



Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente

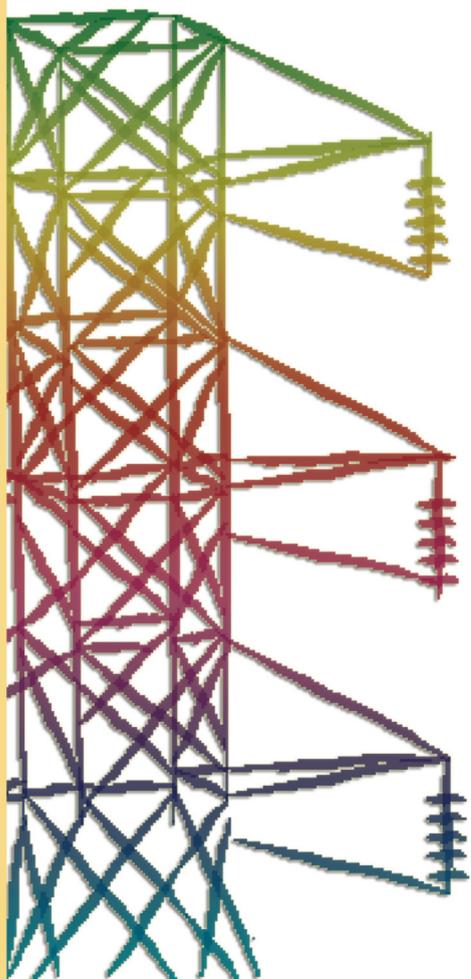


Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Sviluppo di un programma di qualificazione di materiali strutturali per reattori refrigerati al piombo di IV generazione: Lexur 2 - definizione della matrice di test

Antonio Aiello





Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Sviluppo di un programma di qualificazione di materiali strutturali
per reattori refrigerati al piombo di IV generazione: Lexur 2 -
definizione della matrice di test

Antonio Aiello

SVILUPPO DI UN PROGRAMMA DI QUALIFICAZIONE DI MATERIALI STRUTTURALI PER
REATTORI REFRIGERATI AL PIOMBO DI IV GENERAZIONE: LEXUR 2 - DEFINIZIONE DELLA
MATRICE DI TEST

Antonio Aiello (ENEA)

Febbraio 2009

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione e fonti energetiche

Tema: Nuovo Nucleare da Fissione

Responsabile Tema: Stefano Monti, ENEA

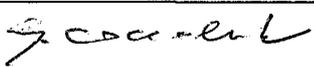
| | | | | |
|---|---|---|--|------------------------------|
|  Dipartimento Fusione, Tecnologie e Presidio Nucleare Sezione di Ingegneria Sperimentale FPN FISING | TITOLO Sviluppo di un programma di qualificazione di materiali strutturali per reattori refrigerati al piombo di IV generazione: Lexur 2 – Definizione della matrice di test | DOCUMENTO AdP-ENEA-MSE LP3 (E) | DATA EMISSIONE: 09/02/2009 | PAGINA 1 of 12 |
| | | HS-G-R-001 | Rev : 0 | |

Titolo Sviluppo di un programma di qualificazione di materiali strutturali per reattori refrigerati al piombo di IV generazione: Lexur 2: definizione della matrice di test

Autore: A. Aiello

Riassunto I reattori a fissione refrigerati a piombo (LFR) sono di particolare interesse nell'ambito dello sviluppo dei sistemi nucleari di IV generazione per diverse caratteristiche favorevoli: in particolare presentano un ciclo del combustibile chiuso grazie alla lunga vita operativa del nocciolo che impedisce qualsiasi diversione nell'uso del materiale fissile, ad esempio per applicazioni belliche, e garantiscono un elevato fattore di conversione dell'uranio, con evidenti benefici sia di tipo economico che di sfruttamento delle risorse naturali. Il centro ENEA del Brasimone ha acquisito una riconosciuta leadership europea nella caratterizzazione degli acciai da utilizzare in leghe di piombo.

L'ulteriore sviluppo delle citate competenze è limitato dalla scarsa disponibilità di dati e studi interpretativi del fenomeno di infragilimento da metallo liquido sotto intenso irraggiamento neutronico, quale quello previsto nei sistemi nucleari di IV generazione, nei quali la vita operativa sarà molto più lunga che nei sistemi di precedente generazione. Propedeutico a questo percorso sperimentale è l'avvio di una campagna di caratterizzazione dei materiali, in cui vengano determinate le caratteristiche meccaniche dei materiali in condizioni simili a quelle previste nel reattore, ma in assenza di irraggiamento. Tali risultati di riferimento saranno poi necessari per identificare i fenomeni riconducibili al solo irraggiamento.

| | | |
|---|---|---|
| Redazione | Convalida | Approvazione |
| A. Aiello | L.F. Moreschi | G. Coccoluto |
|  |  |  |

| | | | | |
|--|---|---|---|--|
|  Dipartimento Fusione, Tecnologie e Presidio Nucleare Sezione di Ingegneria Sperimentale FPN FISING | TITOLO Sviluppo di un programma di qualificazione di materiali strutturali per reattori refrigerati al piombo di IV generazione: Lexur 2 – Definizione della matrice di test | DOCUMENTO AdP-ENEA-MSE LP3 (E) HS-G-R-001 | DATA EMISSIONE : 09/02/2009 | PAGINA 2 of 12 |
| | | | Rev : 0 | |

Sommario

| | |
|--|----|
| Introduzione | 3 |
| Scopo del progetto | 4 |
| Descrizione dell'attività e collaborazioni previste..... | 4 |
| Matrice di prova e programmazione temporale | 5 |
| Selezione dei materiali | 5 |
| Definizione della geometria dei provini | 6 |
| Programma di prova | 8 |
| Conclusioni | 11 |
| Bibliografia..... | 12 |

| | | | | |
|--|---|---|---|------------------------------|
|  Dipartimento Fusione, Tecnologie e Presidio Nucleare Sezione di Ingegneria Sperimentale FPN FISING | TITOLO Sviluppo di un programma di qualificazione di materiali strutturali per reattori refrigerati al piombo di IV generazione: Lexur 2 – Definizione della matrice di test | DOCUMENTO AdP-ENEA-MSE LP3 (E) HS-G-R-001 | DATA EMISSIONE : 09/02/2009 | PAGINA 3 of 12 |
| | | | Rev : 0 | |

Introduzione

I reattori a fissione refrigerati a piombo (LFR) sono di particolare interesse nell'ambito dello sviluppo dei sistemi nucleari di IV generazione per diverse caratteristiche favorevoli: in particolare presentano un ciclo del combustibile chiuso grazie alla lunga vita operativa del nocciolo che impedisce qualsiasi diversione nell'uso del materiale fissile, ad esempio per applicazioni belliche, e garantiscono un elevato fattore di conversione dell'uranio, con evidenti benefici sia di tipo economico che di sfruttamento delle risorse naturali.

La capacità dei materiali strutturali di resistere alle condizioni ostili di funzionamento di tali sistemi nucleari di prossima generazione costituisce uno dei problemi chiave da affrontare nel loro percorso di sviluppo.

Tali materiali dovranno, infatti, essere in grado di resistere ad:

- alte temperature;
- ambiente corrosivo;
- alte dosi di irraggiamento;

ben oltre l'esperienza dei sistemi nucleari attualmente operanti.

Risulta, pertanto, necessario, un coordinato sforzo di ricerca volto ad affrontare il problema dello sviluppo e della caratterizzazione di materiali che siano adatti ad operare nei reattori nucleari critici di quarta generazione e nei sistemi per la trasmutazione dei rifiuti radioattivi.

Per i sistemi refrigerati a piombo (critici e sottocritici), particolare attenzione deve essere dedicata allo studio degli effetti combinati di irraggiamento neutronico veloce e presenza di refrigerante corrosivo.

In questo ambito, l'ENEA è da tempo coinvolto in attività di ricerca sugli acciai strutturali di impiego nucleare, sia all'interno dei programmi di sviluppo dei sistemi nucleari di IV generazione e dei sistemi per la trasmutazione delle scorie che nel programma europeo sulla fusione. Il centro del Brasimone in particolare ha acquisito una riconosciuta leadership europea nella caratterizzazione degli acciai da utilizzare in leghe di piombo.

Sono state sviluppate rilevanti competenze sui comportamenti degli acciai martensitici a bassa attivazione che sono considerati quali materiali strutturali di riferimento per le nuove tipologie di reattore, ma è notevole l'esperienza maturata sugli acciai austenitici.

| | | | | |
|--|---|---|---|------------------------------|
|  Dipartimento Fusione, Tecnologie e Presidio Nucleare Sezione di Ingegneria Sperimentale FPN FISING | TITOLO Sviluppo di un programma di qualificazione di materiali strutturali per reattori refrigerati al piombo di IV generazione: Lexur 2 – Definizione della matrice di test | DOCUMENTO AdP-ENEA-MSE LP3 (E) | DATA EMISSIONE : 09/02/2009 | PAGINA 4 of 12 |
| | | | Rev : 0 | |
| | | HS-G-R-001 | | |

Scopo del progetto

L'ulteriore sviluppo delle citate competenze è limitato dalla scarsa disponibilità di dati e studi interpretativi del fenomeno di infragilimento da metallo liquido sotto intenso irraggiamento neutronico, quale quello previsto nei sistemi nucleari di IV generazione, nei quali la vita operativa sarà molto più lunga che nei sistemi di precedente generazione. In particolare, nessuna attività sperimentale è stata ancora condotta riguardo all'effetto dell'irraggiamento in spettro neutronico veloce sul fenomeno di LME in ambiente piombo. L'effetto atteso, la cui rilevanza può essere notevole, è che le variazioni nella microstruttura dei materiali metallici conseguenti all'interazione tra neutroni e matrici solide amplifichino le interazioni chimiche tra metallo liquido e matrice producendo un infragilimento superiore a quello dovuto alla sola chimica.

Risulta pertanto di particolare rilevanza nel percorso di sviluppo dei sistemi refrigerati a piombo di prossima generazione andare a valutare attraverso un apposito programma di ReS gli effetti combinati dell'ambiente e dell'irraggiamento in spettro neutronico veloce.

Propedeutico a questo percorso sperimentale è l'avvio di una campagna di caratterizzazione dei materiali, in cui vengano determinate le caratteristiche meccaniche dei materiali in condizioni simili a quelle previste nel reattore, ma in assenza di irraggiamento. Tali risultati di riferimento saranno poi necessari per identificare i fenomeni riconducibili al solo irraggiamento.

Descrizione dell'attività e collaborazioni previste

È stata proposta una campagna sperimentale nelle sopraccitate condizioni su provini di geometria tale da poter essere poi utilizzati anche all'interno di una campagna di irraggiamento. L'attività viene svolta insieme a partner internazionali di comprovata esperienza.

RIAR Dimitrograd , presso il quale sono già state eseguite prove di irraggiamento sia da ENEA [1] che da altre istituzioni europee [2], dispone del reattore raffreddato a sodio BOR 60, l'unico impianto per prove di irraggiamento con spettro neutronico veloce disponibile in Europa, cui si affianca un completo laboratorio per la caratterizzazione meccanica e micro strutturale di materiali irraggiati.

| | | | | |
|--|---|---|---|------------------------------|
|  Dipartimento Fusione, Tecnologie e Presidio Nucleare Sezione di Ingegneria Sperimentale FPN FISING | TITOLO Sviluppo di un programma di qualificazione di materiali strutturali per reattori refrigerati al piombo di IV generazione: Lexur 2 – Definizione della matrice di test | DOCUMENTO AdP-ENEA-MSE LP3 (E) | DATA EMISSIONE : 09/02/2009 | PAGINA 5 of 12 |
| | | | Rev : 0 | |

SCK-CEN, centro di ricerche belga fortemente impegnato nelle attività di irraggiamento dei materiali, dispone di un proprio reattore a gas utilizzato per prove a bassi livelli di dose, oltre ad una notevole competenza ed esperienza nell'interpretazione dei risultati sperimentali. Il laboratorio di analisi post irraggiamento di SCK-CEN verrà altresì utilizzato per ulteriori prove meccaniche sui provini irraggiati.

Sono già stati avviati contatti con i partner per concordare, sul piano tecnico-economico, i contenuti delle attività sperimentali che si intendono condurre presso le facilities citate.

Matrice di prova e programmazione temporale

Selezione dei materiali

La prima fase dell'attività è stata dedicata alla selezione dei materiali da sperimentare. Tale analisi è stata condotta sulla base delle ipotesi progettuali dei reattori refrigerati a piombo di quarta generazione.

In particolare tale famiglia di sistemi prevede [3]:

1. per il sistema degli elementi di combustibile l'impiego di acciai ferritici, ed in particolare della famiglia 9-12 Cr. Il materiale di riferimento, in questa fase, è il T91, un prodotto commerciale diffuso e le cui caratteristiche meccaniche sono ben note. Si tratta infatti di un acciaio ottenuto modificando il 9CrMoVNb ampiamente usato nell'industria nucleare e non nucleare. È stato testato in piombo/bismuto per valutarne le caratteristiche di resistenza alla corrosione ed anche in piombo ma solo per brevi durate. Mancano tuttora informazioni sul comportamento del materiale dopo lunga esposizione in piombo.
2. Per gli elementi interni al core, è previsto l'impiego di acciai ferritici/martensitici nelle aree esposte ad intenso flusso neutronico e di acciai austenitici nelle zone a basso flusso. L'acciaio ferritico di riferimento è anche in questo caso il T91, mentre come acciaio austenitico la scelta è caduta sul AISI 316 lavorato a freddo e, a medio termine, AISI 304. Come per il T91, anche il 316 è stato sperimentato in diverse condizioni in piombo/bismuto, ed in maniera più limitata in piombo.

Sulla base degli esperimenti condotti in passato, il comportamento dei materiali citati, in termini di corrosione, può essere così sintetizzato:

per le temperature di interesse degli LFR, entro i 550°C, la resistenza dei materiali a corrosione è fortemente influenzata dalla concentrazione di ossigeno in piombo. Per concentrazioni superiori a 10⁻⁶ Wt%

| | | | | |
|--|---|---|---|------------------------------|
|  Dipartimento Fusione, Tecnologie e Presidio Nucleare Sezione di Ingegneria Sperimentale FPN FISING | TITOLO Sviluppo di un programma di qualificazione di materiali strutturali per reattori refrigerati al piombo di IV generazione: Lexur 2 – Definizione della matrice di test | DOCUMENTO AdP-ENEA-MSE LP3 (E) | DATA EMISSIONE : 09/02/2009 | PAGINA 6 of 12 |
| | | | Rev : 0 | |
| | | HS-G-R-001 | | |

il materiale viene ricoperto da uno strato di ossido aderente e compatto che lo protegge dall'ulteriore ossidazione garantendone le prestazioni nel tempo. Se la concentrazione di ossigeno è inferiore a 10^{-7} wt% si avrà invece una rapida dissoluzione del materiale a temperature superiori a 400°C, poiché il piombo acquisterà proprietà riducente e non sarà possibile la passivazione del materiale. Per temperature superiori a 550°C la protezione dell'ossido si rivela non completamente efficace, e la dissoluzione sarà tanto più rapida quanto maggiore sarà la temperatura. Per gli acciai martensitici è poi presente un effetto di embrittlement, cioè in sostanza un infragilimento dell'acciaio in presenza di lega di piombo. Questo avrà inevitabili conseguenze sulla vita attesa dei componenti, in particolare in presenza di fatica meccanica. Per ciò che riguarda il creep mancano al momento informazioni in merito.

Vista l'esigenza, già manifestate, di incrementare le temperature di esercizio degli LFR per aumentarne il rendimento è stata anche esaminata la possibilità di utilizzare materiali avanzati che potrebbero meglio tollerare condizioni operative più estreme.

Le soluzioni identificate risiedono nell'uso di coating su acciai o di ODS, leghe ad ossidi dispersi che garantiscono prestazioni superiori. Pertanto, è stato deciso di analizzare anche il comportamento di ODS su base 9Cr e 15Cr.

È poi ipotizzabile anche l'impiego di titanio per le sue favorevoli proprietà ad alta temperatura.

Pertanto, al termine di questa analisi preliminare, sono stati identificati i seguenti materiali, da considerare come riferimento per la prima generazione di LFR ed in parte per la seconda:

- AISI 316, anche protetto con coatings
- T91, anche protetto con coatings
- 15-15 Ti
- ODS 9Cr
- ODS 14Cr

Definizione della geometria dei provini

L'interesse principale è, evidentemente, nel disporre di un numero elevato di provini per poter definire una migliore statistica dei risultati. Per contro, vi sono dei limiti di spazio all'interno della capsula proposta preliminarmente dal RIAR per la esecuzione delle prove di thermal annealing e di irraggiamento, riportata in fig. 1. L'ipotesi formulata, da verificare quando la procedura di licensing confermerà la geometria della

| | | | | |
|--|---|---|---|------------------------------|
|  Dipartimento Fusione, Tecnologie e Presidio Nucleare Sezione di Ingegneria Sperimentale FPN FISING | TITOLO Sviluppo di un programma di qualificazione di materiali strutturali per reattori refrigerati al piombo di IV generazione: Lexur 2 – Definizione della matrice di test | DOCUMENTO AdP-ENEA-MSE LP3 (E) | DATA EMISSIONE : 09/02/2009 | PAGINA 7 of 12 |
| | | | HS-G-R-001 | |

capsula di annealing, prevede l'esecuzione di prove di creep su tubi in pressione, trazione, avanzamento della cricca (provini CT) e corrosione.

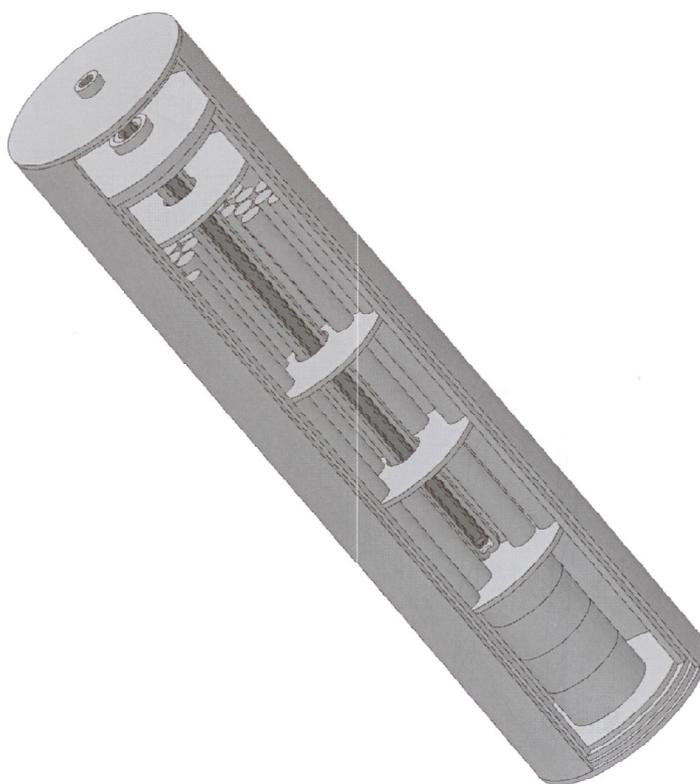


Fig. 1: proposta di capsula per prove di annealing

Le prove di corrosione prevedono l'impiego di provini a geometria cilindrica, del diametro di 10mm e lunghezza di 50 mm già ampiamente utilizzati negli impianti del Brasimone. Per le prove di trazione si adotterà la geometria già utilizzata in passato da RIAR, in modo da rendere superfluo un pesante adattamento delle macchine di prova disponibili presso RIAR. In fig. 2 è riportata la schematizzazione del provino.

| | | | | |
|--|---|---|---|------------------------------|
|  Dipartimento Fusione, Tecnologie e Presidio Nucleare Sezione di Ingegneria Sperimentale FPN FISING | TITOLO Sviluppo di un programma di qualificazione di materiali strutturali per reattori refrigerati al piombo di IV generazione: Lexur 2 – Definizione della matrice di test | DOCUMENTO AdP-ENEA-MSE LP3 (E) | DATA EMISSIONE : 09/02/2009 | PAGINA 8 of 12 |
| | | | HS-G-R-001 | |

Per ciò che riguarda le prove di creep i provini saranno realizzati in conformità alla normativa ASTM E647 [4], mentre le prove di creep saranno eseguite su provini di geometria definita da SCK-CEN, presso il cui laboratori è disponibile il sistema di prova.

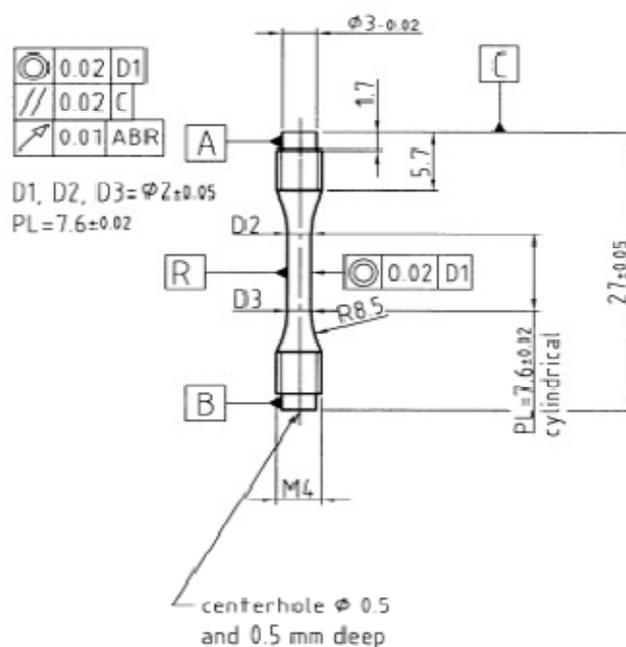


Fig. 2: geometria del provino di trazione

Programma di prova

L'attività che verrà svolta all'interno dell'accordo di programma, che ha già ricevuto notevole consenso da parte di diverse istituzioni internazionali, può essere pertanto schematizzata in tre task:

- ❖ Il progetto dell'esperienza, con la specifica dei parametri di corrosione e delle prove meccaniche, la progettazione della sezione di prova e la successive costruzione, la fornitura dei materiali e la realizzazione dei provini, pressoché conclusa e nel presente rapporto descritta.

| | | | | |
|--|---|---|---|------------------------------|
|  Dipartimento Fusione, Tecnologie e Presidio Nucleare Sezione di Ingegneria Sperimentale FPN FISING | TITOLO Sviluppo di un programma di qualificazione di materiali strutturali per reattori refrigerati al piombo di IV generazione: Lexur 2 – Definizione della matrice di test | DOCUMENTO AdP-ENEA-MSE LP3 (E) | DATA EMISSIONE : 09/02/2009 | PAGINA 9 of 12 |
| | | | Rev : 0 | |

- ❖ Le prove out of pile, e quindi la certificazione della capsula per irraggiamento, l'assemblaggio del sistema, l'esecuzione della campagna fuori reattore, in solo ambiente piombo, l'apertura e l'estrazione dei provini.
- ❖ Al termine, l'esecuzione delle prove di trazione con frattografia, SEM ed OM sui provini di corrosione, analisi dimensionale dei provini cilindrici per creep, l'analisi e la comparazione dei risultati.

Il programma sperimentale è stato così definito:

Le prove verranno eseguite a due temperature: 450°C e 550°C, per una durata di 4000 ed 8000 ore corrispondenti al tempo necessario a raggiungere le dosi di 8 e 16 dpa in reattore.

Il numero di provini che verranno testati ad ogni temperatura è il seguente:

- ❖ 14 provini per corrosione, 2 per ogni materiale;
- ❖ 14 provini di trazione, anche in questo caso 2 per materiale;
- ❖ 4 provini CT (T91 e AISI316)
- ❖ 4 tubi in pressione (T91+15-15Ti)

Per ciò che concerne le prove di trazione per la determinazione del campo di duttilità saranno condotte a bassa velocità di deformazione, non superiore a $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.

I materiali ed i provini verranno forniti da ENEA ed SCK-CEN.

Le prove meccaniche saranno eseguite utilizzando le macchine di trazione normalmente usate, presso RIAR ed SCK CEN, al fine di creare un database delle caratteristiche dei materiali utile per comparazioni dirette tra il danneggiamento dovuto alle sole interazioni fisico/chimiche in piombo e quelle dovute all'azione dell'irraggiamento.

È stata definita la tempistica delle prove, e quindi la durata complessiva del programma sperimentale, che correttamente si inquadra all'interno dell'accordo di programma:

| | | | | |
|--|---|---|---|---|
|  Dipartimento Fusione, Tecnologie e Presidio Nucleare Sezione di Ingegneria Sperimentale FPN FISING | TITOLO Sviluppo di un programma di qualificazione di materiali strutturali per reattori refrigerati al piombo di IV generazione: Lexur 2 – Definizione della matrice di test | DOCUMENTO AdP-ENEA-MSE LP3 (E) HS-G-R-001 | DATA EMISSIONE : 09/02/2009 | PAGINA 11 of 12 |
| | | | Rev : 0 | |

Conclusioni

L'attività sperimentale ha ricevuto ampio consenso internazionale, poiché potrebbe fornire risposta a numerose questioni tuttora aperte sulla compatibilità tra i materiali strutturali selezionati e l'ambiente particolarmente aggressivo previsto negli LFR.

Il progetto vedrà il coinvolgimento del SCK-CEN e del RIAR, garantendo una molteplicità di competenze idonea ad affrontare un programma di notevole complessità.

L'attività ha subito un leggero ritardo nel suo avvio che verrà certamente recuperato nel seguito.

| | | | | |
|--|---|---|---|-------------------------------|
|  Dipartimento Fusione, Tecnologie e Presidio Nucleare Sezione di Ingegneria Sperimentale FPN FISING | TITOLO Sviluppo di un programma di qualificazione di materiali strutturali per reattori refrigerati al piombo di IV generazione: Lexur 2 – Definizione della matrice di test | DOCUMENTO AdP-ENEA-MSE LP3 (E) | DATA EMISSIONE : 09/02/2009 | PAGINA 12 of 12 |
| | | | Rev : 0 | |

Bibliografia

1. A. Aiello, G. Benamati, R. Melder, A. Povstyanko, Mechanical properties of Eurofer 97 in Pb–16Li and irradiation effect, *Journal of Nuclear Materials* 376 (2008) 396–400
2. A.G. Ioltukhovskiy, M.V. Leonteva-Smirnova, M.I. Solonin, V.M. Chernov, V.N. Golovanov, V.K. Shamardin, T.M. Bulanova, A.V. Povstyanko, A.E. Fedoseev, Heat resistant reduced activation 12% Cr steel of 16Cr12W2VTaB type-advanced structural material for fusion and fast breeder power reactors, *Journal of Nuclear Materials* 307–311 (2002) 532–535
3. Tim Abram, Sue Ion, Generation-IV nuclear power: A review of the state of the science, *Energy Policy* 36 (2008) 4323–4330
4. ASTM E647 - 08 Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates