



L 2.1- Raport privind abordarea gradată în operare

Pachet de Lucru: 2

Activitatea: 2.1-1

Responsabil livrabil: Mirela NIȚOI (RATEN ICN)

Autor: Mirela NIȚOI (RATEN ICN)

Termen: 25.11.2019

Proiectul PRO ALFRED este finantat 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			
Funcția	Nume	Data	Semnatura
Director Adj. Științific:	Alexandru Toma		
Director Proiect	Daniela Diaconu		
Șef compartiment MC	Gheorghe Savu		
Responsabil Pachet de Lucru	Mirela NITOI		
Responsabil Livrabil	Mirela NITOI		
Autori:	Mirela NITOI		

L2.1 - Raport privind abordarea gradată în operare

CUPRINS

Rezumat	1
Lista Acronime	2
1. Introducere	3
2. Aspecte conceptuale ale proiectului	4
2.1 Descriere proiect ALFRED.....	4
2.1.1 Sistemul principal de răcire și sistemele de securitate.....	4
2.1.2 Circuit secundar	8
2.1.3 Sisteme auxiliare	10
2.2 Fenomene relevante pentru securitate	15
3. Abordare etapizată de operare	18
Etapa 1 – Temperatură scăzută	19
Etapa 2 – Temperatură medie	20
Etapa 3 – Temperatură ridicată	22
3.1 Considerații despre materialele structurale din RCS.....	23
3.2 Selectarea măsurilor de protecție	25
3.3 Materiale candidate RCS.....	28
3.4 Limite de proiectare	30
Limite termice	31
Limite mecanice.....	31
3.5 Considerații generale privind criteriile de acceptare pentru RCS.....	32
4. Concluzii	36
Referințe.....	37

Rezumat

Prezentul document conține aspecte referitoare la proiectul demonstratorului, cu prezentarea generală a reactorului, principalele componente cu care este echipat și caracteristicile fenomenologice de interes pentru securitate.

Dupa notiunile introductive, in capitolul 2 este prezentata cea mai recentă configurație a sistemului, cu descrierea sistemului de răcire a reactorului, a sistemelor de transport și a sistemelor de securitate, împreună cu o descriere generală a arhitecturii instalației. Cele mai relevante fenomene fizice din punct de vedere al securității în operare sunt specificate, acordandu-se o atenție deosebită pentru cele de transport de masă și energie.

Pentru a sprijini acumularea de experiență operațională și a nu pune piedici majore pentru procesul de autorizare a configurației instalației, a fost dezvoltata o abordare etapizată de operare, cu care instalația este de așteptat să funcționeze gradat de la un nivel de putere scăzută la niveluri de putere crescând.

Strategia de operare a reactorului numită abordare gradată/ etapizată de operare are ca scop aducerea gradată a reactorului de la o putere și temperatură scăzută, la o condiție de operare caracteristică flotei comerciale a reactorilor raciti cu plumb. Strategia adoptata implica un proces etapizat de operare atât în termeni de marje de operare, cat și de criterii de acceptare pentru SSC.

Lista Acronime

Acronim	Definitie
ALFRED	Demonstratorul European pentru Reactorii Rapizi Raciti cu Plumb (Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator)
BoP	Partea Clasica a centralei (Balance of Plant)
CP	Zona rece din piscina (Cold Pool)
DC	Racitor imersat in plumb (Dip Cooler)
DHR	Indepartare a caldurii reziduale (Decay Heat Removal)
E-DHR	Indepartare a caldurii reziduale in conditii de urgenta (Emergency Decay Heat Removal)
FA	Ansamblu Combustibil (Fuel Assembly)
HP	Zona calda din piscina (Hot Pool)
IS	Structura interna (Internal Structure)
LFR	Reactor rapid racit cu plumb (Lead Fast Reactor)
LOCA	Accident de pierdere a agentului de racier (Loss Of Coolant Accident)
MOX	Combustibil mix de oxid de uraniu-plutoniu (Mixed Oxide Fuel)
RCP	Pompa Racire Reactor (Reactor Coolant Pump)
RCS	Sistem de racire reactor (Reactor Coolant System)
RV	Vas reactor (Reactor Vessel)
SG	Generator de abur (Steam Generator)
SSC	Structuri, sisteme, componente (Structures, Systems & Components)
SV	Vas de siguranta (Safety Vessel)
ZA	Zona Activa

1. Introducere

Pachetul de lucru nr.2 al proiectului PRO-ALFRED, intitulat „Elemente și studii preliminare pentru licențierea demonstratorului ALFRED” propune realizarea unor elemente necesare pregătirii procesului de autorizare a demonstratorului ALFRED, prin activități distribuite în două etape.

Activitățile propuse în etapa 1 (Elemente de viziune asupra procesului de validare a proiectului demonstratorului ALFRED) adresează contextul actual din România, în care nu există documente de reglementare (norme, ghiduri) elaborate în mod specific pentru reactoarele de GenIV și, în special, pentru proiectarea ALFRED. Pentru a sprijini acumularea de experiență operațională și a nu pune piedici majore pentru procesul de autorizare a configurației instalației, a fost considerată necesară dezvoltarea unei abordări etapizate, cu care instalația este de așteptat să funcționeze gradat de la un nivel de putere scăzut la niveluri de putere crescând.

Prezentul document conține aspecte referitoare la proiectul demonstratorului, cu prezentarea generală a reactorului, principalele componente cu care este echipat și caracteristicile fenomenologice de interes pentru securitate. Totodată, este prezentată strategia de operare a reactorului numită abordare gradată/ etapizată, care are ca scop aducerea reactorului de la o putere și temperatură scăzută, la o condiție de operare caracteristică flotei comerciale a reactorilor raciti cu plumb.

Acest document va sta la baza realizării aplicației de validare a proiectului demonstratorului ALFRED, în perioada următoare (aplicația nu va fi realizată în cadrul proiectului PRO-ALFRED).

Pentru completarea competențelor privind certificarea proiectelor de reactori inovativi, au fost achiziționate servicii de consultanță vizând ultimele practici utilizate pe plan internațional în acest domeniu, și dezvoltarea abordării etapizate de operare în cazul ALFRED.

2. Aspecte conceptuale ale proiectului

Opțiunile de proiectare reprezintă aspecte conceptuale ale instalației care variază de la structura acesteia, fenomenele fizice de interes - cu referire specială la cele legate de securitate – până la modurile operaționale ale instalației, puterea termică produsă și condițiile de funcționare termodinamică.

2.1 Descriere proiect ALFRED

2.1.1 Sistemul principal de răcire și sistemele de securitate

ALFRED este un reactor rapid racit cu plumb de tip piscină, în care toate componentele care alcătuiesc sistemul de răcire (RCS) sunt instalate în interiorul vasului reactorului (RV), asigurând o configurație compactă. În plus, RV-ul este înconjurat de o graniță de siguranță externă (vasul de siguranță SV) asigurând răcirea circuitului primar și în cazul unei defecțiuni a RV. Figura 2.1 prezintă o vedere a exteriorului RCS care prezintă SV, RV și regiunea superioară în care echipamentul principal este instalat cu ajutorul unor flanșe circulare standard, și anume pompe principale de răcire (RCP), generatoare de aburi (SG) și racitorii scufundați (DC) ai sistemului de îndepărtare a căldurii reziduale în condiții de urgență (E-DHR).

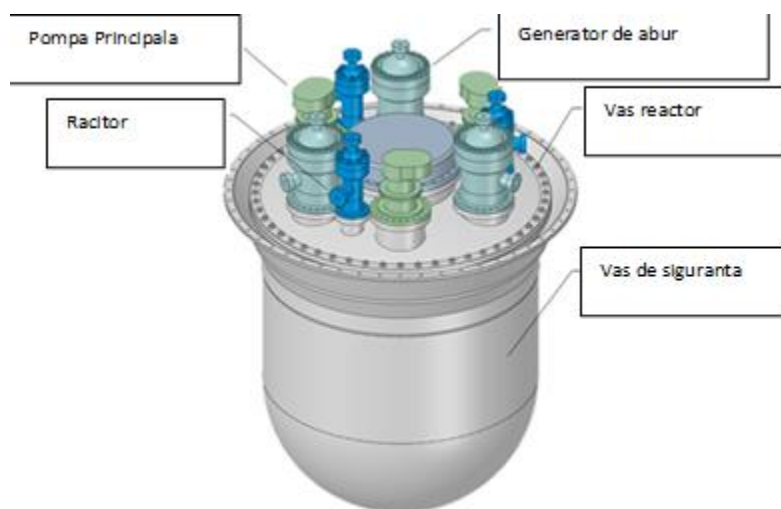


Figura 2.1 - Vedere externa ALFRED RCS

Sistemul de transport al căldurii realizează circulația agentului de răcire prin canalele de combustibil, în scopul evacuării căldurii reziduale din ZA. Căldura transportată de agentul de răcire este transferată agentului secundar în generatorii de aburi, aceasta transformându-se în abur saturat care pune în mișcare turbina. Fluidul de răcire este circulat în permanență în timpul funcționării reactorului, pe durata opririi și în

L2.1 - Raport privind abordarea gradată în operare

perioada de intretinere. Este prevazuta instrumentatie pentru a monitoriza debitul, temperatura si radiatiile din circuitul primar – cu rolul de a arata operarea corespunzatoare si performanta de racire asociata.

Toate componentele situate in interiorul vasului reactorului sunt inlocuibile.

Protectia la seism se realizeaza prin existenta echipamentelor de amortizare a undelor seismice – izolatori 2D ce sprijina cladirea reactorului

ALFRED este prevazut cu 2 sisteme de oprire, independente, diverse si redondante. Sistemul de oprire nr.1 foloseste bare absorbante si este sistemul de oprire pasiv inserat de flotabilitate din partea de jos a ZA. Sistemul de oprire nr.2 foloseste bare de absorbtie inserate pneumatic (prin depresurizare) din partea de sus a ZA. [6]

Configurația internă a reactorului este prezentata in figura 2.2 care prezintă o secțiune transversală cu ZA, canalul RCP, SG și structura internă (IS) constând dintr-o serie de granite metalice pentru a garanta o direcție de curgere specifică a agentului de răcire. Pornind de la intrarea în ZA, plumbul este încălzit în canalele ansamblurilor de combustibil, si iese cu o temperatura ridicata deasupra ZA. De acolo, agentul de răcire este pompat prin canalele pompei până la zona caldă superioară din piscina (HP) de unde intră în SG-uri pentru a transfera căldura catre circuitul secundar. De la ieșirea din SG, fluxurile de plumb continuă sa urce urmând IS până la suprafața liberă unde intră într-o serie de ferestre din IS pentru a ajunge la RV și a coborî spre partea inferioară, înainte de a intra din nou în ZA. ZA prevede utilizarea unui canal central cald ca secțiune de testare pentru calificarea materialelor și a măsurilor de protecție care trebuie utilizate în etapele succesive ale funcționării ALFRED (abordarea etapizată de operare).

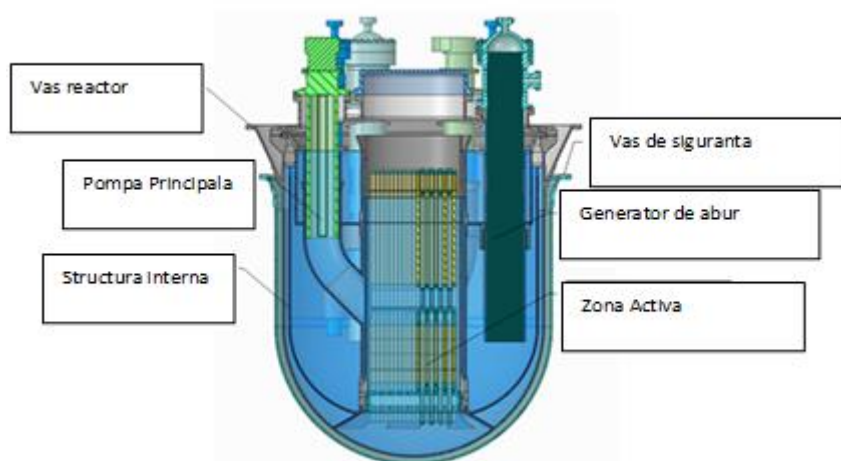


Figura 2.2 - Secțiune RCS

Un desen schematic al ZA este prezentat în figura 2.3, în care ansamblurile de combustibil (FA) sunt împărțite între regiunea internă și cea externă, având diferite îmbogățiri de plutoniu în combustibilul mixt de oxid de uraniu-plutoniu (MOX). ZA prevede două sisteme de oprire independente și redundante bazate pe principii de

acționare diverse. FA-uri hexagonale sunt extinse deasupra suprafeței libere de plumb pentru a simplifica manipularea combustibilului în timpul încărcării / descărcării. Pastilele de combustibil MOX sunt scobite pentru a atenua temperatura maximă a combustibilului și pentru a obține un grad ridicat de ardere.

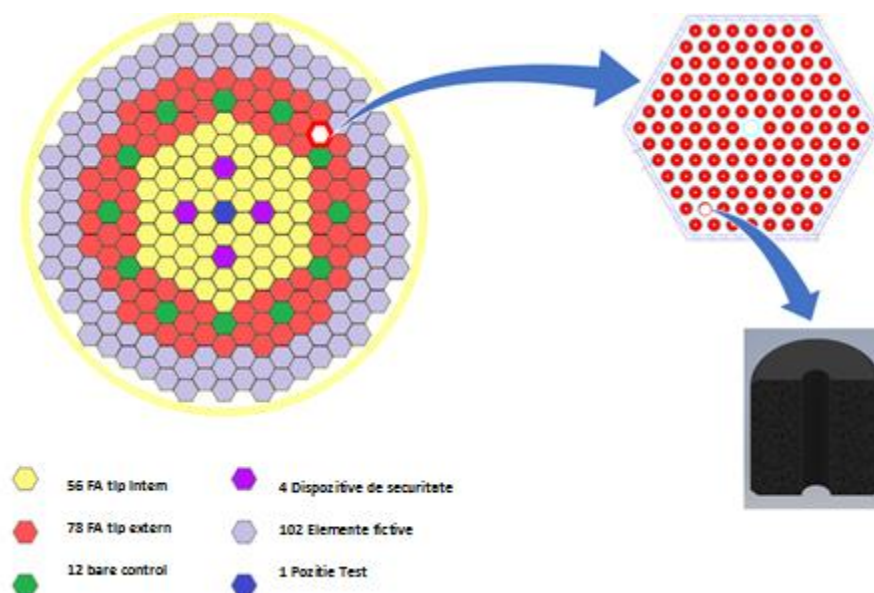


Figura 2.3 - ZA ALFRED – vedere de sus

Schimbatorii de caldura au rolul de a transfera caldura din circuitul primar catre circuitul secundar. Iesirea si intrarea fiecarui tub al SG sunt conectate la colectorul de apa de alimentare si colectorul de abur.

Cele trei SG-uri (figura 2.4) sunt de tip trecere prin tuburi, în care plumbul curge de la vârful HP catre partea inferioară a IS pe partea carcasi, în paralel cu pachetul de tuburi.

Generatorul de abur tip baioneta consta dintr-un set de tuburi coaxiale în care apa intră de sus și coboară până la partea inferioară a tubului interior, al cărui capăt deschis permite inversarea fluxului. Tubul vertical tip baioneta are un tub de securitate extern si un strat de izolare intern. In cazul scurgerii tubului acest aranjament garanteaza ca plumbul din primar nu interactioneaza cu apa din secundar. Spațiul dintre tubul interior și exterior este zona în care apa crește și face schimb de căldură cu plumbul. La ieșire, aburul supraîncălzit este trimis la turbină prin linia principală de abur (circuitul intermediar nu este necesar, ceea ce permite un proiect simplificat si competitiv).

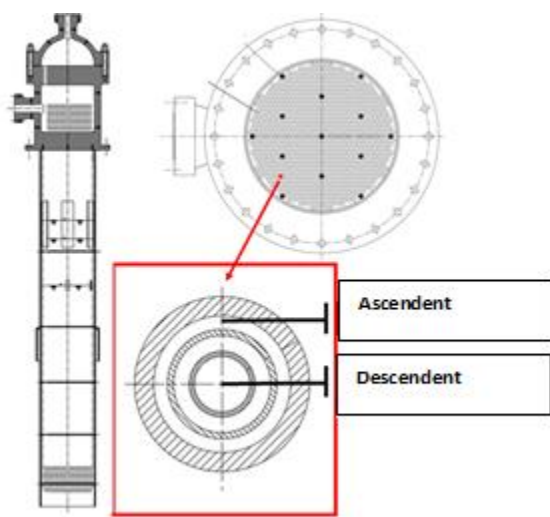


Figura 2.4 - Plan general SG

Trei RCP axiale de viteză mică sunt instalate în locașurile verticale ale IS, asigurând debitul necesar împotriva scăderilor nominale de presiune ale buclei (aproximativ 1,5 bar). Locația de ieșire a ZA permite reducerea lungimii arborelui și simplificarea traseului de curgere a agentului de răcire primar.

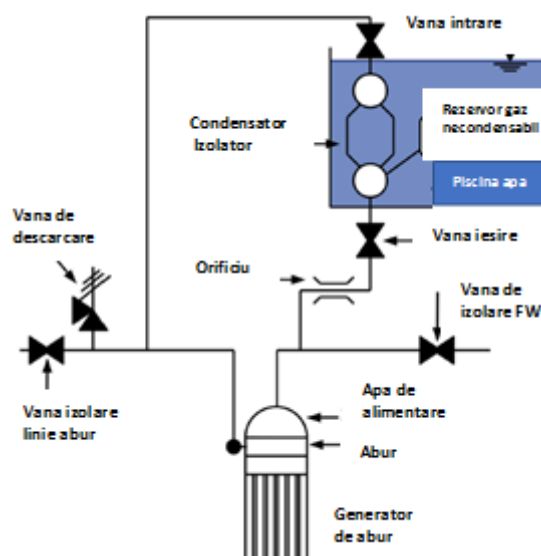


Figura 2.5 - Planul conceptual al sistemului ALFRED DHR

RCS este echipat cu două sisteme DHR diverse, redundante, independente și total pasive, pentru a îndepărta căldura reziduală în caz de accidente baza de proiectare. Primul DHR (figura 2.5) [1] este constituit din 3 bucle conectate fiecare la un SG. Căldura este evacuată prin intermediul energiei și al transportului de masă prin apă clocotită și de condensare la un schimbător de căldură cufundat într-un bazin de apă.

L2.1 - Raport privind abordarea gradată în operare

Sistemul E-DHR este similar cu sistemul DHR și adoptă DC-urile ca schimbătoare de căldură cu RCS. Ambele sisteme au un sistem pasiv de auto-reglare patentat, pentru a întârzia procesul de înghețare a agentului de răcire primar [2] și permit răcirea pasivă a RCS până la 72 de ore (timp de grație).

Tabelul 2.1 prezintă caracteristicile importante ale demonstratorului ALFRED, independent de etapa operațională în care se află reactorul.

Tabel 2.1 - Parametrii ALFRED independenți de etapa de operare

Parametru	Valoare
Tip reactor	Reactor rapid răcit cu plumb
Configurație sistem primar	Tip piscină
Sistem de conversie al puterii	Rankine
Dimensiuni vas reactor	
Diametru interior RV	8.3m
Grosime perete RV	0.13m
Înălțime RV	10.0m
Dimensiuni SG	
Înălțime totală SG	10.41m
Diametru SG (flansa)	1.75m
Combustibil, ZA	
Tip combustibil	MOX
Configurație FA	Hexagonal, închis
Fascicul combustibil	Hexagonal, sprijin-rețea
Agent răcire primar	
Tip	Plumb
Presiune (gaz acoperire)	0.1 MPa
Inventar	3640 tone
Agent răcire secundar	
Tip	Apa

2.1.2 Circuit secundar

Funcția circuitului secundar este de a transporta căldura din circuitul de răcire principal – prin suprafețele de transfer ale schimbătorilor de căldură, către turnurile de răcire, unde este disipată în atmosferă.

L2.1 - Raport privind abordarea gradată în operare



În funcționare normală, plumbul este circulat de pompele principale, iar în generatorii de abur căldura este transferată sistemului secundar, unde se generează abur de 450°C. Partea de abur este direcționată către turbină, făcând-o să funcționeze. Fracția de abur extras paraseste turbină și este îndreptat spre condensator unde este condensat în apă, care este pompată de pompele condensatorului înapoi spre încălzitor, pentru a fi reîncălzită și apoi este pompată înapoi în GA de către pompele sistemului de apă de alimentare.

La proiectarea circuitului secundar, debitul de agent de racire pentru ciclul supraincalzit a permis un proiect compactat; presiunea cea mai scăzută în ciclul supraincalzit reduce solicitările asupra sistemului secundarului – componentelor și conductelor. Partea clasică a ALFRED (BoP) este prezentată în structura sa conceptuală în figura 2.6.

Sistemul generatorului de abur transferă căldura din agentul de racire, apei, pentru formarea aburului, care este îndreptat spre turbină și turbo-generator. Corpul turbinei are două trepte, una de înaltă presiune și una de joasă presiune, ambele reactive. Printre ele există un separator de umiditate și două reîncălzitoare.

După ce trece prin turbină, amestecul apă-abur este răcit și condensat în condensator. Aburul viu poate ajunge direct în condensator prin supapa de bypass fără a intra în turbină. Condensatorul convertește aburul în lichid (apă de alimentare) și acesta este pompat înapoi în GA – după ce este pre-încălzit pentru a minimiza posibilitatea socului termic.

Pornind de la ieșirea condensatorului, ciclul termic are o paralelă cu pompe de extracție condensat (2x100%) și 3 reîncălzitoare de joasă presiune alimentate de golirea de la stadiile de nivel scăzut al presiunii ale turbinei. Un degazor alimentat de ultima treaptă a turbinei de înaltă presiune, reîncălzitorul separator de umiditate și drenurile de retur ale reîncălzitoarelor de înaltă presiune închid regiunea de joasă presiune. În aval de degazor, două pompe de apă de alimentare sunt dispuse în paralel (2x100%) și 4 reîncălzitoare de înaltă presiune alimentate atât de aburul viu, cât și de golirile de la turbină de înaltă presiune. În aval de ultimul reîncălzitor, apa de alimentare este trimisă la SG, de la care se întoarce sub formă de abur supraîncălzit.

BoP are un sistem auxiliar integrat pentru încălzirea apei de alimentare care va fi utilizat în fazele neoperationale ale reactorului. Ciclul termic rezultat permite atingerea unei eficiențe mai mari de 42% (nominal 44,68%) și o funcționalitate bună la sarcini parțiale (până la 25%).

În prezent, opțiunea de proiectare de referință pentru BoP se bazează pe cel mai bun compromis între maturitatea tehnologiei disponibile (același ciclu termic ca Superphénix) și eficiența ciclului termic. În principiu, arhitectura sistemului ar putea fi aplicată pentru condițiile de funcționare a sistemului în fiecare etapă operațională ALFRED.

Cu toate acestea, având în vedere inovația abordării etapizate și a strategiilor de operare specifice, mai multe aspecte sunt subiectul unei evaluări și optimizări ulterioare (aspectele critice se referă în principal la constrângerile din ciclul de apă de alimentare și gradul de supraincalzire limitat la solicitări parțiale). Mai mult, sunt în

L2.1 - Raport privind abordarea gradată în operare



curs de desfășurare investigații cu privire la opțiunile inovatoare pentru a face față integrării cu surse intermitente de energie regenerabilă (adică soluții de stocare a energiei pentru a compensa sarcinile variabile)

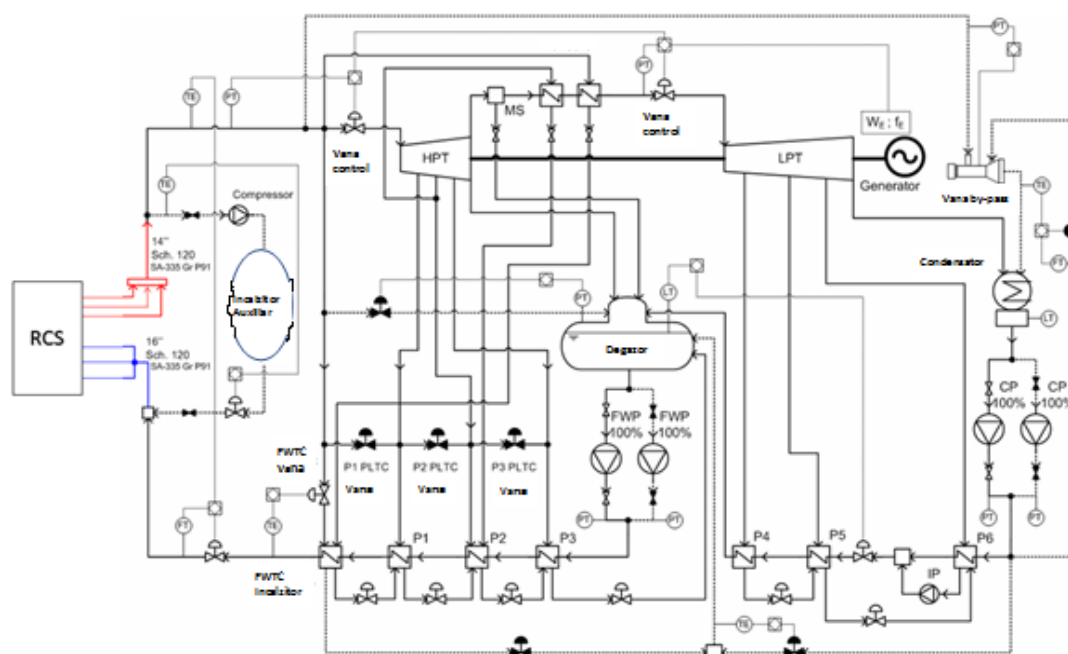


Figura 2.6 - Conceptul ALFRED BoP

2.1.3 Sisteme auxiliare

Lista sistemelor auxiliare este prezentata mai jos, insotita de o descriere calitativa a functiilor pe care trebuie sa le indeplineasca.

Sistemul gazului de acoperire

Sistemul gazului de acoperire este proiectat pentru a îndeplini următoarele funcții:

- Pentru a menține o acoperire de gaz inert pe suprafața liberă a plumbului în toate fazele operaționale ;
- Pentru a asigura controlul parametrilor gazului de acoperire (adică presiune, temperatură, umiditate, activitate) ;
- Pentru a purifica gazul de acoperire.

Volumul de gaz dintre suprafața liberă a plumbului și capacul reactorului absoarbe expansiunea termică și contracția agentului de răcire în timpul funcționării normale și în condiții de accident. Gazul este controlat chimic frecvent sau în mod continuu pentru a menține concentrația de impurități (radioactive sau nu) în limitele prescrise. Dispozitivele Gettering (cum ar fi condensatorul, filtrele și absorbantii) pot fi utilizate

L2.1 - Raport privind abordarea gradată în operare

în acest scop. Prezența H_2O , H_2 și O_2 și senzorii pot fi utilizate pentru a determina dacă un tub SG a dezvoltat o scurgere. În mod analog, prezența precursorilor neutronilor întârziați poate fi utilizată pentru a determina dacă un pin de combustibil a dezvoltat o scurgere. Gazele candidate care vor fi utilizate ca mediu de procesare sunt Argon sau Nitrogen (tbc).

Sistemul de încălzire al plumbului

Sistemul de încălzire al plumbului menține plumbul într-o stare lichidă și la o temperatură prescrisă atunci când reactorul este în stare de oprire. Condițiile de stare lichidă se pot menține pe o perioadă lungă de timp de ordinul săptămânilor, luând în considerare valorile limitate ale pierderilor termice (ordine de magnitudine maximă de 1 MW) și ținând cont de prezența căldurii reziduale. Cu toate acestea, este necesar să se prevadă un sistem de încălzire atât pentru controlul temperaturii, pentru efectuarea unor operațiuni, cum ar fi controlul chimiei și întreținerea, cât și pentru a proteja investiția în cazul întreruperilor neprogramate pe termen lung. Sistemul intenționează să folosească ansambluri electrice fictive pentru a fi introduse în pozițiile periferice ale ZA. O altă soluție are în vedere utilizarea RCP-urilor pentru a încălzi plumbul și a garanta amestecarea rapidă. Cele două opțiuni pot fi cuplate între ele.

Sistemul de condiționare a plumbului

Sistemul de condiționare a plumbului are ca obiectiv menținerea inventarului agentului primar de răcire și a calității chimice în limitele prescrise.

Controlul inventarului de plumb se realizează prin adăugarea sau scoaterea plumbului din RCS pentru a efectua prelevarea de probe de lichid de răcire și schimbarea nivelului, în cazul în care ar fi necesar în timpul întreținerii sau inspecțiilor neplanificate. Sistemul este conceput pentru a preveni drenarea care ar afecta circulația naturală, dar sunt disponibile echipamente temporare suplimentare pentru a drena complet RV-ul în scopuri speciale de întreținere sau de defaectare.

Controlul chimiei servește pentru a măsura concentrația de impurități, cum ar fi oxigenul, produsele de coroziune sau produsele de fisiune și pentru a utiliza măsuri de îndepărtare sau de inserție pentru a respecta limitele de proiectare. Concentrația de oxigen este un parametru fundamental pentru funcționarea corectă a reactorilor LFR, deoarece este strâns legată de efectele corozive ale plumbului:

- Puțin / fără oxigen împiedică formarea unui strat stabil de oxid în jurul structurilor metalice, având ca rezultat creșterea produselor de coroziune în agentul de răcire și a unei degradări accelerate a proprietăților mecanice ale oțelurilor.
- Excesul de oxigen duce la o creștere excesivă a oxizilor de plumb în agentul de răcire care, la atingerea saturației, se precipită și se instalează pe structuri cu riscul de a forma dopuri pe calea de curgere.

Concentrația optimă de oxigen este rezultatul unei combinații de temperaturi operaționale, tip de oțel adoptat și strategie de protecție. Pe baza dovezilor

experimentale găsite până în prezent, se poate presupune că o concentrație în intervalul 10^{-8} - 10^{-6} wt.% este eligibil pentru o funcționare sigură a reactorului. Având în vedere complexitatea sistemului reactorului, sistemul de condiționare a plumbului trebuie să aibă instrumente capabile să măsoare concentrația de oxigen în diferite zone ale RCS în mod continuu și, în același mod, să aibă sisteme pentru adăugarea și extragerea oxigenului în mai multe zone.

Sistemul anvelopei și clădiri civile

Reactoarele care sunt în prezent în exploatare necesită construcția de anvelope de înaltă rezistență pentru a asigura integritatea barierei împotriva eliberărilor radioactive de energie mare. Reactoarele cu tehnologie LFR au o densitate scăzută de putere și, datorită caracteristicilor lichidului de răcire primar, nu sunt predispuse la degajări mari de energie. Singurele surse de presurizare accidentală sunt cele din BoP, adică apa de alimentare și ruperea liniei de aburi sau SGTR, dacă nu sunt gestionate în mod adecvat. Pentru componentele din afara RCS, ruperea implică o presurizare a anvelopei, dar acestea nu transportă niveluri ridicate de produse contaminate, iar sursa de energie este mai mică decât cea a circuitului primar al unui reactor PWR. Ruperea unui SG în interiorul RCS implică o presurizare similară care este atenuată de un sistem de ventilație conectat la partea superioară a reactorului care are ca scop menținerea presiunii în RCS sub limitele de proiectare și în paralel, să separe substanțele activate care au ajuns în plumb. Pe baza acestor considerații fenomenologice, se consideră că, ca principiu de bază, proiectarea anvelopei poate fi realizată prin abaterea de la canoanele utilizate pentru reactoarele racite cu apă, menținând o îmbunătățire a nivelului de securitate pentru public.

În ceea ce privește proiectarea lucrărilor civile, se consideră că calea de urmat este cea a modularizării componentelor, așa cum s-a obținut în ultimele proiecte ale reactorilor din SUA și Canada. Producția în module este dovedită că garantează o reducere a timpului de construcție și a costurilor de investiții, menținând totodată nivelurile de calitate necesare componentelor.

Sisteme electrice, instrumentatie și control

Sistemul electric, precum și instrumentatia și controlul pentru demonstratorul LFR se află în stadiul incipient de dezvoltare. Proiectarea sistemului electric se bazează pe criteriile de proiectare standard disponibile, utilizate recent. Sunt prevăzute următoarele sisteme principale:

- Sistemul electric principal de interfață cu rețeaua,
- Sisteme de distribuție electrică,
- Alimentare de curent continuu și alternativ,
- Generatoare Diesel.

În ceea ce privește sistemul de instrumentatie și control, referindu-se în special la RCS, sunt în curs de dezvoltare următoarele elemente:

- *Instrumentatie neutronică*: scopul său dublu este de a monitoriza continuu reactivitatea ZA și puterea, de la oprire la funcționarea normală și de a oferi o hartă de flux tridimensională a ZA. Datele sunt utilizate pentru a monitoriza operațiunile de alimentare cu combustibil, pentru a anticipa excursii accidentale de putere și pentru a detecta înclinarea distribuției fluxului (deci a puterii), deci în principal pentru sistemul de protecție și monitorizare, precum și pentru a optimiza consumul de combustibil și pentru scop demonstrativ.
- *Instrumentatia din ZA pentru temperatura*: fiecare FA este echipat cu termocuple pentru a furniza informații despre temperatură la ieșirea din ZA. Acest lucru este utilizat și pentru a anticipa condițiile accidentale generate de conectarea FA.
- *Instrumentatie RCP*: fiecare RCP este prevăzut cu blocaje pentru a evita curgerea inversa, senzori fixi pentru măsurarea vibrațiilor la arbore și instrumentatie generală pentru a determina punctul de operare RCP.
- *Instrumentare SG*: fiecare SG este prevăzut cu senzori de temperatură la intrarea și ieșirea componentelor pentru a determina abaterile de la condițiile normale de funcționare.
- *Instrumentare HP și CP*: HP și CP sunt echipate cu senzori de nivel pentru a determina funcționarea corectă a RCS, precum și un set de termocuple pentru a obține o viziune completă a hărților de temperatură RCS. Unele măsurători de temperatură situate în interiorul CP trebuie utilizate ca semnal de declanșare pentru acționarea E-DHR (tbc).

Sistem de protecție împotriva incendiilor

Abordarea de securitate în caz de incendiu este integrată în proiectul instalației, garantând separarea fizică a sistemelor redundante cu impact asupra securității. Sistemul de oprire a reactorului este proiectat astfel încât misiunea sa nu este compromisă de apariția unui incendiu. Materialele utilizate pentru construcția reactorului sunt alese luând în considerare gradul de incendiu și minimizarea cantităților de combustibil inflamabil. Demonstrația de securitate în cazul unui incendiu intern se realizează fără a lua în considerare acțiuni active care vizează stingerea acestuia și maximizarea cantității de materiale inflamabile implicate în accident, în conformitate cu o abordare deterministă. Incendiul extern din cauza impactului unui avion este tratat ca un hazard extern și demonstrația de securitate se realizează în conformitate cu codurile și standardele disponibile.

Manipularea combustibilului

Sistemul de manipulare a combustibilului este prevăzut ca ansamblul de sub-sisteme și componente care să permită transportul ansamblurilor de combustibil ars din ZA în bazinul combustibilului ars și implicit, pentru încărcarea ansamblurilor de combustibil proaspăt, preluate din stocul de combustibil proaspăt, în ZA.

Sistemul de manipulare combustibil folosește compatibilitatea chimică benignă a plumbului cu aerul, bazându-se pe viabilitatea deschiderii acoperișului reactorului într-un mediu inert limitat (pentru a nu afecta puritatea plumbului).

Manipularea ansamblurilor de combustibil este simplificată prin extinderea lor peste nivelul liber de plumb, în vizibilitate deplină. Pentru ansamblurile de combustibil ars, cu o căldură reziduală care necesită dispoziții de răcire în timpul manipulării și transferului, sistemul de manipulare a combustibilului adoptă butelii de transfer, unul pe ansamblu de combustibil. Fiecare butelie este introdusă în reactor, fiind umplută cu plumb; ansamblul combustibil ars este astfel transferat din poziția sa din ZA în butelie, menținând regiunea activă sub plumb. Prin urmare, vasul este sigilat și instrumentat. Toate buteliile sigilate înlocuiesc, de asemenea, bazinul de combustibil ars, pentru depozitarea pe termen lung. Procedura prevăzută permite simplificarea operațiunii de realimentare și, în general, a transportului întregului ansamblu de combustibil, asigurând răcirea pasivă, precum și monitorizarea continuă. Butelia de transfer este în prezent în faza de proiectare.

Sisteme auxiliare standard

Pentru alte sisteme auxiliare suplimentare prevăzute a fi implementate, se prevede ca vor fi adoptate soluții standard, cu modificări minore, după cum este necesar pentru specificul lichidului de răcire cu plumb. Aceste sisteme includ următoarele :

- ☐ Sistem de comunicare
- ☐ Sistem de apă de răcire a componentelor
- ☐ Sistem de aer comprimat și instrumental
- ☐ Sistem de testare a vitezei de scurgere în anvelopă
- ☐ Sistem de protecție împotriva incendiilor
- ☐ Sistem de deseuri gazoase
- ☐ Sistemul de deseuri lichide
- ☐ Sistem de manipulare mecanică
- ☐ Sistem de gaz al centralei
- ☐ Sistem de apă potabilă
- ☐ Sistem de monitorizare a radiațiilor
- ☐ Sistemul de drenare a deșeurilor radioactive
- ☐ Sistemul de drenaj sanitar
- ☐ Sistemul de prelevare secundar
- ☐ Sistem de apă de serviciu
- ☐ Sistem de deseuri în stare solidă
- ☐ Sistem de răcire în zona combustibilului ars

L2.1 - Raport privind abordarea gradată în operare

- ☐ Sistem de combustibil pentru Generatorii Diesel
- ☐ Turbina
- ☐ Sistem de răcire al clădirii turbinei
- ☐ Sistemul de descarcare, de drenare si de ventilare al turbinei
- ☐ Sistem de ape uzate

2.2 Fenomene relevante pentru securitate

Descrierea fenomenelor este detaliată cu unele alegeri care merg în direcția îmbunătățirii securității centralelor prin proiectare. Un prim set de elemente demne de menționat sunt proprietățile unice legate de utilizarea plumbului ca agent de răcire primar. Mai jos este o listă a principalelor caracteristici ale plumbului care pot avea un impact potențial asupra securității, atât pozitive, cât și negative, împreună cu o justificare de contextualizare a problemei:

☐ Coroziunea din plumb topit

Plumbul este selectiv coroziv pentru materialul structural prin diluarea constituenților specifici din acesta, sub formă de nichel și crom care tind să migreze spre suprafață și se dizolvă în plumb topit. Materialul structural trebuie să fie protejat de această amenințare prin pasivizarea suprafeței, utilizând straturi de oxid sau acoperiri. În timp ce calificarea acoperirilor este în curs de desfășurare pentru etapele finale ale ALFRED, materialele structurale avansate care potențial nu sunt afectate de plumbul topit sunt în curs de dezvoltare pentru viitoarele modernizări.

☐ Eroziunea din plumb topit

Plumbul are un comportament eroziv, în special în regiunile cu schimbări mari ale momentului datorită densității mari. Coroziunea și eroziunea pot acționa sinergic.

☐ Acumularea produsilor de coroziune

În cazul unui control necorespunzător al oxigenului și/ sau a patrunderii apei / aerului în RCS, produsele de coroziune tind să se acumuleze în topitură și să se depună în zone de secțiune mică (de exemplu, distanțatoare de combustibil) și în regiuni reci (de exemplu, schimbătoare de căldură), unde pot apărea blocaje de răcire sau reducerea coeficienților de transfer de căldură.

☐ Temperatura ridicată de îngheț

Temperatura de topire a plumbului necesită controlul temperaturii lichidului de răcire atât în timpul funcționării, cât și în condiții de accident. Înghețarea plumbului poate

L2.1 - Raport privind abordarea gradată în operare



induce tensiuni mecanice asupra componentelor RCS. Pentru a împiedica ultima sursă rece a sistemelor DHR să înghețe lichidul de răcire primar în primele 72 de ore, începând de la evenimentul de inițiere al unui accident, acestea sunt echipate cu un sistem patentat care degradează pasiv transferul de căldură printr-un mecanism fizic de condensare în prezența gazelor necondensabile.

□ Densitatea plumbului

Plumbul are o greutate specifică ridicată, ceea ce reprezintă o provocare pentru calificarea seismică a RCS. În plus, efectul de alunecare (momentul de transport al plumbului excitat de o sarcină seismică) poate induce sarcini mecanice pe echipamentele RCS și pe structura de susținere. O altă considerație demnă de remarcat este faptul că prevederile trebuie luate în considerare pentru flotabilitatea indusă echipamentului RCS. Un astfel de echilibru ar trebui să fie luat în considerare și în cadrul accidentelor severe pentru relocarea combustibilului. Densitatea ridicată are un efect pozitiv în ceea ce privește ecranarea gamma, iar relația puternică cu temperatura este un element bun pentru circulația naturală.

□ Opacitate optică

Plumbul lichid este opac, iar suprafața sa este translucidă. Instrumentele de inspecție și întreținere în plumb bazate pe transport trebuie să fie calificate.

□ Toxicitate vapori de plumb

Deși presiunea de saturație scăzută reduce riscul dispersiei mari de vapori de plumb, trebuie asigurată starea corespunzătoare a mediului de lucru, precum și detectoarele.

□ Curățarea plumbului

Procedurile de curățare chimică au fost testate la scară de laborator, dar aplicarea lor nu este încă testată la scară mai mare.

□ Interacțiunea combustibil – agent de răcire

În conformitate cu datele disponibile, există dovezi privind faptul că plumbul topit ar putea fi capabil să rețină produsii de fisiune. Cu toate acestea, există probleme în cazul interacțiunii apă / plumb. Problema este caracteristică în special în fazele de deschidere a reactorului pentru care trebuie luate în considerare procedurile adecvate. În ceea ce privește interacțiunea dintre combustibil / lichid de răcire, până acum s-au efectuat puține experimente, dar primele dovezi sugerează că plumbul topit este substanțial inert cu combustibilii de tip oxid.

Tabelul 2.2 prezintă o selecție a altor proprietăți termice cu o justificare a impactului lor asupra securității.

L2.1 - Raport privind abordarea gradată în operare



Tabel 2.2 - Caracteristici referitoare la securitate ale agentului de racire

<i>Proprietate</i>	<i>Impact asupra securitatii</i>
<i>Temperatura de fierbere</i>	Temperatura de fierbere a plumbului (1749 °C la presiunea atmosferica) permite o marjă mare în ceea ce privește temperatura de operare, reducând probabilitatea de accidente perturbatoare.
<i>Capacitate calorică</i>	Plumbul se caracterizează printr-o capacitate calorică volumetrică ridicată care permite tranziții termici lenti
<i>Proprietăți neutronice</i>	Proprietățile neutronice bune permit un proiect de cadru deschis al ZA, afectând pozitiv circulația naturală și scenariile de blocare a debitului. În plus, plumbul este un material de protecție gamma foarte bun, reducând nevoile de scuturi biologice mari.

3. Abordare etapizată de operare

Implementarea cu succes a reactoarelor LFR se bazează pe abordarea corectă a celor mai critice provocări tehnologice. Un aspect negativ în acest sens este dat de lipsa unei experiențe operaționale susținute de-a lungul anilor, ceea ce duce la percepția unei maturități scăzute a tehnologiei. Istoric, aproximativ 80 de ani de reactor sunt recunoscuți datorită experienței de operare sovietice în propulsia submarină și a unei serii de instalații experimentale [3]. Chiar și trecând cu vederea dificultățile de a găsi informații despre funcționare și procesul de licențiere a acestor reactoare, reactoarele de propulsie au avut condiții de operare foarte diferite în comparație cu reactoarele comerciale LFR planificate ca Generație IV (RCS de tip bucla, spectru de neutroni epitermici, combustibil de uraniu, etc). O referință mai recentă în operarea sistemelor de metale lichide grele este oferită de cele 56 de instalații experimentale care funcționează în prezent în întreaga lume [4] pe care IAEA le clasifică în următoarele domenii principale de aplicare:

1. Putere Zero
2. DBA și DEC
3. Termo-hidraulică
4. Chimia agentului de răcire
5. Materiale
6. Sisteme & Componente
7. Instrumentație ISI&R
8. Instalații cu multiple aplicații

Deși aceste instalații au contribuit și continuă să sprijine dezvoltarea tehnologiei LFR cu noi date experimentale, există anumite zone de cercetare care necesită un efort mai mare și, eventual, noi instalații de sprijin. Pentru a face legătura dintre cercetare și aplicația comercială, ALFRED, în rolul său de demonstrator european, este un element indispensabil. ALFRED respectă criteriile necesare pentru a-și îndeplini rolul de reactor prototip pentru tehnologie, adoptând, pe cât posibil, soluții tehnologice existente, pentru a garanta un proces de autorizare eficient și o implementare rapidă. Strategia operațională a reactorului este armonizată cu activitățile de cercetare și dezvoltare necesare pentru a atinge condițiile de funcționare ale reactorului comercial prin o abordare etapizată, astfel încât să dobândească valoarea adăugată a experienței operaționale în timp ce cercetarea avansează, prin calificarea de soluții tehnologice, componente și proceduri. Conform logicii abordării etapizate, reactorul își începe viața operațională la puteri mici, temperatură scăzută și marje de siguranță supradimensionate. Prin experiența operațională, calificarea materialelor supuse iradierii și probele experimentale furnizate de întreaga infrastructură care orbitează în jurul ALFRED, puterea de ieșire și temperaturile maxime de funcționare sunt apoi crescute gradat, până la atingerea condițiilor care permit comercializarea competitivă a reactorului. Etapele sunt susținute de un proces de licențiere care urmează abordarea etapizată pentru a garanta și a certifica funcționarea în condiții de securitate continuă a instalației. Tabelul 3.1 prezintă principalele valori ale temperaturilor agentului primar

L2.1 - Raport privind abordarea gradată în operare



de răcire și ale puterii ZA prevăzute în cele trei etape principale definite ale reactorului. De-a lungul acestor etape definite, debitul de plumb rămâne constant, garantând astfel valabilitatea zonelor de curgere RCS pentru întreaga viață a instalației.

Tabel 3.1 - Temperatura si putere termica ALFRED RCS

	<i>Etapa 1</i>	<i>Etapa 2</i>	<i>Etapa 3</i>
<i>Putere ZA (MW)</i>	100	200	300
<i>Temperatura intrare ZA (°C)</i>	390	400	400
<i>Temperatura iesire ZA (°C)</i>	430	480	520
<i>Rata debit plumb (kg/s)</i>	17360		

Rationament dezvoltare abordare gradata

In dezvoltarea abordarii etapizate de operare, s-a tinut cont de urmatoarele aspecte:

- Calificarea acoperirilor de intecuire sub iradiere cu neutroni este un aspect critic din cauza indisponibilității (sau a costurilor excesive) ale instalațiilor de iradiere.
- Orice mijloc de protecție privind structurile legate de securitate, care se pretind că asigură funcția de securitate, trebuie să fie calificat prin campanii experimentale (iradiere neglijabilă).
- Orice mijloc de protecție privind structurile legate de securitate, care nu se pretind că asigură funcția de securitate, trebuie să demonstreze că nu afectează securitatea instalației (stabilitate, fără blocaje).
- Orice mijloace de protecție pentru structurile care nu sunt de securitate trebuie să fie garantate ca nu afecteaza funcțiile de securitate în timpul tranzițiilor de accident.
- Mijloace adecvate trebuie garantate pentru a monitoriza periodic starea mijloacelor de protecție sau pentru a detecta abaterile din timpul funcționării.
- Depășirea temperaturii de prag pentru stabilitatea straturilor de oxid în timpul unui tranzient nu este considerată o problemă decât pentru temperaturi foarte ridicate ($T > 600^{\circ}\text{C}$) și timp de menținere foarte lung (ordinul orelor).

Etapa 1 – Temperatură scăzută

Argumente

Temperatura maximă admisă la starea stabila pe teaca AIM1 (15-15 Ti) este de 450 °C (pesimist). Temperatura medie de ieșire din ZA de 430 °C, corespunde unei temperaturi HS de 450 °C (luând în considerare incertitudinile), în timpul funcționării normale la putere (condiții de stare stabila).

Scop

L2.1 - Raport privind abordarea gradata în operare



- Se crește încrederea în tehnologia LFR la temperatură scăzută.
- Se califică acoperirea PLD Al₂O₃ pentru teaca la o temperatură mai ridicată într-un mediu reprezentativ (plumb, iradiere cu neutroni).

Masuri de protectie

- Protecția barelor de oțel inoxidabil este garantată de stratul de oxid prin controlul oxigenului (10^{-6} până la 10^{-8} w%, interval de temperatură 327 °C-450 °C).
- Protecția stratului de oxid este garantată pe oțelul inoxidabil al structurilor legate de securitate în timpul tranzițiilor de accident (creșterea temperaturii la ansamblul combustibilului și la bazinul cald pentru o perioadă de timp de menținere limitat - condiții tranzitorii).
- Efectul sinergetic al mediului de plumb topit și iradierea cu neutroni asupra stabilității stratului de oxid este exclus. În general, stratul de oxid se auto-vindecă sub concentrațiile prescrise de oxigen.
- Structurile și componentele care nu pot fi înlocuite, și care vor experimenta condiții de coroziune în timpul vieții lor, vor trebui să fie protejate încă din etapa 1. Acoperirea structurilor care nu se înlocuiesc este acceptabilă ca o barieră suplimentară împotriva coroziunii, deoarece eșecul local al acoperirii nu va genera probleme de coroziune datorită formării stratului de oxid. Cu toate acestea, acoperirea trebuie să nu afecteze siguranța instalației în timpul funcționării normale în stare stabilă (adică, prin monitorizarea condițiilor de răcire sau prin inspecția periodică a acoperirii pe structură sau specimene reprezentative).
- În cazul în care se exclud accidentele neprotejate, tranziții accidentali nu reprezintă o problemă pentru componentele acoperite care nu se înlocuiesc, deoarece temperatura maximă preconizată în bazinul fierbinte este de aproximativ 480 °C, pentru un timp de menținere relativ scăzut.

Actiuni

- Se prevede un canal fierbinte în centrul ZA (iradiere maximă cu neutroni, temperatura de până la 515 °C în stare stabilă și 650 °C în condiții tranzitorii).
- Se colectează date suficiente pentru a califica acoperirea PLD (2-5 ani - tbd).

Activitati experimentale

- Masurile de protecție pentru alte structuri (de exemplu, acoperirea prin cimentare CVD) trebuie să fie calificate în plumb la iradiere scăzută și temperatură ridicată (480 °C continuu, 585 °C condiții de tranziție).
- Materialele noi rezistente la coroziune cu plumb (de exemplu oțeluri AFA) pentru componente înlocuibile trebuie să fie calificate în plumb la temperaturi ridicate (520 °C), și iradiere scăzută.

Etapa 2 – Temperatură medie

Argumentare

L2.1 - Raport privind abordarea gradată în operare



Temperatura este ridicată până la 515 °C pe teaca și înveliș (suprafețe acoperite calificate sub iradiere cu neutroni). Temperatura maximă a învelișului este de așteptat să nu depășească niciodată 500 °C, și dacă se presupune aceeași temperatură și pentru teaca, rezultă o presupunere conservatoare.

Temperatura este menținută sub 480 °C (temperatura medie de ieșire din ZA, pe termen lung) pe structurile din oțel inoxidabil (AISI 316 L), în timpul funcționării normale la putere (în condiții stabile).

Scop

- Se crește încrederea în tehnologia LFR la temperatură medie.
- Se califica acoperirea PLD Al₂O₃ pentru teaca la temperaturi mai ridicate (plumb, iradiere cu neutroni, 580 °C în stare stabilă și 800 °C în condiții tranzitorii din etapa 3).

Masuri de protecție

- Protecția tecii și a învelișului este garantată de acoperirea PLD, calificată în etapa 1.
- Protecția oțelului inoxidabil este garantată de controlul oxigenului (10^{-6} până la 10^{-8} w%, interval temperaturi 327 °C - 480 °C în timpul funcționării normale, temperatura maximă de până la 585 °C timp de 0,01 ore). Acoperirile de protecție nu sunt destinate să fie utilizate pentru componente înlocuibile încă din etapa 1. Prin urmare, funcționarea normală (în stare de echilibru) și condițiile accidentale (tranzitorii) pe care aceste componente le vor experimenta în alte etape, trebuie să fie compatibile cu mijloacele de protecție bazate pe stratul de oxid.
- Mijloacele de protecție implementate pentru componentele care nu pot fi înlocuite în etapa 1, vor continua să îndeplinească aceeași funcție în timpul etapei 2.
- Acoperirea structurilor care nu se înlocuiesc este acceptabilă ca o barieră suplimentară împotriva coroziunii, deoarece eșecul local al acoperirii nu va genera probleme de coroziune datorită formării stratului de oxid. Cu toate acestea, acoperirea trebuie să nu afecteze siguranța instalației în timpul funcționării normale în stare stabilă (adică, prin monitorizarea condițiilor de răcire sau prin inspecția periodică a acoperirii pe structură sau specimene reprezentative).
- În cazul în care accidentele neprotejate sunt excluse, se presupune că tranzițiile de accident nu reprezintă o problemă pentru componentele neînlocuibile acoperite, deoarece temperatura maximă preconizată în bazinul fierbinte este de aproximativ 585 °C pentru un timp de menținere foarte scăzut, iar stabilitatea acoperirilor au fost calificate în continuare în „activități experimentale paralele” din etapa 1.

Acțiuni

- Se înlocuiesc barele FA cu cele acoperite (nu este necesar dacă sunt deja acoperite din etapa 1).

- Se colectează date suficiente pentru a califica acoperirea PLD la o temperatură de până la 580 °C (dacă datele nu sunt deja disponibile din stadiul 1).
- Se colectează date suficiente pentru a califica acoperirea PLD la o temperatură de până la 800 °C pentru o perioadă limitată de timp (tranzienti de accident).

Activitati experimentale

- Mijloacele de protecție pentru alte structuri (de exemplu, acoperirea prin cimentare, CVD) trebuie să fie calificate în plumb la iradiere scăzută și temperatură ridicată (520 °C pentru starea stabilă, 680 °C pentru condiții de tranziții).
- Materialele noi rezistente la coroziunea din plumb (de exemplu oțeluri AFA) pentru componente înlocuibile trebuie să fie calificate în plumb la temperaturi ridicate (520 °C în stare stabilă, 680 °C pentru condiții tranzitorii), și la iradiere scăzută.

Etapă 3 – Temperatură ridicată

Argumentare

Temperatura poate fi ridicată până la 580 °C pe teaca și înveliș (suprafețe acoperite calificate sub iradiere cu neutroni).

Temperatura trebuie menținută sub 520 °C (temperatura medie de ieșire din ZA, stare stabilă) pe structurile din oțel inoxidabil (AISI 316 L), în timpul funcționării normale la putere.

Scop

- Se crește încrederea în tehnologia LFR la temperaturi ridicate.
- Se califica acoperirea PLD Al₂O₃ pentru teaca la o temperatură și mai ridicată pentru viitoare operațiuni comerciale.

Măsuri de protecție

- Protecția oțelului inoxidabil este garantată prin controlul oxigenului (10^{-6} până la 10^{-8} w%, interval de temperaturi 327 °C - 480 °C) în timpul funcționării normale.
- Mijloacele de protecție sunt garantate pentru oțelul inoxidabil al structurilor legate de securitate pentru a face față tranzițiilor de accident (creșterea temperaturii până la 680 °C în bazinul fierbinte pentru aproximativ 0,01 ore).
- Acoperirea structurilor care nu se înlocuiesc este acceptabilă ca o barieră suplimentară împotriva coroziunii, deoarece eșecul local al acoperirii nu va genera probleme de coroziune datorită formării stratului de oxid. Cu toate acestea, acoperirea trebuie să nu afecteze siguranța instalației în timpul funcționării normale în stare stabilă (adică, prin monitorizarea condițiilor de răcire sau prin inspecția periodică a acoperirii pe structură sau specimene reprezentative).
- Acoperirile de protecție nu sunt destinate să fie utilizate pentru componente înlocuibile încă din etapa 1. Prin urmare, funcționarea normală (în stare de

L2.1 - Raport privind abordarea gradată în operare

echilibru) și condițiile accidentale (tranzitorii) pe care aceste componente le vor experimenta în alte etape, trebuie să fie compatibile cu mijloacele de protecție bazate pe stratul de oxid.

- Chiar dacă sunt excluse accidentele neprotejate, tranziții accidentali protejați pot constitui o problemă pentru componentele acoperite ne-inlocuibile, deoarece temperatura maximă preconizată în bazinul fierbinte este de aproximativ 680 °C, chiar dacă pentru un timp de menținere foarte scăzut și stabilitatea acoperirilor trebuie să fie calificată în timpul „activităților experimentale paralele” din etapa 2.

Acțiuni

Se înlocuiesc componentele neacoperite (în special PP, SG și potențial IV) cu altele care utilizează acoperiri sau oțeluri calificate.

Activități experimentale

Se califica alte mijloace de protecție pentru aplicațiile viitoare.

3.1 Considerații despre materialele structurale din RCS

Prima etapă a operării ALFRED este proiectată pentru a fi realizată cu tehnologia disponibilă în prezent și servește pentru a aborda două provocări vitale ale tehnologiei, și anume compatibilitatea plumbului cu materialele structurale și controlul chimiei plumbului. Pentru etapa 1, conținutul de oxigen este controlat pe o gamă largă în reactor (10^{-6} - 10^{-8} wt.%) și sunt utilizate materiale structurale de calitate nucleară, cum ar fi oțelul 316 și 15-15Ti, acestea fiind de așteptat să reziste (cu marje adecvate) temperaturilor ce se înregistrează în prima etapă. În același timp, proiectul de referință din stadiul 1 prevede deja opțiuni specifice de proiectare pentru a rezolva unele dintre provocările puse de utilizarea tehnologiei LFR:

- Calea de curgere a agentului de răcire permite doar o viteză scăzută a plumbului fără o schimbare mare de moment,
- Caracteristicile de securitate proiectate pentru a îndepărta căldura reziduală sunt în măsură să îndepărteze în mod pasiv puterea termică și să întârzie înghețarea agentului de răcire primar,
- Volumul RCS este redus pentru a limita problema calificării seismice,
- SSC-urile care necesită inspecție periodică sunt proiectate pentru a putea fi complet extractabile și înlocuibile.

Problema materialelor structurale este una dintre temele centrale care justifică adoptarea abordării etapizate. Comportamentul materialelor într-un LFR depinde de chimia agentului de răcire, temperatura și nivelul de iradiere.

Chimia agentului de răcire este axată în principal pe conținutul de oxigen ca principalul factor a coroziunii plumbului: (nivelele de concentrație a oxigenului sunt dependente de temperatura plumbului)

- Concentrația scăzută de oxigen (sub 10^{-8} wt.%) inhibă formarea unui strat de oxid stabil pe suprafața materialului, permițând ca atomii structurali, cum ar fi nichelul și cromul, să difuzeze în plumb, degradând proprietățile mecanice ale structurii.
- Concentrația optimă de oxigen (țintă: 10^{-7} wt.%), interval: 10^{-6} - 10^{-8} wt.%) permite formarea unui strat de oxid stabil pe structurile de oțel, precum și minimizarea formării precipitațiilor de oxid de plumb în agentul de răcire.
- Concentrația ridicată de oxigen (peste 10^{-6} wt.%) promovează precipitația oxizilor de plumb în agentul de racire, ceea ce induce depunerea în locuri reci și formarea dopurilor în regiuni cu zone înguste de curgere (adică subcanale de combustibil / SG).

Temperatura plumbului are ca efect agravarea stabilității stratului de oxid: stratul de oxid este stabil numai pentru temperaturi sub 450-480 °C, deși, presupunând ca se porneste de la un strat de oxid complet stabilizat, deviații către temperaturi mai ridicate pentru perioade de timp limitate (adică pana la câteva ore) nu vor pune în pericol structurile de oțel datorită cineticii fenomenelor de degradare. Problema se caracterizează printr-o complexitate multidimensională care include condițiile de operare ale reactorului (atât în condiții normale cât și de accident) și etapa operațională. În fiecare etapă operațională, pot fi luate în considerare trei locații reprezentative de temperatură, respectiv CP, HP și punct fierbinte (HS), fiecare având o temperatură stabilită pentru funcționarea normală și o temperatură maximă și timp de menținere (timpul pentru care temperatura în anumite locații ramane deasupra temperaturii nominale și mai jos de temperatura maximă înregistrată în timpul unui accident) pentru condiții de accident.

Tabelul 3.2 prezintă temperatura maximă și minimă a celor trei regiuni caracteristice ale RCS în lumina diferitelor etape și condiții. Trebuie menționat că rezultatele prezentate sunt valori preliminare, bazate pe extrapolarea analizelor de tranziție acoperitoare (valori care trebuie confirmate).

Tabel 3.2 - Condiții de temperatura ALFRED pentru diferite regiuni și etape

Conditie	Parametru	Regiune	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	
Operare putere	la	HS	450	535	600	
		HP	430	480	520	
		CP	390	400	400	
Conditii oprire	de	Temperatura minima (°C)	Toate	390	400	400
Accident (conditii termen-scurt)	pe	HS	520 / 0.01	650 / 0.01	800 / 0.01	
		HP	480 / 2.5	590 / 2.5	680 / 2.5	
		CP	420 / 1000	430 / 1000	430 / 1000	
Accident (conditii termen lung)	pe	Temperatura minima (°C)	Toate	330	330	330

L2.1 - Raport privind abordarea gradată în operare



Tabelul 3.2 oferă câteva informații suplimentare pentru a înțelege scopul planului de calificare privind materialele și măsurile de protecție împotriva fenomenelor corozive legate de plumbul lichid. Protecția fizică oferită de un strat stabil de oxid în jurul structurilor de oțel este suficientă pentru a garanta durabilitatea componentelor în prima etapă de operare. În mod similar, probele experimentale disponibile în prezent sugerează că aceleași structuri pot susține stadiul 2 continuând să se bazeze doar pe protecția oferită de stratul de oxid, cu excepția tecii de combustibil (HS).

3.2 Selectarea măsurilor de protecție

Testarea și calificarea măsurilor de protecție suplimentare, respectiv acoperirile de protecție depuse pe materialele existente, sunt obligatorii pentru a permite utilizarea unor echipamente în etapele finale operationale prevăzute pentru instalație. Procesul de calificare necesar ține seama de relevanța pentru securitate a SSC, precum și de efectul iradierii cu neutroni asupra măsurii de protecție. Logica este prezentată în diagrama schematică din figura 3.1; câteva exemple de strategie sunt date mai jos:

- O măsură de protecție privind SSC ce sunt relevante pentru securitate, necesare pentru a asigura o funcție de securitate pe un echipament supus unei iradierii cu neutroni neglijabile, trebuie calificată pe campanii experimentale pe instalații dedicate înainte de a fi autorizată și adoptată în ALFRED.
- O măsură de protecție pentru un SSC care nu este relevant pentru securitate trebuie să fie calificată pentru a evalua funcția corespunzătoare și pentru a nu afecta securitatea instalației în nici o condiție de proiectare.

Logica pentru selectarea măsurilor de protecție

Principalele întrebări care determină cazurile posibile pentru măsurile de protecție sunt transformate într-un grafic.

În vederea luării deciziei, au fost considerate următoarele situații:

- Expunerea la temperaturi mai mari de 480 ° C

Expunerea se considera fie în funcționare normală, fie în condiții de tranziții cu timp de menținere îndelungat (un timp (tbd) destinat să facă inefficiente mijloacele de protecție în timpul tranziției).

- Necesitatea îndeplinirii unei funcții legate de securitate

Aceasta se referă și la situația în care defecțiunea componentei ar duce la o problemă pentru securitatea instalației.

- Funcționarea în condiții de iradiere ne-neglijabile
- Expunerea la temperaturi ridicate încă din prima etapă operatională
- Posibilitatea de înlocuire

L2.1 - Raport privind abordarea gradată în operare



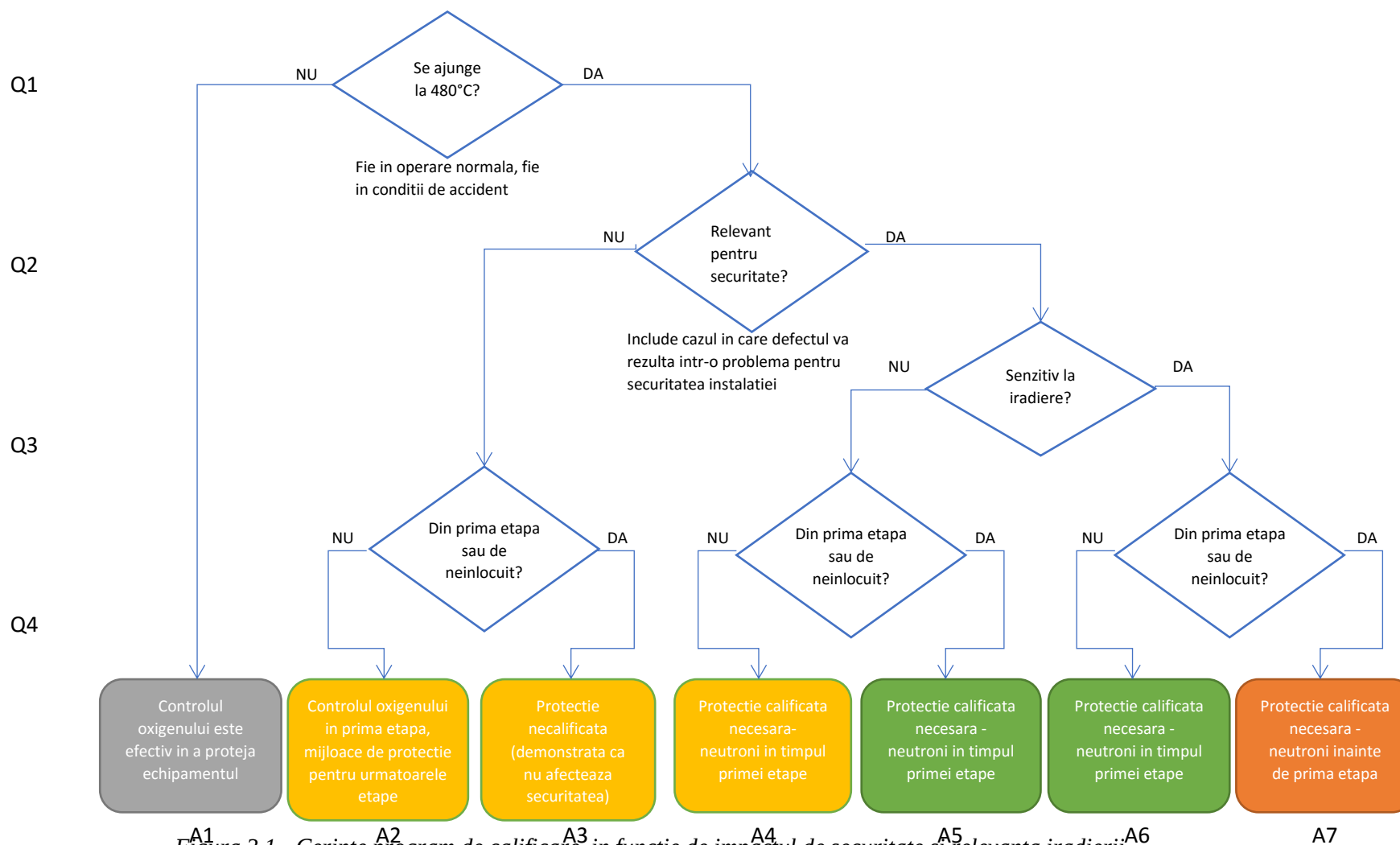


Figura 3.1 - Cerinte program de calificare, in functie de impactul de securitate si relevanta iradierii

L2.1 - Raport privind abordarea gradata în operare



Neincadrarea în situațiile de mai sus înseamnă că alegerea minimă este aceeași pentru ambele cazuri (DA sau NU). Tabelul de decizie este prezentat mai jos.

Tabel 3.3 – Logica selectare masuri protectie

Q1	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Q2		N	N	Y	Y	Y	Y
Q3				N	N	Y	Y
Q4		N	Y	N	Y	N	Y
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7

Cazurile precum componentele nerelevante pentru securitate, cu niveluri de iradiere ne-neglijabile, nu sunt incluse în această schemă simplificată.

Nu există o distincție logică între etapa 1 și etapa 2. Soluțiile rezultante corespunzătoare cazurilor create de situațiile considerate mai sus sunt următoarele:

A1 Controlul oxigenului poate fi utilizat ca mijloc de protecție.

A2 Controlul oxigenului poate fi utilizat ca mijloc de protecție în prima etapă (cu timpul de viață limitat, dacă este necesar). Un mijloc de protecție mai avansat poate fi prevăzut într-o etapă ulterioară.

A3 Mijloace de protecție necalificate pot fi utilizate începând cu etapa 1, dat fiind faptul că sunt dovedite că nu afectează siguranța instalației (stabilitate, monitorizare).

A4 Mijloacele de protecție trebuie să aiba calificare de securitate, dar acest lucru poate fi realizat în instalații experimentale dedicate, în prima etapă de funcționare a demonstratorului.

A5 Mijloacele de protecție trebuie să aiba calificare de securitate, dar acest lucru poate fi realizat în instalații experimentale dedicate, înainte de prima etapă de funcționare a demonstratorului.

A6 Mijloacele de protecție trebuie să fie calificate chiar în demonstrator.

A7 Este necesara re-evaluarea situatiei

Tabelul de decizie si cazurile considerate mai sus sunt preliminare, este posibil ca unul dintre următoarele cazuri sa apară în cursul activităților viitoare, ceea ce ar necesita o revizuire a logicii:

- O componentă care nu are legătură cu securitatea (de exemplu, PP) ar putea fi supusă unei iradierii ne-neglijabile ;
- O componentă care nu are legătură cu securitatea (de exemplu, HL) ar putea fi supusă iradierii neglijabile și nu poate fi înlocuită ;

L2.1 - Raport privind abordarea gradata în operare



- Dacă condițiile sunt îndeplinite numai ca urmare a unui accident DBC4 sau DEC pe o componentă care nu are legătură cu siguranța, alegerea A1 ar fi acceptabilă.

3.3 Materiale candidate RCS

Graficul din figura 3.1 oferă o indicație calitativă, dar clară a riscului asociat pentru calificarea unui SSC, în funcție de relevanța sa de securitate și de nivelul de iradiere cu neutron (efectele induse de radiații sunt considerate neglijabile dacă rata dozei integrale către componentă este mai mică de 2dpa).

Schema logică pentru definirea procesului de calificare SSC a fost adoptată pentru principalele componente ale RCS, iar rezultatul este prezentat concis în tabelul 3.4.

Tabel 3.4 - Categorizare preliminară SSC RCS

Componenta/ Parte	Funcție securitate	Regiune	Inlocuibil	Timp viată (ani)	Nivel iradiere (dpa)	Viteza plumb (m/s)	Nivel risk (Figura 3.1)
FA/ teaca	Retinere	HS	Da	5	100	2	Moderat
Cilindru, retea sustinere	Limitare ZA	HP	Da	20	2	<1	Mediu
IS	Nici una	HP, CP	Nu	40	Neglijabil	<2	Mediu/ Scazut
SG/DC	Retinere, DHR	HP	Da	20	Neglijabil	1	Mediu
RCP/Arbore, rotor	Nici una	HP	Da	10	Neglijabil	10	Mediu
RV	Retinere	CP	Nu	40	Neglijabil	<<1	Scazut

Mai jos este prezentată argumentația pentru principalele componente ale RCS în sprijinul clasificării din Tabelul 3.4.

Ansamblul combustibil

Ansamblul combustibil este de departe componenta cea mai dificilă. Este expus la cele mai ridicate temperaturi în fiecare etapă, are o funcție fundamentală de securitate fiind a doua barieră de retenere a produsilor de fisiune și totodată este supus la cel mai înalt nivel de iradiere cu neutroni. Conform graficului de flux, ansamblul combustibil pentru o etapă viitoare trebuie să fie calificat la condițiile de proiectare relevante. Pentru a preveni riscul de a ajunge într-o situație în care instalațiile experimentale

L2.1 - Raport privind abordarea gradată în operare

capabile să efectueze calificarea nu exista, proiectul avansat al ZA ALFRED are o secțiune în centru pentru a anticipa condițiile de operare ale etapelor avansate, garantând temperaturile dorite cu ajutorul unui dispozitiv de control al debitului de plumb. Strategia permite, de asemenea, calificarea celei mai promițătoare soluții avansate de întecuire pentru reactorul comercial, bazată pe stratul de alumină amorf nano-scală (Al_2O_3) aplicat pe suprafața exterioară tecii, cu ajutorul tehnicii Pulsed Laser Deposition (PLD).

Cilindru și Retea de susținere

Aceste echipamente majore contribuie la funcția de securitate de menținere a geometriei ZA pentru controlul criticității. Acestea sunt expuse la temperaturi mai ridicate de 480°C în timpul etapei 3 ca parte a HP, în timp ce iradierea cu neutroni este sub 2 dpa pe toată durata de viață a componentei (iradiere neglijabilă). Chiar dacă componentele pot fi înlocuite, un program de calificare fără iradiere cu neutroni ar trebui să fie prevăzut pe instalații experimentale externe în paralel cu prima etapă de operare. Măsurile preventive împotriva problemelor de coroziune sunt luate în considerare pe parcursul etapei de proiectare, cu ajutorul unei supradimensionări și a unui program de supraveghere dedicate, bazat pe specimene. Cele mai promițătoare tehnici de acoperire protectivă împotriva coroziunii în zilele noastre sunt procesele de aluminizare industriale bazate pe depunerea vaporilor chimici (Chemical Vapour Deposition CVD), cum ar fi acoperirea prin cimentare (PC).

SG / DC

Dispozitivele de transfer de căldură din RCS sunt supuse atât la temperaturi HP cât și CP, în timp ce iradierea este neglijabilă datorită distanței de ZA. Principalele caracteristici de securitate care trebuie îndeplinite sunt funcția de îndepărtare a căldurii reziduale și granita anvelopei primare. Acestea sunt proiectate pentru o durată de viață limitată, presupunând că vor fi înlocuite între etapa 2 și etapa 3, cu toate acestea, ele ar putea fi protejate prin acoperire în timpul etapei 1 și 2, pentru a evalua capacitatea măsurii de protecție (dacă măsura de protecție nu este parte sau nu interacționează cu funcția de securitate și se demonstrează că nu aduce prejudicii funcțiilor de securitate ale altor sisteme sau componente).

RCP

Pompa de răcire a reactorului este supusă unei temperaturi HP și unei iradiere neglijabile. În plus, nicio funcție de securitate nu este luată în considerare pentru această componentă. Având în vedere schimbarea de impuls mare la care este supus echipamentul, este prevăzut un plan de inspecție care să includă înlocuirea componentelor cele mai afectate. Mijlocul/ măsura de protecție propusă este acoperirea pe bază de alumină auto-protectoare.

RV

Vasul reactorului este supus la temperatura CP și iradiere neglijabilă. Funcția de securitate îndeplinită este frontiera de retenere a produsilor de fisiune. Datorită configurației îmbunătățite, nu este întezarita nici o stratificare termică a componentei, prin urmare controlul oxigenului este suficient pentru a garanta rezistența componentelor pe durata de viață a instalației.

IS

Structura internă este supusă atât temperaturii HP cât și CP, și unei iradierii neglijabile. Nici o funcție de securitate nu este luată în considerare pentru componentă. Un plan de monitorizare este prevăzut cu ajutorul instrumentelor RCS, începând cu etapa 1 de operare, pentru a determina rapid orice deformare puternică sau scurgeri. Componenta poate fi înlocuită, deși necesită o procedură complexă de demontare a RCS și poate fi întreținută, reparată sau înlocuită în caz de nevoie.

Materialele candidate pentru fiecare SSC RCS discutate în această secțiune sunt prezentate pe scurt în tabelul 3.5.

Tabel 3.5 - Materiale candidate preliminare pentru SSC RCS

Componenta/Parte	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
FA/Teaca	15-15Ti (AIM1)	15-15Ti (AIM1) + Acoperire PLD AL_2O_3	15-15Ti (AIM1) + Acoperire PLD AL_2O_3
IV	AISI 316L + Acoperire AL_2O_3	AISI 316L + Acoperire AL_2O_3	AISI 316L + Acoperire AL_2O_3
IS	AISI 316L + Acoperire AL_2O_3	AISI 316L + Acoperire AL_2O_3	AISI 316L + Acoperire AL_2O_3
SG/DC	AISI 316L	AISI 316L	AISI 316L or T91 + Acoperire AL_2O_3 , sau oțel AFA
RCP/arbore, rotor	AISI 316L + Acoperire AL_2O_3	AISI 316L + Acoperire AL_2O_3	AISI 316L + Acoperire AL_2O_3
RV	AISI 316L	AISI 316L	AISI 316L

3.4 Limite de proiectare

În continuare, pentru abordarea operațională etapizată este prezentat un subset al limitelor de proiectare, aplicabil la teaca de combustibil și legat de aspectele de coroziune. Se stabilesc limite diferite pentru fiecare stare a instalației, clasificate în

L2.1 - Raport privind abordarea gradată în operare



funcție de cele cinci niveluri (de la 1 la 4b), definite în scopul proiectării [5]: condiții nominale (nivel 1), evenimente operaționale anticipate (AOO, nivel 2), accidente bază de proiect (DBA, nivelul 3) și condițiile de extindere a proiectării (DEC, nivelurile 4a și 4b).

Limite termice

Limitele termice pentru teaca de combustibil se aplică numai atunci când temperatura este identificată drept o cauză directă potențială a defecțiunii. Prin urmare, nu sunt luate în considerare limitele temperaturii la mijlocul peretelui, deoarece acestea afectează rezistența mecanică a materialului tecii împotriva solicitărilor aplicate, și prin urmare, este cuprins în secțiunea următoare privind limitele mecanice.

Singura limită termică aplicată este asociată temperaturii peretelui exterior, fiind o condiție care promovează coroziunea, care poate fi - în sine, dacă nu este controlată - o cauză a defecțiunii. Următoarele limite se aplică diferitelor etape operaționale și pentru diferitele stări ale instalației.

Tabel 3.6 – Limite de proiectare

Limite de proiectare					
Parametru	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4a	Nivel 4b
Temperatura la suprafața exterioară a tecii					
Punct fierbinte					
Etapa 1: temperatura (°C)	450	460	480	510	510
Etapa 2: temperatura (°C)	535	560	600	670	670
Etapa 3: temperatura (°C)	600	630	700	800	800

Limite mecanice

Provocările pentru integritatea tecii de combustibil pot fi grupate în trei mari categorii:

- termice (de exemplu, fluaj),
- induse de iradiere (de exemplu, deformări plastice datorate umflării),
- induse de coroziune (de exemplu, reducerea grosimii rezistente din cauza lichidului de răcire sau a coroziunii combustibilului).

Aceste limite completează setul de limite de dinaintea maximumului de temperatura, pentru a ține cont de efectele fenomenelor de coroziune localizată sau minore asupra

L2.1 - Raport privind abordarea gradată în operare

integritatii tecii. Deoarece limitele cantitative pentru toate provocările sau categoriile de provocări nu pot fi stabilite independent de proiectarea ZA și de condițiile de operare, pentru a oferi limite de securitate univoce de proiectare pentru teaca, se presupune o singură valoare pentru fracția cumulată de deteriorari la fiecare nivel. Prin urmare, proiectantul se asigură că definirea criteriilor de evaluare a fracției cumulate de deteriorari ia în considerare toate aspectele care se încadrează în cele trei categorii generale discutate mai sus.

Tabel 3.7 – Limite de proiectare

Parametru	Limite de proiectare				
	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4a	Nivel 4b
Fractia cumulata de deteriorari					
Punct fierbinte	≤ 0.25	≤ 0.25	≤ 0.25	≤ 0.35	≤ 0.50
Etapa 1, 2 and 3					

3.5 Considerații generale privind criteriile de acceptare pentru RCS

Considerații similare celor folosite în propunerea limitelor termice și mecanice de proiectare pentru definirea criteriilor de acceptare aplicabile pentru teaca de combustibil se aplică și componentelor RCS expuse mediului de plumb la temperaturi de referință pentru fiecare etapă de funcționare. Proiectarea componentelor nucleare trebuie să respecte regulile stabilite în codurile și standardele de proiectare nucleară (de exemplu, ASME B&PV, RCC-MRx etc.), luând în considerare combinațiile de solicitari și condițiile de mediu în operare normală, anormală și în condiții de accident. Pentru a efectua dimensionarea de bază a sistemelor de securitate DHR și E-DHR în faza de proiectare a conceptului, merită să fie luate în considerare criterii simplificate de acceptare a componentelor RCS.

Pe baza fișei „Analiza accidentelor” și a condițiilor prevăzute în abordarea etapizată de operare, temperaturile de referință și timpul de menținere sunt extrapolate pentru 3 regiuni:

- punct fierbinte (HS): utilizat pentru teaca și conservativ pentru înveliș (deși este supus unor condiții mai puțin severe)
- zona caldă din piscina (HP): utilizat pentru orice suprafață a componentei în contact cu plumbul, la temperatura medie de ieșire din ZA
- zona rece din piscina (CP): utilizat pentru orice suprafață a componentei în contact cu plumbul la temperatura medie de intrare în ZA

L2.1 - Raport privind abordarea gradată în operare

Schimbările de căldură între HP și CP sunt în prezent neglijate, deși ar putea duce la o temperatură localizată sau generalizată ușor mai ridicată în CP.

Factorii de maxim pentru HS și HP sunt calculați conform cu fișa „Analiza accidentului” pentru etapa 2 (aceleași condiții de temperatură din proiectul LEADER) și aplicate la etapele 1 și 3.

În acest scop, temperaturile de referință sunt definite pentru zona de piscină caldă (HP) și zona de piscină rece (CP), ca reprezentative pentru componentele expuse mediului de plumb. Cu referire la conceptul ALFRED,

- Condițiile HP se aplică tuturor structurilor RCS expuse la temperatura medie a plumbului de la ieșirea din ZA, corespunzând temperaturii de intrare SG și DC, pentru fiecare etapă operațională a reactorului.
- Condițiile CP se aplică tuturor structurilor RCS expuse la temperatura medie a plumbului de la intrarea în ZA, corespunzătoare temperaturii de ieșire SG și DC, pentru fiecare etapă operațională.

În condiții anormale și în condiții de accident, temperatura HP și CP va crește până la un nivel maxim și va scădea apoi în funcție de performanța/ rata definită pentru sistemele de securitate.

Codurile de proiectare nucleară acoperă regulile și proprietățile materialelor pentru fenomenele de oboseală, deformare plastică, fluaj, etc., în timp ce coroziunea indusă de efectele de mediu trebuie luată în considerare separat, pe baza presupunerilor conservatoare asupra grosimii materialului afectat. Printre aceste efecte, două fenomene principale care afectează proprietățile materialului la temperatură ridicată sunt amintite succint în cele ce urmează, ca bază pentru ghidarea definirii criteriilor preliminare de acceptare:

Coroziune

Una dintre principalele preocupări legate de utilizarea plumbului ca agent de răcire este compatibilitatea chimică dintre plumbul lichid și oțeluri. Mai multe elemente de aliaje din oțel (de ex. Ni, Cr) sunt solubile în metale lichide, expunând astfel materialul structural la fenomene de coroziune pe bază de dizolvare la interfața dintre plumbul topit și suprafața oțelului. Cantitatea de oxigen dizolvată în cea mai mare parte a metalului lichid are impact asupra coroziunii oțelului și, în special, în pierderea materialului din metalul solid.

Fluaj

Fluajul reprezintă tendința unui material solid de a se deplasa lent sau de a se deforma permanent sub influența tensiunilor mecanice și are o importanță generală, nefiind specific utilizării plumbului ca agent de răcire. Fenomenul poate apărea ca urmare a expunerii pe termen lung la niveluri ridicate de stres, care sunt încă sub rezistența la solicitare a materialului. Rata de deformare este o funcție a proprietăților materialului, timpul de menținere, temperatura și solicitarea structurală aplicată. Codurile de

L2.1 - Raport privind abordarea gradată în operare



proiectare nucleară definesc un prag de temperatură pentru un fluaj neglijabil, indiferent de timpul de menținere: pentru orice material dat, există un prag de temperatură sub care fenomenele induse de fluaj sunt neglijabile, indiferent de timpul în care materialul rămâne sub această temperatură. În această condiție, nu este necesar să se țină cont de efectele fluajului în proiectare. Ca exemplu, RCC-MRx Secțiunea III – Tom 1 – Subsecțiunea Z – Appendix A3.3S (pentru materiale în grupurile X2CrNiMo17-12-2, X2CrNiMo17-12-3, X2CrNiMo18-14-3 corespunzând la AISI316L) prescrie o temperatura de prag de 450°C pentru un fluaj neglijabil, cu timp de menținere nedefinit.

Peste această temperatură, efectele fluajului nu sunt neglijabile și sunt specifice unui timp de menținere (Chiar dacă sunt excluse accidentele neprotejate, tranziții accidentali protejați pot constitui o problemă pentru componentele acoperite ne-inlocuibile, deoarece temperatura maximă preconizată în bazinul fierbinte este de aproximativ 680 °C, chiar dacă pentru un timp de menținere foarte scăzut și stabilitatea acoperirilor trebuie să fie calificată în timpul „activităților experimentale paralele” din etapa 2).

Datorită dependenței fenomenelor de mai sus de temperatură, diferite considerații pentru criteriile de acceptare se aplică pentru fiecare etapă a reactorului ALFRED și sunt strict legate de materialele de referință selectate ale RCS.

În ceea ce privește HP, starea normală de funcționare a etapelor 1 și 2 sunt compatibile cu protecția la coroziune prin stratul de oxid auto-vindecător (stratul de oxid este stabil până la 480 °C). Condițiile de accident prevăzute în etapele 1 și 2 ar putea crește temperatura HP peste 480 °C, prin urmare, timpii de menținere între 480 °C și temperatura maximă ar trebui să fie suficient de scăzuți pentru a evita pierderea completă a stratului de oxid. Neglijând conservativ cinetica asociată dizolvării stratului de oxid, o condiție de $T_{max} = 550$ °C pentru $t = 100$ ore ar corespunde conservativ unei dizolvări de oțel neglijabile per eveniment. Având în vedere că orice eveniment DBC2, DBC3 și DBC4 care are loc în timpul de viață al reactorului ar duce la astfel de condiții, dizolvarea totală rămâne în continuare neglijabilă, în comparație cu alte marje de proiectare. Cel mai probabil, combinația timpilor de menținere la temperaturi normale de funcționare (până la 480 °C pentru etapa 2) și condiții de accident (până la 550 °C, deși pentru un număr finit de evenimente cu durată limitată) va fi necesară luarea în considerare a efectelor fluajului în conformitate cu codurile de proiectare. Cu toate acestea, combinația de temperatură și timpul de menținere se considera a nu afecta excesiv proiectarea mecanică a componentelor principale.

În ceea ce privește etapa a 3-a, structurile HP vor credita protecția de acoperire cu alumina, ceea ce arată o performanță bună de protecție până la 650 °C. Componentele RCS care ar putea fi dificil să fie extrase pot fi deja acoperite din etapa operațională 1, dar o protecție îmbunătățită nu este creditată până la etapa operațională 3. În aceste condiții, fluajul este fenomenul care ar afecta în mare parte dimensionarea componentelor.

În ceea ce privește CP-ul, condițiile normale de funcționare în fiecare etapă operațională a reactorului sunt compatibile cu protecția la coroziune prin stratul de oxid auto-vindecător (stratul de oxid este stabil până la 480 °C). Condițiile de

accident ar putea aduce temperatura CP peste 480 °C, în special cele care implică eșecul uneia sau mai multor bucle ale sistemului DHR. Din acest motiv, rațiunea de definire a criteriilor de acceptare a CP îl urmează pe cel al HP pentru etapele 1 și 2. Considerații similare se aplică și pentru ceea ce privește fenomenul de fluaj și dimensionarea componentelor mecanice. Cu toate acestea, este de remarcat faptul că aplicarea unor condiții similare cu cele ale HP Etapa1 și 2, de asemenea, la CP Etapa 1 până la 3 poate rezulta ca fiind excesiv de conservatoare și va fi rafinată în etapele viitoare.

În urma considerentelor de mai sus, definiția criteriilor preliminare de acceptare RCS este prezentată în tabelul 3.8.

Trebuie remarcat faptul că valorile și orientările preliminare descrise mai sus reflectă o abordare simplificată și preliminară pentru definirea limitelor operaționale sigure și vor fi supuse unei rafinări ulterioare, de asemenea, în funcție de noile evidente din cercetare și dezvoltare.

Tabel 3.8 - RCS criterii de acceptare preliminare (interval temperatura si timp maxim de mentinere)

°C/ore	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3
HP	480-550/100		520-650/100
CP	480-550/100		

4. Concluzii

Documentul abordează subiectele legate de opțiunea de proiectare și strategia de operare etapizată a reactorului.

În ceea ce privește descrierea opțiunii de proiectare, progresul proiectului este prezentat cu referire la sistemul RCS și la cele mai importante sisteme auxiliare, cu accent pe aspectele inovatoare în ceea ce privește tehnologiile utilizate în prezent în centralele nucleare. În special, sunt amintite alegerile de proiectare care disting caracteristicile specifice ale tehnologiei LFR, cum ar fi sistemul de acoperire cu gaz, sistemul de încălzire al plumbului, sistemul de condiționare a plumbului și sistemul de manipulare a combustibilului.

Este prezentată cea mai recentă concepție a proiectului conceptual a reactorului, deși trebuie subliniat faptul că dezvoltarea unor sisteme este în desfășurare. Pentru unele aspecte specifice ale proiectării, este nevoie de sprijin suplimentar din evidențe experimentale și, în acest caz, se preconizează că flexibilitatea asociată demonstratorului va permite optimizarea soluțiilor de proiectare.

Ca exemplu, pentru criteriile care conduc la limitele de proiectare a tecii de combustibil, sunt prezentate atât restricții termice cât și mecanice. În paralel, sunt raportate criteriile de acceptare de referință definite pentru componentele sistemului RCS, în ceea ce privește temperaturile maxime și ținând cont de fenomenele de degradare cu impact mare, cum ar fi coroziunea din plumbul lichid și fluajul. Atât pentru teaca de combustibil, cât și pentru RCS, sunt evidențiate avantajele implementării unei abordări etapizate de operare.

Proiectarea unui reactor LFR presupune să se țină seama de un ansamblu de fenomene complexe cu influențe reciproce și puternic legate de tehnologia de utilizare a plumbului lichid, și din acest motiv sunt raportate cele mai relevante fenomene care au impact asupra securității. Identificarea fenomenelor cu impact asupra securității este un pas important pentru a ghida programul asociat de cercetare și dezvoltare.

Având obiectivul de a proceda la construirea unui reactor LFR, a fost propus ca demonstratorul să joace un rol important în validarea și calificarea soluțiilor tehnologice, în același timp cu contribuția la creșterea continuă a experienței de operare. Din acest motiv, operația ALFRED este concepută printr-un proces numit „abordare etapizată”, care este explicat în detaliu pentru a sublinia utilitatea acesteia în cadrul perspectivei de implementare ALFRED.

Referințe

- [1] M. Caramello, M. Gregorini, C. Bertani, M. De Salve, A. Alemberti, B. Panella, Thermal hydraulic analysis of a passively controlled DHR system, Progress in Nuclear Energy 99 (2017) 127-139.
- [2] Patent WO 2015059672 A1, 2015. Heat exchange system and method with passive regulation of the amount of heat removed
- [3] IAEA TECDOC-1569, Liquid metal cooled reactors: Experience in Design and Operation, 2007
- [4] Overview of experimental facilities in support of Lead/LBE-cooled Fast Reactors (LFR)
- [5] International Atomic Energy Agency. "IAEA Safety Glossary: Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection, 2018 Edition". Technical Report STI/PUB/1830 (2019)
- [6] Alemberti A., Frogheri M.L., Hermsmeyer S., Smirnov L.A.V., Takahashi M., Smith C.F., et al., Lead-cooled fast reactor (LFR) risk and safety assessment white paper, revision 8, April 2014