



Ricerca di Sistema elettrico

Caratterizzazione delle proprietà meccaniche e di corrosione in piombo liquido dell'acciaio doppio stabilizzato DS4

C. Cristalli

Caratterizzazione delle proprietà meccaniche e di corrosione in piombo liquido dell'acciaio doppio stabilizzato DS4

C. Cristalli (ENEA)

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

Area: Generazione di Energia Elettrica con Basse Emissioni di Carbonio

Progetto: Sviluppo competenze scientifiche nel campo della sicurezza nucleare e collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV Generazione.

Linea: Collaborazione ai programmi internazionali per il nucleare di IV Generazione

Obiettivo: Progettazione di sistema e analisi di sicurezza

Responsabile del Progetto: Mariano Tarantino, ENEA

 Ricerca Sistema Elettrico			Sigla di identificazione ADPFISS-LP2-161		Distrib. L	Pag. 1	di 17
Titolo Caratterizzazione delle proprietà meccaniche e di corrosione in piombo liquido dell'acciaio doppio stabilizzato DS4							
Descrittori Tipologia del documento: Rapporto Tecnico Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE su sicurezza nucleare e reattori di IV generazione Argomenti trattati: Caratterizzazione dei Materiali Tecnologia dei Metalli Liquidi							
Sommario Questo documento tratta le attività portate avanti nell'ambito del PAR 2017 riguardo alla caratterizzazione meccanica, a corrosione e sotto irraggiamento con ioni pesanti dell'acciaio austenitico doppio stabilizzato DS4.							
Note Autori: C. Cristalli,¹ Contributi: S. Storai¹, N. Bettocchi¹, L. Masotti¹, A. Ventura¹, S. Bassini¹ (1) ENEA							
Copia n.			In carico a:				
2			NOME				
			FIRMA				
1			NOME				
			FIRMA				
0	EMISSIONE	28/11/2018	NOME	C. Cristalli	M. Tarantino	M. Tarantino	
			FIRMA				
REV.	DESCRIZIONE	DATA		REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE	

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 161	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 2	di 17
--	--	------------------	----------------------	------------------	-----------------

Sommario

Acronimi.....	3
1 Introduzione	3
2 Prove di corrosione in Piombo fluente	3
3 Prove di Creep.....	4
4 Irraggiamento con Ioni pesanti	10
5 Conclusioni.....	11
5 Bibliografia	12
Appendice 1 : HFI; DS4 Proposal.....	13

Acronimi

AdP	Accordo di Programma ENEA-MiSE
CSM	Centro Sviluppo Materiali
DS4	Doppio Stabilizzato 4
EDS	Energy Dispersion Spectroscopy
LBE	Lead-Bismuth Eutectic
LECOR	LEad CORrosion (impianto a Piombo Fluente)
LFR	Lead-cooled Fast Reactor
LNL	Laboratori Nazionali di Legnaro
SEM	Scanning Electron Microscope

1 Introduzione

Nell'ambito del PAR 2013 è stato fabbricato presso CSM un lingotto di acciaio speciale con composizione chimica dettata da ENEA e denominata DS4. I criteri e le scelte che hanno portato alla produzione di questa lega sono riportati nel rapporto conclusivo del 2014. Il lingotto prodotto è stato sottoposto ad un processo di laminazione piana a caldo fino ad uno spessore di 20 mm, trattamento termico di solubilizzazione, e successivamente laminazione a freddo fino ad uno spessore di 15 mm (20% di riduzione a freddo). Sui laminati (sia allo stato solubilizzato che incrudito) sono state eseguite analisi ottiche, prove di durezza e prove di trazione. Dalla caratterizzazione meccanica a trazione, eseguita nell'ambito del PAR 2015, si rileva consistente anisotropia delle proprietà tra i provini estratti nella direzione di laminazione e quelli estratti dal traverso di lamiera. Le proprietà meccaniche della nuova colata (nel verso di laminazione) corrispondono a quelle del lotto prodotto negli anni '90. Il presente rapporto descrive le ultime fasi della ricerca relativamente alla caratterizzazione meccanica ancora in corso (creep), alle prove di corrosione e alla campagna di irraggiamento con ioni pesanti.

2 Prove di corrosione in Piombo fluente

I campioni (geometria riportata in fig. 1) all'interno dell'impianto LECOR sono stati esposti in piombo a 550°C con velocità pari a circa 1.3 m/s per 200 ore di prova.

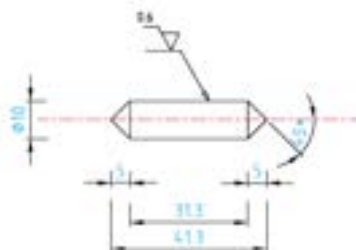


Fig. 1: Dettaglio dei provini per prove di corrosione in piombo fluente nell'impianto LECOR.

Il sensore di ossigeno posizionato a monte della sezione di prova ha rilevato una concentrazione di ossigeno disciolta compresa tra 10^{-4} e 10^{-5} % in peso. Le condizioni ossidanti nel piombo sono state ottenute grazie all'insufflaggio di Ar puro nel vaso di espansione. La Tab. riporta per chiarezza la matrice di prova delle esposizioni nell'impianto a Pb fluente LECOR.

Tab. 1: Matrice di prova delle esposizioni nell'impianto a piombo fluente LECOR.

Substrato	T _{Pb} (°C)	C _O (% in peso)	v _{Pb} (m/s)	Tempo (h)
DS4	550	$10^{-4} - 10^{-5}$ (alto O)	1.3	200

Al termine dell'esposizione nell'impianto, i campioni sono stati preparati ed inglobati per essere sottoposti ad analisi SEM-EDS per la caratterizzazione strutturale e chimica delle superfici. Le analisi SEM devono ancora essere eseguite.

3 PROVE DI CREEP

Si è provveduto alla fabbricazione di un lotto di 25 provini per eseguire una campagna di prove di creep. L'obiettivo è analizzare se le proprietà a creep del DS4 rilevate negli anni '90 sulle barre fabbricate nell'ambito dell'esperimento "Supernova" sono analoghe a quelle dei provini estratti dalla lamiera prodotta nel 2014. In altre parole si vuole confrontare, in termini di proprietà a creep, il processo di laminazione a caldo e a freddo utilizzato nel 2014 per produrre la lamiera con il processo di estrusione-trafilatura a caldo e martellatura a freddo impiegato negli anni '80 per ottenere le barre. Si prevede di eseguire le prove alle temperature 550 e 650 °C, per tempi fino a 10000 ore (v. matrice di prova, tab. 2). La caratterizzazione è tutt'ora in corso. Per queste prove si utilizzano 7 macchine da creep (4 con rapporto di leva 1:15, 3 con rapporto di leva 1:10). Ogni macchina è equipaggiata con un forno a 3 zone (controllato P.I.D., temperatura fino a 1000°C) e una coppia di LVDT per monitorare la deformazione del tratto utile del provino durante la prova. Questa campagna sperimentale è stata interrotta nel 2015, dopo l'esecuzione delle prime due prove, per ragioni legate alla sicurezza dei forni originariamente installati sulle macchine obsolete trasferite dai laboratori di Casaccia a quelli di Brasimone.

Test Temperature (°C)	Applied Load (MPa)	Time to Rupture (hrs)
550°C	580	139
550°C	547	170
550°C	519	460
550°C	490	563
550°C	462	2140

550°C	429	4035
550°C	401	5327
650°C	415	2,3
650°C	390	14,2
650°C	350	93
650°C	340	In corso
650°C	321	2016
650°C	300	In corso
650°C	250	In corso

Tab. 2. Matrice di prova Creep

In seguito alla sostituzione dei forni le macchine da creep sono ritornate operative nel 2017 e le figure seguenti (figg. 2-8) riportano le curve caratteristiche deformazione-tempo ottenute e le fotografie dei provini rotti nelle prove di creep eseguite nel 2018.

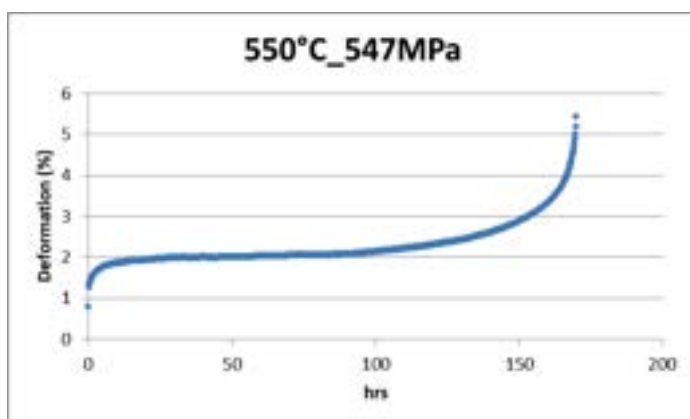


Fig.2 - Prova 550°C – 547 Mpa

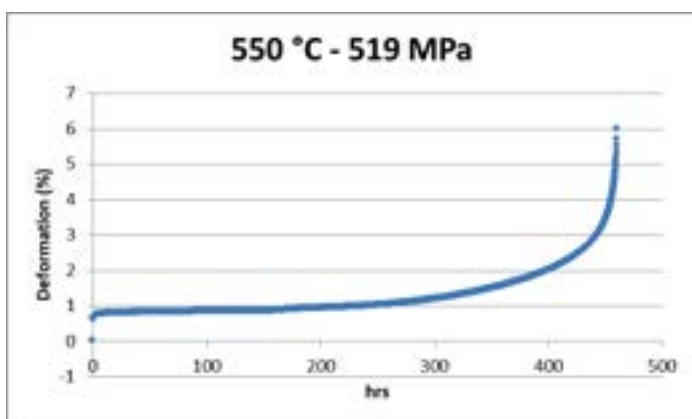


Fig.3 - Prova 550°C – 519 Mpa

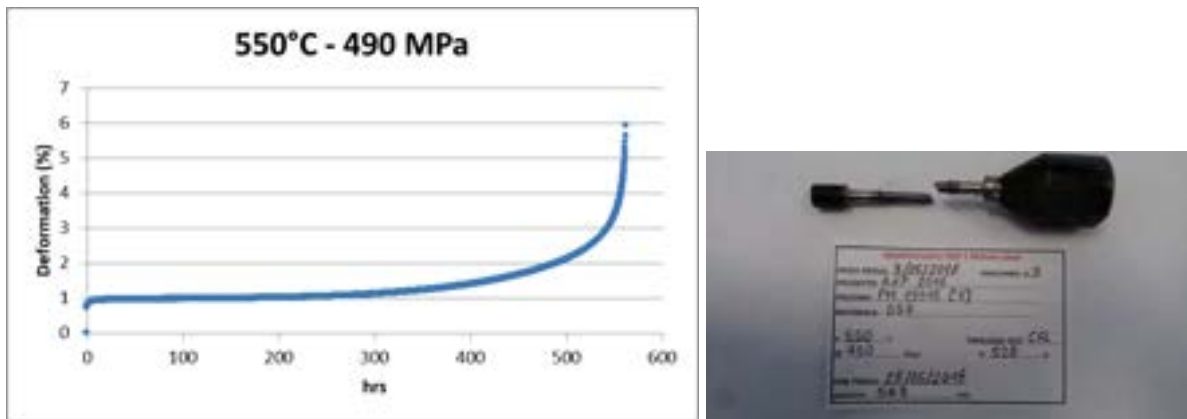


Fig.4 - Prova 550°C – 490 Mpa

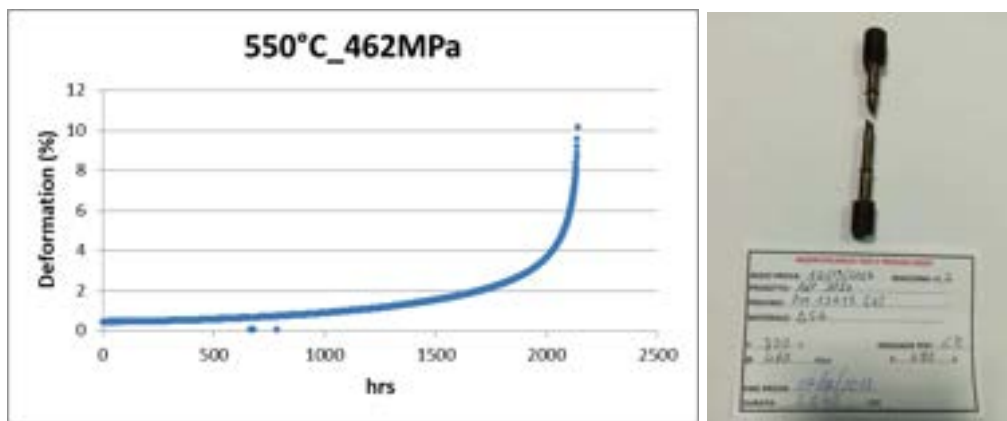


Fig.5 - Prova 550°C – 462 Mpa

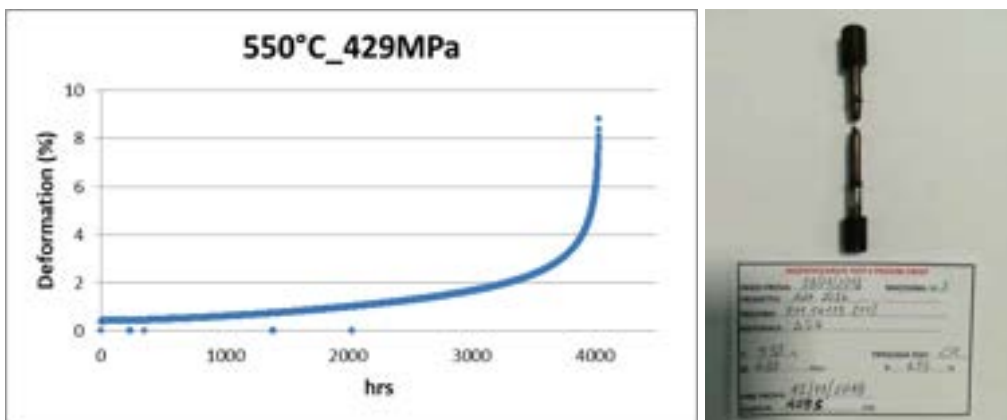


Fig.6 - Prova 550°C – 429 Mpa

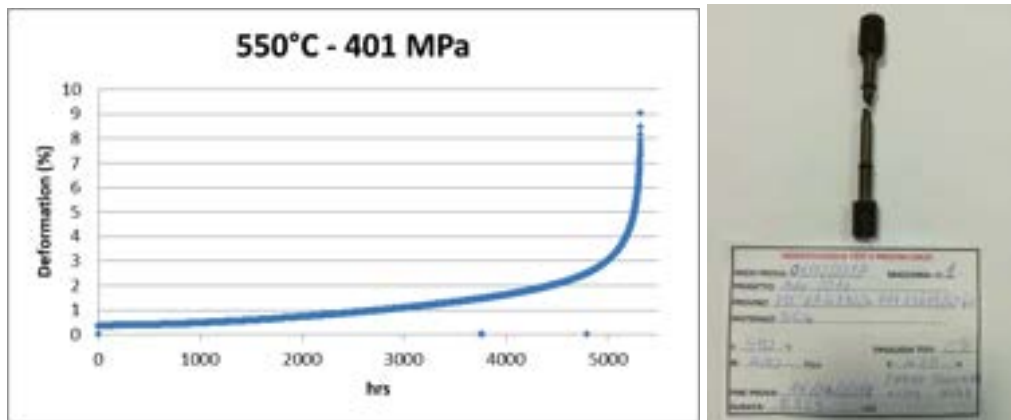


Fig.7 - Prova 550°C – 401 Mpa

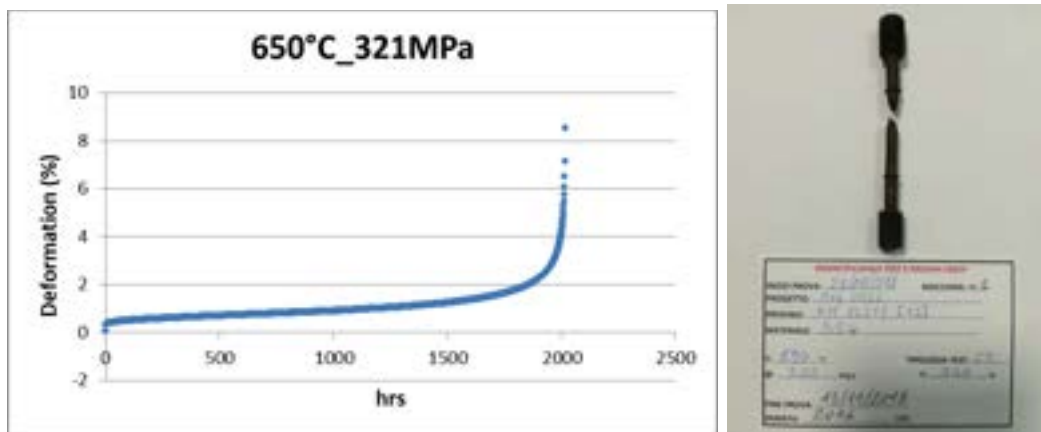


Fig.8 - Prova 650°C – 321 Mpa

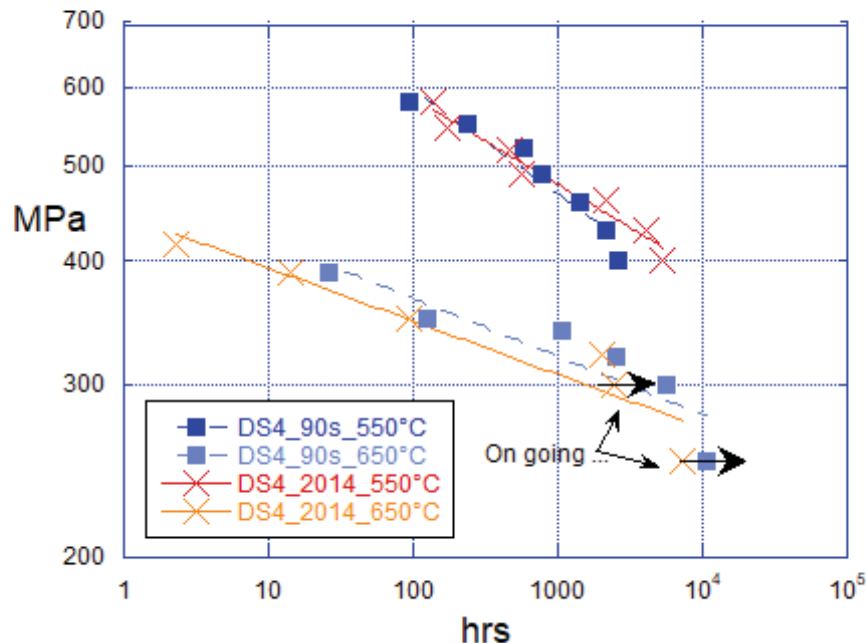


Fig. 9 - Confronto (parziale) lotto anni '90 [1] – lotto 2014

L'ultimo grafico (fig. 9) riporta il confronto, ancora parziale, tra le proprietà a creep del lotto anni 80 e quelle della lamiera prodotta nel 2014. Le prove di creep a 550°C già concluse rivelano una lieve disuniformità di comportamento fra le barre anni '80 e la lamiera 2014; ai carichi alti (durata delle prove intorno a 100 ore) il materiale 2014 resiste mediamente di meno, se confrontato, a parità di carico applicato, con il lotto anni '80. Abbassando il carico invece, la tendenza si inverte e il materiale ottenuto da lamiera (2014) resiste di più di quello ottenuto da barra (anni 80). Questo comportamento è da vedersi positivamente, dato che la maggiore resistenza ai carichi bassi (più vicini al carico di esercizio in reattore) prelude ad una maggiore resistenza nella condizione di esercizio del componente finale. Si può concludere che la campagna sperimentale a 550°C dimostra che, dal punto di vista delle proprietà a creep, è stato possibile replicare, con la lamiera 2014, lo stesso acciaio fabbricato negli anni '80 in forma di barre (con proprietà a creep addirittura migliorate).

A 650°C (fig. 9) i risultati parziali (3 prove ai carichi più bassi sono ancora in corso) indicano una sostanziale corrispondenza con i risultati ottenuti negli anni '90 sulle barre dell'esperimento "Supernova". Tuttavia la resistenza a creep a questa temperatura risulta leggermente inferiore se confrontata con quella delle barre caratterizzate negli anni '90 (esperimento "Supernova"). I risultati preliminari a 650°C sono comunque da considerarsi del tutto provvisori e devono essere confermati una

volta conclusa la campagna completa di prove di creep tutt'ora in corso. Lo stato delle prove in corso è riportato nelle figg. 10-12.

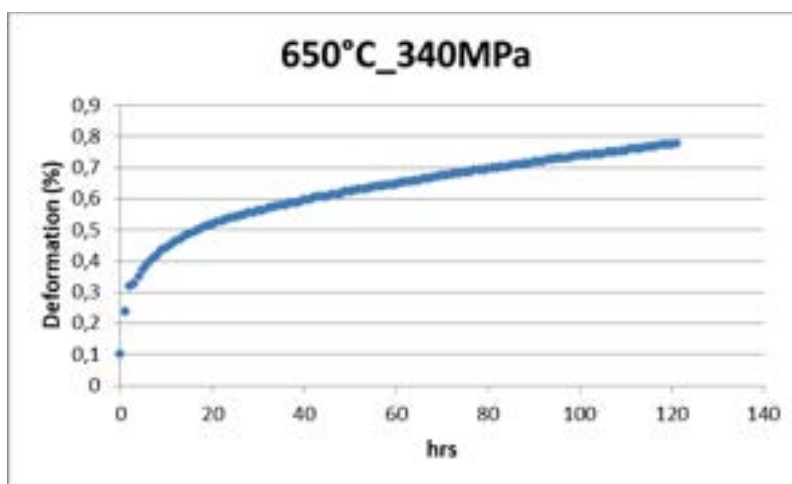


Fig. 10 - Prova 650°C – 340 Mpa

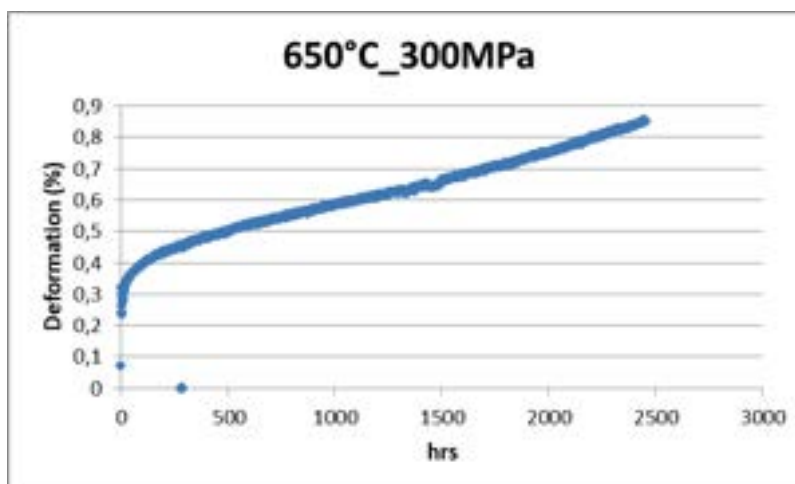


Fig.11 - Prova 650°C – 300 Mpa

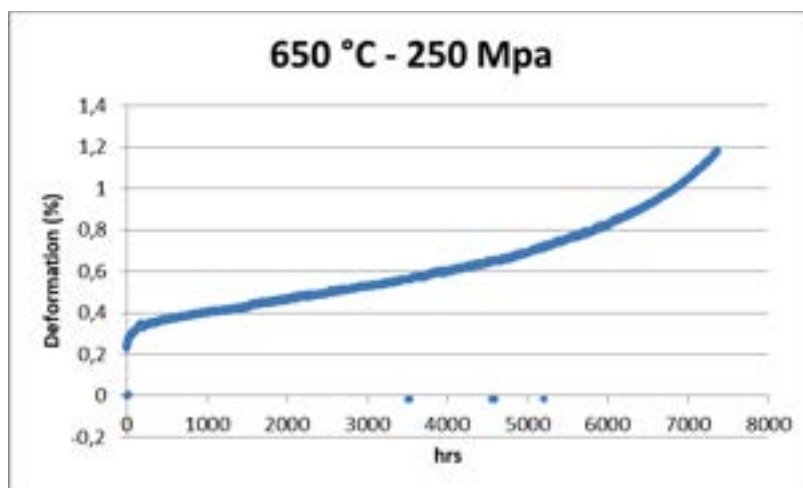


Fig.12 - Prova 650°C – 250 Mpa

4 IRRAGGIAMENTO CON IONI

Con i primi tre turni di irraggiamento eseguiti nel 2015 e 2016 presso LNL (Laboratori Nazionali di Legnaro) non è stato possibile raggiungere un danneggiamento pari a 100 dpa ma soltanto nell'ordine dei 60 dpa. Questo è dovuto al fatto che, per motivi tecnici, non è stato possibile mantenere la corrente del fascio al valore target di specifica di 1000 pnA ma la si è dovuta abbassare a 700 pnA. Di conseguenza il danneggiamento ottenuto con i primi tre turni è stato ridotto in proporzione.

Pertanto, in data 15/01/2016 è stata inoltrata una nuova Proposta a LNL (Laboratori Nazionali di Legnaro) atta ad ottenere due ulteriori turni di irraggiamento per raggiungere il valore obiettivo di 100 dpa con ioni pesanti (58 Ni, 110 MeV). La proposta (v. Allegato 1 in appendice) è stata accettata e sono stati concessi 2 ulteriori turni di irraggiamento da due giorni l'uno; il campione di geometria 5x20x1,3 mm verrà quindi irraggiato per cinque sessioni per dieci giorni totali.

Il quarto turno di irraggiamento si è svolto in data 20-23 Dicembre 2016. Il quinto ed ultimo turno, previsto originariamente in data 28-29 luglio 2017, non è stato eseguito a causa della rottura del laddertron dell'acceleratore TANDEM (LNL, INFN, Legnaro PD). E' stato quindi posticipato, dopo un lungo periodo di manutenzione dedicato al ripristino del guasto avvenuto sull'impianto, alla data: 06-07 Dicembre 2018. La figura seguente (fig. 9) riporta una fotografia del campione montato sulla sezione di prova, dopo i primi quattro turni di irraggiamento.

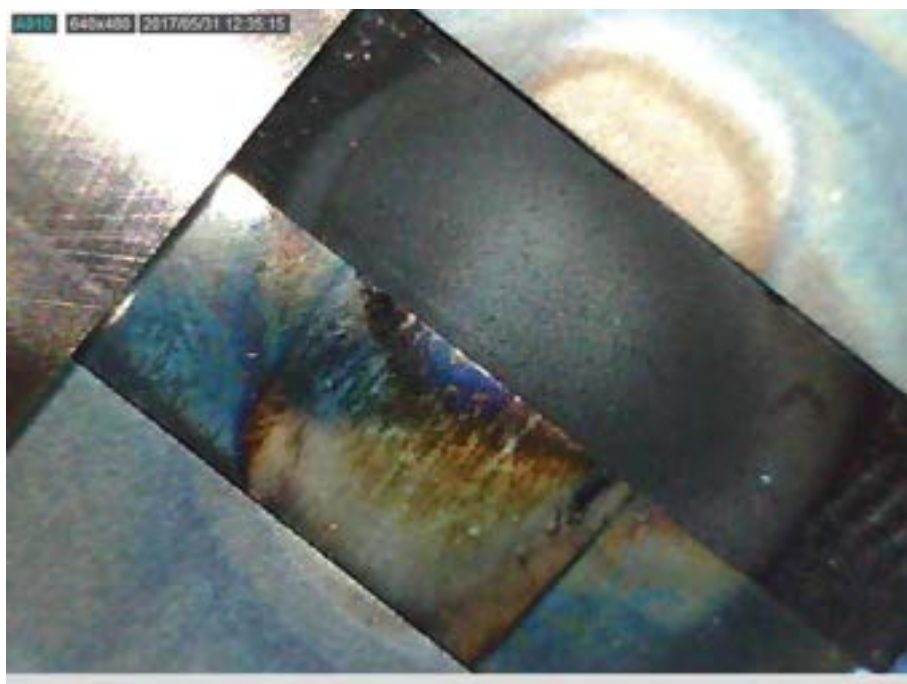


Fig. 13 Campione per Ion Irradiation 1,3x5x20 mm³ montato sulla sezione di prova irraggiato per quattro turni totali (80 dpa approx.)

5 Conclusioni

Sono state effettuate prove di esposizione in piombo fluente per studiare la corrosione sull'acciaio DS4 proposto come materiale di guaina combustibile per sistemi LFR e valutare l'eventuale necessità di ricoprimenti protettivi per l'acciaio proposto. Prove di esposizione in piombo fluente a 550°C, velocità 1.3 m/s, ossigeno disciolto tra 10^{-4} e 10^{-5} % in peso e per 200 ore sono state effettuate nell'impianto LECOR. Le analisi SEM-EDS su questi provini sono in corso e saranno disponibili nel prossimo futuro.

La campagna di caratterizzazione a creep è stata in gran parte già eseguita (le prove a 550°C sono tutte concluse) ma alcune prove a 650°C sono tutt'ora in corso e si concluderanno nel 2019. I risultati delle prove a 550°C rivelano una lieve disuniformità di comportamento fra le barre anni '80 e la lamiera 2014; ai carichi bassi l'acciaio 2014 risulta più resistente se confrontato, a parità di carico applicato, con il lotto anni '80. La campagna di prove a 550°C dimostra che, dal punto di vista delle proprietà a creep, è stato possibile replicare, con la lamiera 2014, lo stesso acciaio fabbricato negli anni '80 in forma di barre (con proprietà a creep addirittura migliorate). Per ciò che riguarda le prove a 650°C, i risultati preliminari (3 prove ai carichi più bassi sono ancora in corso) indicano una sostanziale corrispondenza con i risultati ottenuti negli anni '90 sulle barre dell'esperimento "Supernova".

Infine, per ciò che riguarda la campagna di irraggiamento con ioni pesanti (58 Ni, 110 MeV), presso LNL, i primi quattro turni si sono già svolti, ma il quinto ed ultimo turno, necessario per raggiungere l'obiettivo dei 100 dpa di danneggiamento e

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 161	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 12	di 17
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

programmato inizialmente per Luglio 2017, è stato posticipato per un guasto sull'impianto (rottura del "laddertron" dell'acceleratore TANDEM) e verrà eseguito in data: 6/7 Dicembre 2018.

6 Bibliografia

- [1] OECD/NEA, "Handbook on lead-bismuth eutectic alloy and lead properties, materials compatibility, thermal-hydraulics and technologies", (2015).
- [2] G. Muller, A. Heinzl, J. Konys, G. Schumacher, A. Weisenburger, F. Zimmermann, V. Engelko, A. Rusanov, V. Markov, "Behavior of steels in flowing liquid PbBi eutectic alloy at 420-600°C after 4000-7200h", J. Nucl. Mater. 335 (2004) 163-168.
- [3] C. Schroer, O. Wedemeyer, J. Novotny, A. Skrypnik, J. Konys, "Selective leaching of nickel and chromium from type 316 austenitic steel in oxygen-containing lead-bismuth eutectic (LBE)", Corros. Sci. 84 (2014) 113-124.
- [4] J. Zhang, N. Li, "Review of the studies on fundamental issues in LBE corrosion", J. Nucl. Mater. 373 (2008) 351-377.
- [5] S. Bassini, "Coolant Chemistry in ALFRED Demonstrator", FALCON Consortium private Document, Technical report LR-D-S-201 (2016).
- [6] S. De Vrieze, N. De Wispelaere, "15x15 Ti Production and Procurement", ENEA Technical Report RdS/2012/045.
- [7] C. Cristalli, "Double Stabilized Stainless Steels Procurement", ENEA Technical Report RdS/PAR2013/035.
- [8] A. Bellucci, "Ricoprimenti per materiali strutturali per sistemi nucleari refrigerati a piombo", ENEA Technical Report RdS/2012/043.
- [9] F. Nanni, I. Cacciotti, F. R. Lamastra, "Caratterizzazione di rivestimenti PVD di TiN, FeAl, FeCrAl su substrati metallici", ENEA Technical Report RdS/2012/047.
- [10] S. Bassini, "Prove di corrosione su materiali strutturali ricoperti in piombo stagnante", ENEA Technical Report ENEA RdS/2014/069.
- [11] Y. Kurata, "Corrosion behavior of cold-worked austenitic stainless steels in liquid lead-bismuth eutectic", J. Nucl. Mater 448 (2014) 239-249.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione ADPFISS – LP2 – 161	Rev. 0	Distrib. L	Pag. 13	di 17
--	--	------------------	----------------------	-------------------	-----------------

Appendice 2 : HFI-DS4 Proposal

HFI-DS4 Proposal:

“Investigation of the effect of high fluence irradiation on the swelling and microstructural behavior of DS4 steel”

Carlo Cristalli ¹, Luciano Pilloni ², Massimo Angiolini ^{2*}

***Spokesperson**

¹ CR ENEA Brasimone, Camugnano (BO), Italy.,

² CR ENEA Casaccia, Anguillara Sabazia (Rome), Italy

Abstract

The qualification of the fuel cladding material is one of the most crucial issues in Lead Fast Reactors technology. Historically, the main limiting factor is related to cladding swelling, that is the increase of volume that takes place in materials subjected to intense neutron radiation and due to nucleation and growth of point defects aggregates. The swelling acceptability limit may range from 3% to 6%. At the beginning of the ‘80s, within an experimental program carried out at the Saclay Research Center, the electrons irradiations (1 MeV) have shown the effectiveness of the simultaneous presence of Ti and Nb on the swelling resistance of 316 and 15 Cr-15 Ni matrix. This experimental evidence lead CEA and ENEA to start the production and the characterization of the first Double Stabilized steels (DS). An optimization of the chemical composition lead to the realization of a 2nd generation based on 15 Cr-15 Ni and 15 Cr-25 Ni matrix. The microstructural and compositional features that are expected to control and limit the swelling ratio are the high Ni content, the secondary precipitation of Ti and Nb carbides and the cold working in the range of 20% in terms of section reduction ratio. After ion irradiation the evolution of the dislocations net and the irradiation induced precipitation will be studied.

1. Scientific Motivation

Among the open issues related to the LFR (Lead Fast Reactor) demonstration, the cladding material assessment is one of the most crucial question still under investigation. Data on performances of the candidate materials in high temperature lead and under irradiated conditions are not yet available. Some information may be obtained from the experience gained on materials like the austenitic steel 15-15 Ti, which has been proven suitable for Sodium environment. The qualification of the cladding material, the one which is meant to comply with the containment of the fuel pellets, is one of the most crucial issues in LFR technology. Historically, the main limiting factor is related to cladding swelling. The swelling acceptability limit may range from 3% to 6%.

At the beginning of the ‘80s, within an experimental program carried out at the Saclay Center, the under electrons irradiations (1 MeV) have shown the effectiveness of the simultaneous presence of Ti and Nb on the swelling resistance of 316 and 15 Cr-15 Ni matrix. This experimental evidence lead CEA and ENEA to start the production and the characterization of the first Double Stabilized steels

(DS). This first generation was widely characterized showing the strong influence of some additional elements on the structural stability of an austenitic matrix. A very critical analysis of the results of the mechanical tests and the structural evolution lead to an optimization of the chemical composition.

A second generation of swelling resistant steels has then been realized based on 15 Cr-15 Ni and 15 Cr-25 Ni matrix. The second generation of DS steels was based on a 15Cr-15Ni matrix, with a complete revision of the chemical composition and on a new matrix 15Cr-25Ni (DS3 15-15 Ti+Nb, DS4 15-25 Ti+Nb, DS5 15-25 Ti+Nb) [Ref.1].

The irradiation results obtained in the framework of Supernova experience in terms of swelling resistance (fig. 1 [4]) appeared extremely promising. Up to 89 DPA (Displacement per Atom) the Double Stabilized alloys were subjected to very limited swelling, in comparison to other austenitic 15-15 steels. The swelling ratio of DS4, in particular, appeared the lowest. Examining the microstructure (fig. 2 [4]) we can appreciate the very limited formation of voids in Double Stabilized Steels with respect to 15-15.

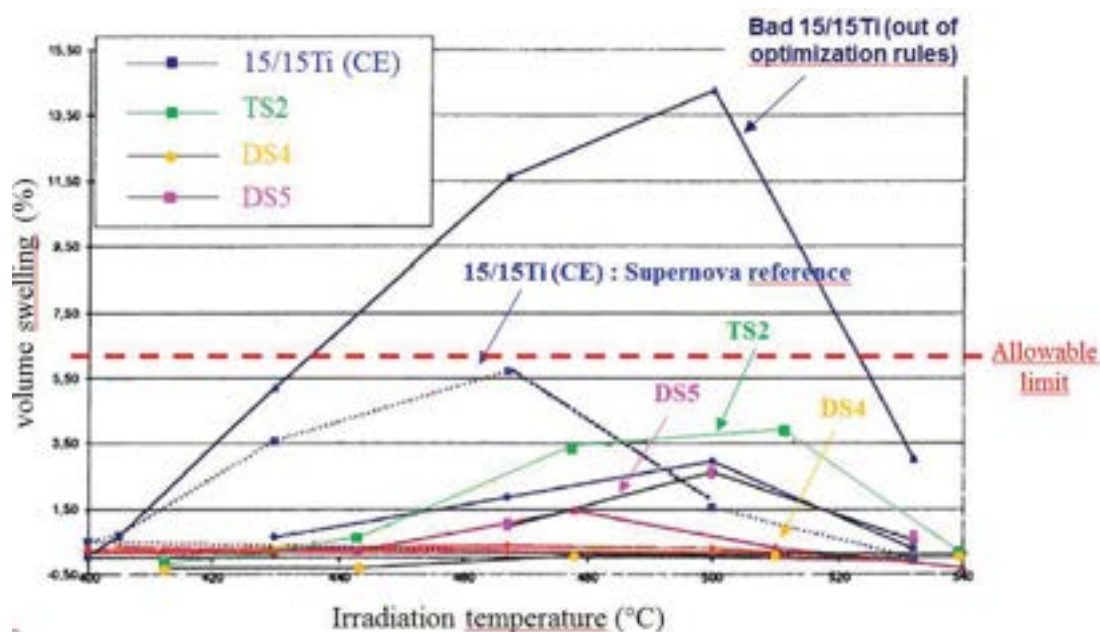


Fig. 1 Volume swelling as function of the Irradiation Temperature for several steels irradiated up to 89 dpa in Supernova experience [4]

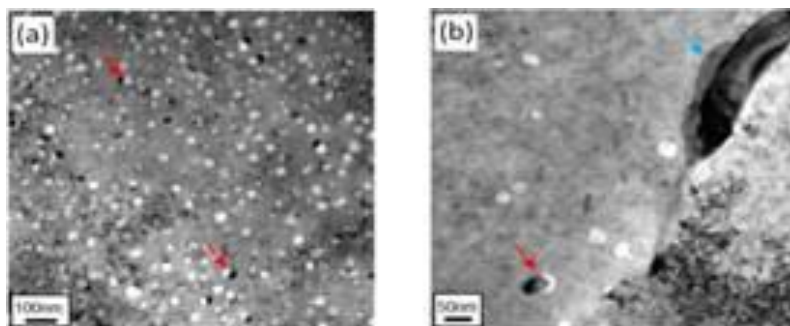


Fig. 2 Density of voids after irradiation; High in 15-15 Ti steel (a; left) Low in DS steels (b; right) [4]

2. Proposed Experiment

The proposed experiment is aimed at the investigation of the effects of ion irradiation on the microstructure of DS4 steel in terms of formation of vacancies clusters, voids swelling, segregation of atomic species. The irradiation with ions is commonly used to simulate neutrons irradiations since presents various advantages compared to neutrons irradiations, among the others, the possibility to carry out studies involving a wide range of experimental conditions, to induce an elevated displacement damage in short times and to avoid the activation of the samples. Also the variation in the irradiation fluence is expected to affect the previously listed phenomena, connected to the swelling behaviour.

The microstructural and compositional features that are expected to control and limit the swelling ratio are listed below:

- Ni content; as it results from some dated studies [2], a high content in Ni, namely in the range of 25%, is expected to limit the swelling (fig. 3)

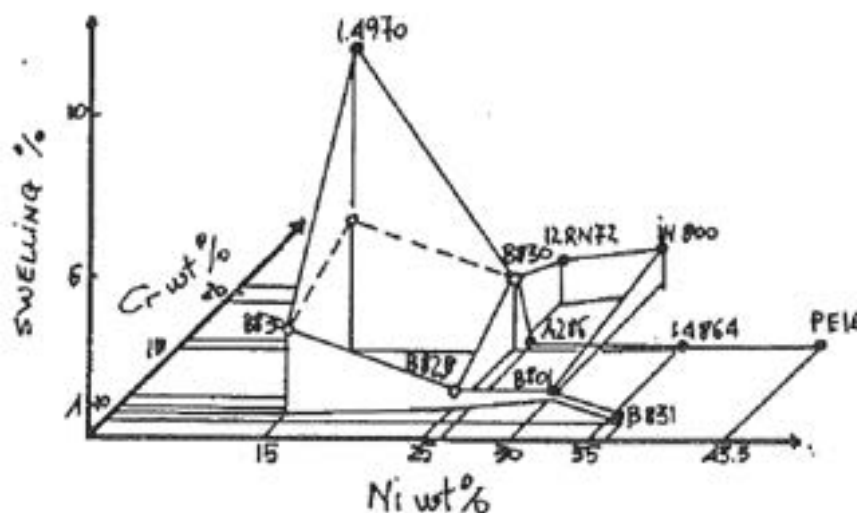


Fig. 3 Swelling ratio as function of Ni and Cr contents [2]

- Secondary carbide precipitation (TiC and NbC); A distinction is needed between the definitions of primary and secondary precipitation; the Primary precipitation is the one occurring during the annealing heat treatment of the steel. Low primary precipitation means sufficient "free" contents of Carbon, Ti and Nb in solid solution in order to allow a secondary (in service) beneficial precipitation. The Secondary, so-said "in-service", precipitation is the one occurring during the high temperature expositions inside the reactor. This sort of "in-service" precipitation is highly effective as movement inhibitor for linear defects. The precipitation of carbides doesn't only act on the creep resistance of the material; it also has positive effects on the stability under irradiation. Here's a graphical investigation of the first 90's about the dependence of swelling attitude on the primary precipitation and on the stabilization ratio for a 15Cr-15Ni matrix (fig. 4 [3]). As long as the primary precipitation is kept low the secondary (highly desirable) precipitation is fostered and the limited swelling attitude is a consequence. The coefficient used to define and manage the precipitation is the Stabilization Ratio:

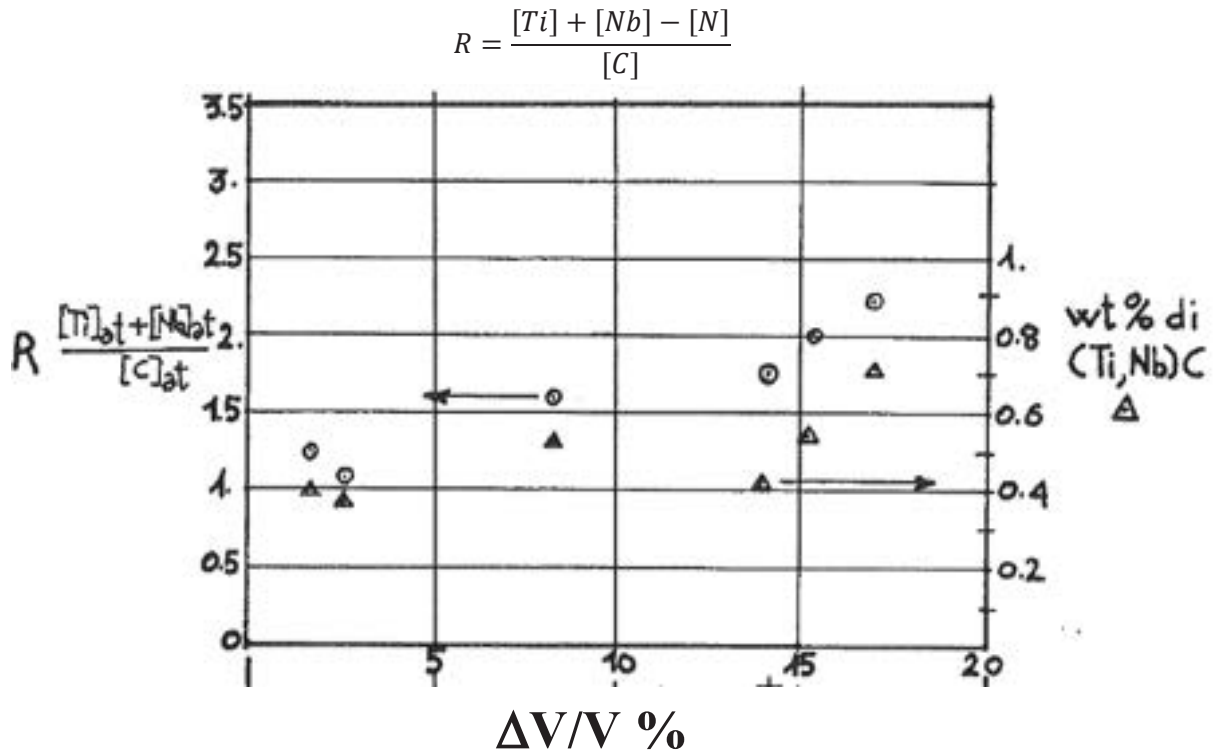


Fig. 4 Relation between stabilization ratio, weight percentage of primary precipitation and swelling attitude for a 15Cr-15Ni austenitic matrix irradiated at 450°C with an irradiation damage of 105 dpa [3]

The efforts carried out to obtain a lower primary precipitation by modifications of chemical composition lead to stabilization ratios of 1.38 for DS3 and 0.55 for the DS4 steel (the 2nd generation Double Stabilized Steels). With low stabilization ratios and a solution treatment at 1100°C it resulted possible to have a low primary precipitation, that means sufficient "free" contents of Carbon, Ti and Nb in solid solution in order to allow a secondary (in service) beneficial precipitation.

- Cold working; Even the cold working, in a range of 20% of section reduction, is thought to play a role in limiting the swelling of the alloy. The dislocations formed during the heavy plastic deformation, infact, even after partial recovery due to the operation temperature, should act as "sinks" where the voids are going to be absorbed.

Therefore what we expect to investigate through SEM and TEM observations, after ion irradiation, is how the voids interact with the precipitates (TiC and NbC) and with the dislocations. After irradiation the evolution of the dislocations net and the irradiation induced precipitation will be studied. How do the voids recombine with the precipitates? Are the voids going to be annihilated by the expected high amount of secondary precipitation? Do the residual dislocations absorb the vacancies? These are the question to which we expect to give an answer or, at least, a better understanding of the phenomena governing swelling behavior should be achieved.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	ADPFISS – LP2 – 161	0	L	17	17

A series of samples will be manufactured in order to undergo ion irradiation; the geometry of the samples will be 20x10x1,3 mm³.

We would require an irradiation up to 120 dpa at 550°C irradiation temperature. If not possible to reach 120 dpa a dose exceeding 80 dpa would be enough. The irradiation conditions should be determined in order to produce a wide damaged region along the ions direction.

After irradiation the samples will undergo a first optical “shape profile” check aimed at the detection of locally increased volume. Then, through the use of a numerical code (SRIM), the maximum damage zone will be identified, and, on this portion of the specimen, the TEM examinations will be performed. Pre and post-irradiation morphological and structural analyses will be performed by Scanning Electron Microscopy (SEM) and Transmission Electron Microscopy (TEM), while the mechanical performance pre and post-irradiation will be examined by Nanoindentation.

3. *Beam time request*

The DS4 sample has already been irradiated in the previous 2015 sessions. The Intensity value initially requested was 1000 pnA in order to achieve 100 dpa after 6 days irradiation. Nevertheless, during the experiment, it hasn't been possible to maintain this value but it has been necessary to lower the intensity down to 700 pnA (average). With this intensity value the resulting estimated damage should be in the range of 60 dpa (approximate) after the first 3 sessions (6 days irradiation). Therefore it would be necessary to perform two additional shifts (4 days irradiation, corresponding roughly to 40 dpa) in order to achieve the desired total damage in the range of 100 dpa.

Beam: 110 MeV 58Ni beam continuous (Tandem 10 MV, one stripper, by selecting the more probable ion) and the Tandem transmission of 40% with 700 pnA in FC2.

Beam focussed on the target (3-5 mm area)

Experimental setup TANDEM XTU-SIRAD with heated sample holder

Beamtime: 4 Days in order to achieve a dose up to 40 dpa

4. *References*

- [1]. G. Filacchioni, U. de Angelis, D. Ferrara, L. Pilloni / Proceedings of the Conference: “Fast reactor core and fuel structural behavior”, B.N.E.S., London, 1990
- [2]. T. Boothby, T.M.Williams, D.R. Harries / Proceedings of the Conference: “Dimensional Stability and Mechanical behavior of irradiated metals and alloys”, B.N.E.S., Brighton, 1983
- [3]. L. Pilloni, Internal ENEA Report, restricted distribution, 1987
- [4]. M. Le Flem and oth., Meeting on ENEA CEA Cooperation in support to ASTRID – November 28, 2013