA (Loss of Coolant Accident)=accidentul de pierdere a agentului de răcire,
LP (Low Pressure)= partea de joasă presiune,
MID=mașina de încărcat/descărcat,
MOX (Mixed Oxide)=combustibil format din amestec de oxizi de uraniu și plutoniu,
NEA (Nuclear Energy Agency)= Agenția pentru energie nucleară,
PF = fragmente de fisiune (produsi de fisiune)
PP (Primary Pump)=pompa de circulație în sistemul primar,
RATEN=Regia autonomă tehnologiei pentru energetica nucleară,
RATEN ICN=Institutul de Cercetări Nucleare,
RV (Reactor Vessel)=vasul reactorului,
SET Plan (Sustainable Technology Plan)= Planul pentru tehnologii durabile,

SNETP (Sustainable Nuclear Energy Technology Platform)=platforma tehnologica pentru energie nucleara sustenabila,

SMR (Small Modular Reactor)=reactor modular mic,

SFP (Spent Fuel Pool) = piscina de stocare a combustibilei ars

SG (Steam Generator)=generator de abur,

SR (Safety Rods)=bare de securitate,

SV (safety vessel)= vasul de securitate.