2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

고리1호기 구증기발생기의 PWSCC와 ODSCC

PWSCC and ODSCC of Kori 1 Retired Steam Generator Tubing

김홍표, 김동진, 황성식, 정만교, 임연수, 김정수, 김우철
한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요약

고리1호기 구증기발생기 전열관 인출검사를 통한 전열관재료의 primary water stress corrosion cracking(PWSCC)과 outer diameterstress corrosion cracking(ODSCC)를 분석하였다. 인출전열관의 파괴면과 전열관 내면 그리고 외면의 침적물의 조성을 EDS로 분석하였다. 1991년 인출 검사 전열관의 PWSCC와 ODSCC는 기계확관천이 부분에서 관찰되었다. PWSCC는 축방향 PWSCC와 원주방향 PWSCC가 관찰되었다. 축방향 PWSCC는 전열관 두께를 관통균열하였고 원주방향 PWSCC는 약 전열관 두께의 50%관통을 하였다. ODSCC는 pit뿌리에서 관찰되었으며, ODSCC 결함깊이는 전열관 두께의 약 10%이었다. 원주방향 PWSCC의 존재는 실험실적으로 측정한 전열관 확관천이 부분의 내면에 존재하는 원주방향 잔류응력은 축방향잔류응력보다 더 큰 것으로 보고되지만 실제 제작환경에서 전열관에 따라 축방향 잔류응력이 더 큰 것이 있을 수 있거나 혹은 균열길이와 깊이의 분포가 확률에 의해 주어진 것에 기인할 수 있다. 전열관 확관천이 부분의 외면에 존재하는 잔류응력은 전열관 내면에 존재하는 잔류응력보다 상당히 적은 것에 의해 ODSCC의 결함깊이가 PWSCC의 결함 깊이보다 더 작은 것으로 보인다. 전열관의 파면과 전열관 내면과 외면에는 부분에 따라 Pb등의 분술물이 관찰되었으며, 이 Pb가 PWSCC와 ODSCC를 조장하였을 것으로 판단된다. 1994년 인출한 전열관에서는 확관천이와 무관한 sludge file내의 free span에서 ODSCC가 관찰되었다. 전열관의 free span부분에 작용하는 잔류응력은 거의 없고 단지 가동압력차와 온도차에 의해 유발되는 작은 응력만 존재하고, 이 응력에 의해 ODSCC가 진전하였다. 따라서 sludge file내의 불순물의 농축에 의해 ODSCC

를 발생시키는 매우 가혹한 분위기가 형성되었을 것으로 판단된다.

Abstract

Kori 1 nuclear power plant with 600MWe has been operated since 1978. Kori 1 have experienced severe pitting due to ingress of seawater through condenser tube, primary water stress corrosion cracking(PWSCC) and outer diameter corrosion cracking(ODSCC). Steam generators with low temperature mill annealed(LTMA) Alloy 600 in Kori 1 was replaced to that with thermally treated Alloy 690 in 1998 due to degradation of LTMA Alloy 600. 9 tubes were pulled out from operating power plant to clarify a degradation mechanism and cope with a degradation. In this work, we report failure analysis of pulled out tube as well as degradation trends in terms of tube repair. Axial and circumferential PWSCC and ODSCC were found in roll transition of pulled out tube because residual stress on inner diameter and outer diameter in roll transition is higher than yield strength. IGSCC was also found on root of pit in roll transition region and in free span covered with sludge, suggesting that IGSCC may propagate at very low stress in secondary side if crevice solution was concentrated with impurities. PWSCC and ODSCC were explained in terms of microstructure and environment.

1. 서론

고리1호기는 600MWe 용량의 원전으로 1978년 상업발전을 시작한 이래 해수 유입과 동합금의 부식생성물에 의한 전열관의 pit이 1985년 이후 광범위하게 탐지되었다. 이러한 pitting을 억제하기 위해 1988년 복수기 전열관을 Ti합금으로 교체하였고, 1990년 화학세정을 하였다. 1991년 ISI검사에서 PWSCC가 검출되었고, 이것을 분석하기 위한 인출 검사가 수행되었다. 1994년 ODSCC에 의한 냉각수 누출로 가동정지후 전열관을 인출하여 ODSCC의 원인을 분석하였다.

본 연구에서는 인출검사 결과로부터 고리1호기의 PWSCC와 ODSCC의 원인 및 현황을 현재의 기술의 관점에서 재조명하고, ISI결과 PWSCC와 ODSCC경향을 분석하였다.

2. 결과 및 고찰

2.1 R16C35 전열관의 축방향 PWSCC

1991년 인출한 전열관의 축방향 PWSCC를 Fig. 1에 나타냈다. 기계확관 천이부분에 축방향 PWSCC가 3개 관찰되었다. 축방향 PWSCC 균열은 가장 큰 것은 관통 균열이었다. 균열이 확관 천이부분에서 관찰된 것은 기계확관시 확관천이 부분에 작용하는 원주방향 잔류응력이 존재하기 때문이다. 기계확관시 유도되는 원주방향 잔류응력은 약 400MPa정도[1]로 항복응력보다 상당히 더 크기 때문인 것도 한 원인이다. PWSCC파면의 deposit를 EDS 분석한 부분을 Fig.2에 나타냈고, 파면과 더불어 과 전열관의 내면과 외면의 deposit을 분석한 결과를 Table 1에 나타냈다. PWSCC파면의 주요 합금원소의 조성은 모재의 조성과 유사하였으며, 이것은 EDS beam의 침투깊이가 약 1um이고, 파면에 존재하는 deposit의 두께가 1um보다 상당히 얇아서 파면의 deposit뿐만 아니라 모재가 EDS spectra에 기여했기 때문이다. 특기할 만한 내용은 특정파면에서 전열관 조성과는 무관한 Cu, Cl, S, Pb가 관찰된 것이다. 이런 불순물은 PWSCC균열이 관통균열이기 때문에 2차측으로부터 오염이 되어서 존재할 수 있다. 만약 2차측으로부터 오염된 것이 아니고 1차측으로부터 유입된 것이라면 Cu, Cl, S, Pb는 PWSCC를 조장하였을 것이다. 전열관의 내면과 외면의 deposit도 파면에 존재하는 것과 유사하였다.

2.2 R11C45전열관의 원주방향 PWSCC

1991년 인출한 전열관의 원주방향 PWSCC를 Fig. 3에 나타냈다. 기계확관 천이부분에 원주방향 PWSCC가 폭 1-2mm의 확관천이 부분에서 관찰되었다(Fig.3). 제일 깊은 균열은 전열관 두께의 약 56%이었다. 기계확관시 유도되는 확관천이 부분의 축방향 잔류응력은 약 330MPa정도[1]로 항복응력보다 상당히 더 큰 것이 원주방향 PWSCC를 야기시킨 한 원인으로 생각된다. 하지만 실험실적으로 측정한 원주방향 잔류응력은 약 400MPa임에도 불구하고 축방향 PWSCC는 관찰되지 않았다. 원주방향 PWSCC의 존재는 실험실적으로 측정한 전열관 확관천이 부분의 내면에 존재하는 원주방향 잔류응력은 축방향 잔류응력보다 더 큰 것으로 보고되지만 실제 제작환경에서 전열관에 따라 축방향 잔류응력이 더 큰 것이 있을 수 있거나 혹은 균열길이와 깊이의 분포가 확률에 의해 주어져 더 작은 잔류응력에서도 원주균열이 우선적으로 진전한 것에 기인한 것으로 볼 수 있다.

PWSCC파면과 전열관의 내면의 deposit를 EDS 분석한 부분을 Fig. 4에 나타냈

고 분석한 결과를 Table 2에 나타냈다. PWSCC파면의 주요 합금원소의 조성은 모재의 조성과 유사하였으며, 이것은 EDS beam의 침투깊이가 약 1um이고, 파면에 존재하는 deposit의 두께가 1um보다 상당히 얇아서 파면의 deposit뿐만 아니라 모재가 EDS spectra에 기여했기 때문이다. 하지만 파면의 Point 1과 2는 다른 부분과 차이가 많이 있었으며, 이것은 파면의 그 부분이 전열관 작업중 불순물로 오염된 것에 기인하는 것으로 보인다. 전열관의 내면에 존재하는 deposit의 조성은 분석위치에 따라 크게 변하였다. 즉 deposit의 일부가 떨어져 나간 부분(area 1)과 deposit이 손상되지 않은 부분(area 2) 사이에는 차이가 많이 있었다(Fig. 4(a). deposit이 떨어져 나간 부분의 조성은 모재와 유사하였으며, 이것은 deposit의 두께가 얇아 EDS beam이 모재까지 침투했기 때문이다. area 2는 deposit에 Cr농축과 Ni고갈이 된 rt을 보여준다. 이런 불순물은 PWSCC균열이 관통균열이기 때문에 2차측으로부터 오염이 되어서 존재할 수 있다. 만약 2차측으로부터 오염된 것이 아니고 1차측으로부터 유입된 것이라면 Cu, Cl, S, Pb는 PWSCC를 조장하였을 것이다. 전열관의 내면과 외면의 deposit도 파면에 존재하는 것과 유사하였다.

2.3 R25C29 전열관의 Pit 뿌리에서 ODSCC

R25C29 전열관에 많은 pit가 관찰되었고 확관천이 부분에 있는 한 pit의 뿌리에서는 ODSCC가 관찰되었다. ODSCC를 포함하는 pit내부의 deposit를 EDS분석하였으며, 분석 부분을 Fig. 5에 나타냈고 분석 결과를 Table 3에 나타냈다. Fig. 5(b)의 area 1은 pit 뿌리에 인접한 부분이고 area 2는 pit 상단에 인접한 부분이며, area 3은 모재에 매우 인접한 부분이다. 모재합금원소를 제외한 deposit 성분은 Si, Cu, Al, Ba, Fe등이었고 Pb와 S도 검출되었다. Pb는 S등과 함께 ODSCC를 조장한 것으로 판단된다.

2.4 R27C34 전열관의 free span에서 축방향 ODSCC

R27C34 전열관의 free span에서 ODSCC 균열을 도식적으로 Fig. 6에 나타냈다. ODSCC균열은 확관천이 상단 약 20mm되는 부분에 3개와 60mm되는 부분에 7개의 축방향 균열이 관찰되었으며, 일부 ODSCC균열은 관통균열이다. 원주균열은 관찰되지 않았다. 축방향 ODSCC만 관찰된 것은 가동 중 압력차에 의해 전열관에 작용하는 원주방향 응력이 축방향 응력의 2배인 것에 기인하는 것으로 판단된다. 가동중 1,2차측 압력차에 의해 발생되는 원주방향응력은 항복응력의 약 20%로 매

우 낮은 응력에서 ODSCC가 발생하였다. 이것은 ODSCC가 발생한 부분이 sludge file로 덮여 있고, 전열관과 sludge file 계면의 온도가 2차측 bulk water에 비해 온도가 높아서 불순물이전열관 sludge file 계면에 농축해서 ODSCC를 야기하는 가혹한 분위기를 형성한 것에 기인하는 것으로 판단된다.

3. 결론

PWSCC는 축방향 PWSCC와 원주방향 PWSCC가 관찰되었다. 축방향 PWSCC는 전열관 두께를 관통균열하였고 원주방향 PWSCC는 약 전열관 두께의 50%관통을 하였다. ODSCC는 pit뿌리에서 관찰되었으며, ODSCC 결함깊이는 전열관 두께의 약 10%이었다. 원주방향 PWSCC의 존재는 실험실적으로 측정한 전열관 확관천이 부분의 내면에 존재하는 원주방향 잔류응력은 축방향잔류응력보다 더 큰 것으로 보고되지만 실제 제작환경에서 전열관에 따라 축방향 잔류응력이 더 큰 것이 있을 수 있거나 혹은 균열길이와 깊이의 분포가 확률에 의해 주어진 것에 기인할 수 있다. 전열관 확관천이 부분의 외면에 존재하는 잔류응력은 전열관 내면에 존재하는 잔류응력보다 상당히 적은 것에 의해 ODSCC의 결함깊이가 PWSCC의 결함 깊이보다 더 작은 것으로 보인다. 전열관의 파면과 전열관 내면과 외면에는 부분에 따라 Pb등의 분술물이 관찰되었으며, 이 Pb가 PWSCC와 ODSCC를 조장하였을 것으로 판단된다. 1994년 인출한 전열관에서는 확관천이와 무관한 sludge file내의 free span에서 ODSCC가 관찰되었다. 전열관의 free span 부분에 작용하는 잔류응력은 거의 없고 단지 가동압력차와 온도차에 의해 유발되는 작은 응력만 존재하고, 이 응력에 의해 ODSCC가 진전하였다. 따라서 sludge file내의 불순물의 농축에 의해 ODSCC를 발생시키는 매우 가혹한 분위기가 형성되었을 것으로 판단된다.

후기 본 연구 과학기술부가 주관하는 원자력 연구개발 중장기 계획사업으로 수행된 것입니다.

참고문헌

1. Ph Berge, J.M. Boursier, D. Dallery, F. de Keroulas, Y. Rouillon, 3rd Intern. Steam Generator Conf., Toronto, June, 1988

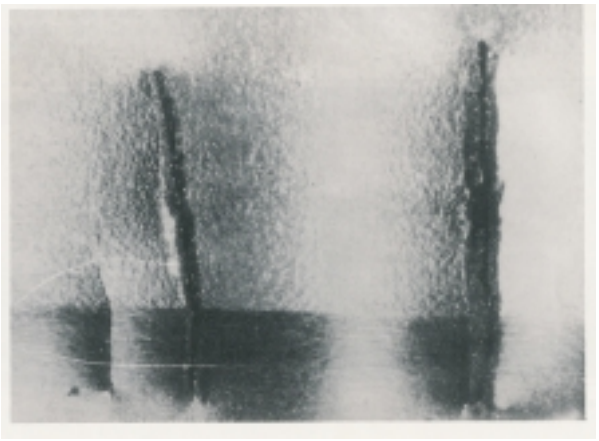


Fig. 1 Axial PWSCC cracks in R16C35 tube.

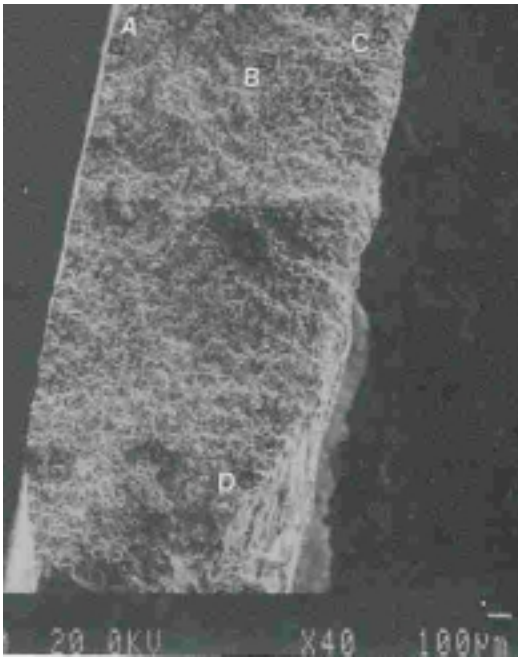


Fig. 2 EDS analysis locations on axial PWSCC fracture surface.

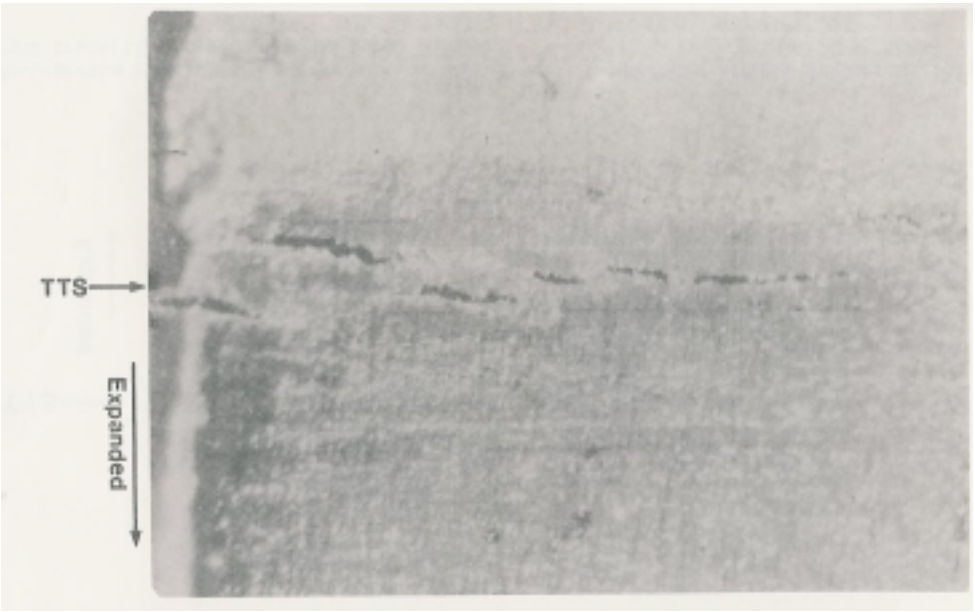
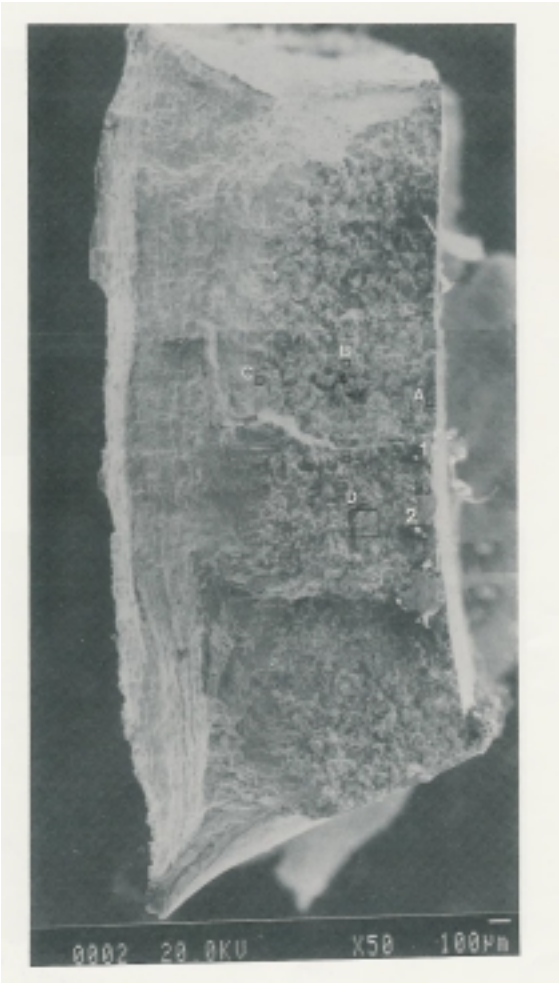
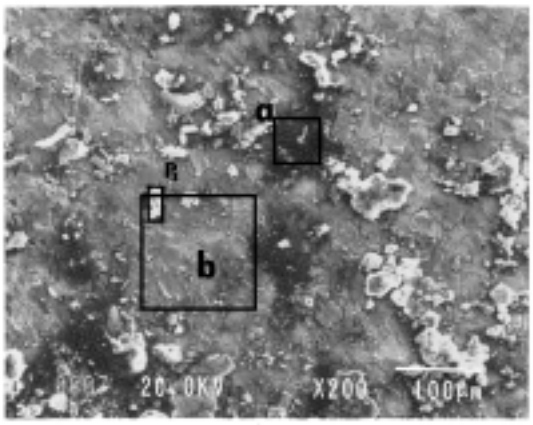


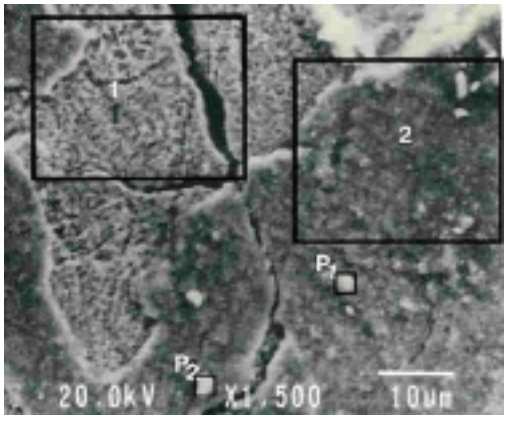
Fig. 3 Circumferential PWSCC cracks in R11C45 tube



(a)

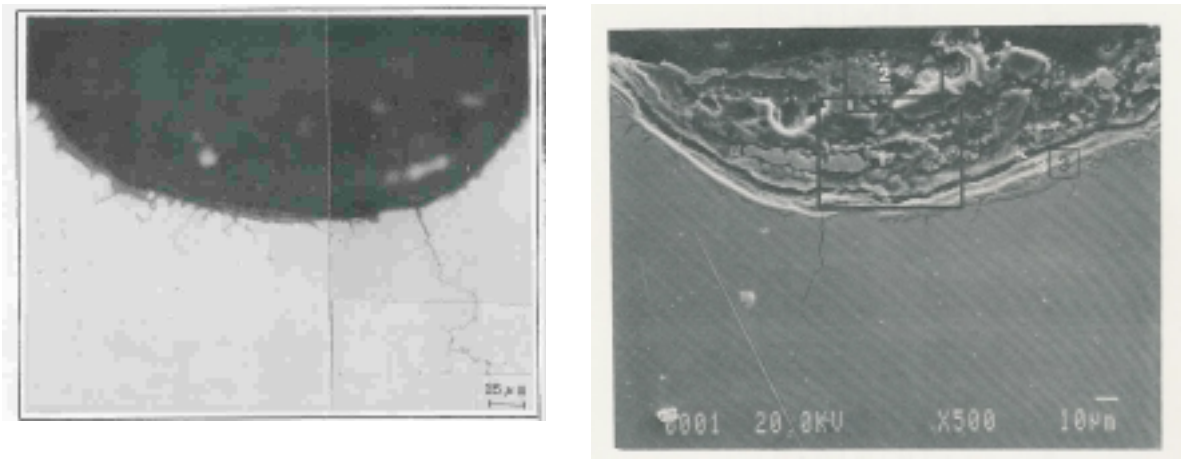


(b)



(c)

Fig. 4 EDS analysis locations: (a), fracture surface; (b) and ((c), inner surface.



(a) (b)

Fig. 5 ODSCC cracks at pit root(a) and EDS analysis location(b).

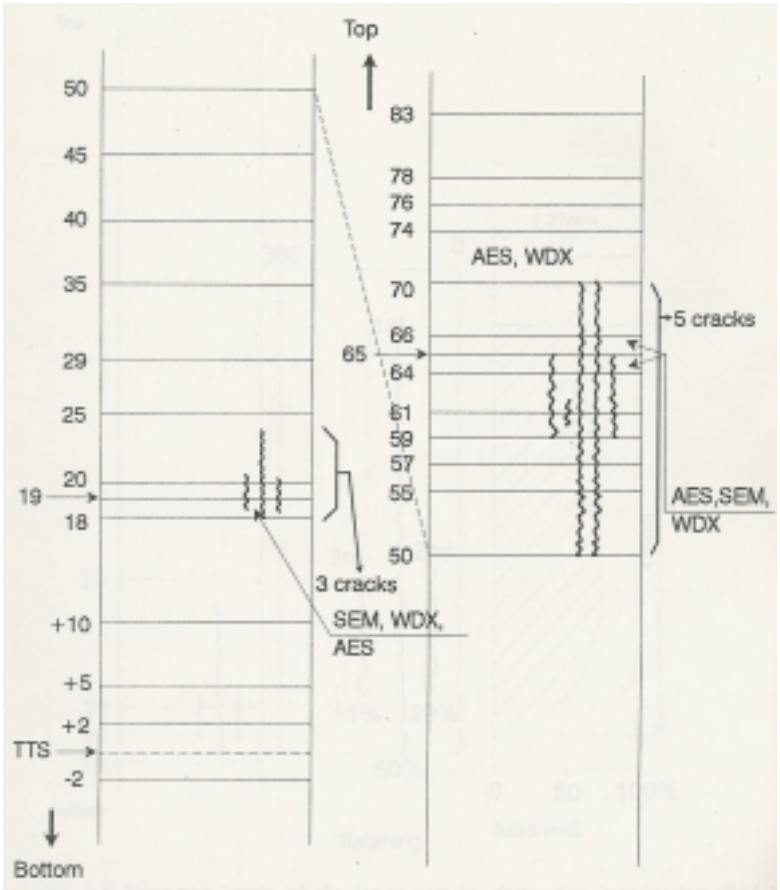


Fig. 6 Schematic drawing of axial ODSCC cracks in R27C34 tube.

Table 1 EDS Analyses of the Fracture Surfaces (A, B, C and D) of Fig.1(b) and Inner surface and outer surface(wt.%) in R16C35 tube.

Elements	Ni	Cr	Fe	Si	Ti	Al	Mn	Ca	Zr	Cu	Mg	S	Cl	Pb
Area A	68.5	14.6	9.3	0.9	0.2	2.0	0.4	*	-	0.2	3.8	0.1	-	-
Area B	70.3	14.5	7.6	0.5	0.2	1.4	0.4	*	0.2	0.4	3.4	-	0.2	0.9
Area C	70.0	14.0	6.9	0.6	0.2	1.3	0.5	3.6	-	-	2.9	-	-	-
Area D	71.0	14.0	7.2	0.9	0.4	2.5	0.5	-	-	0.2	3.3	-	-	-
Inner surf.	64.1	14.7	13.1	1.4	0.2	1.9	0.2	0.1	0.3	0.4	3.5	0.1	-	-
Outer surt.	68.8	15.14	7.81	1.2	0.3	2.0	0.3	0.1	-	0.3	3.6	0.2	0.1	0.3

Table 2 EDS Analyses of the Fracture Surfaces (Area A, B, C D and E and Point 1and 2 of Fig. 2(b)) and Inner surface(Area 1 and 2 and Point P1 and P2 of Fig 3(a) and area a and Point P3 of Fig. 3(b) and outer surface in R11C45 tube (wt.%).

Elements	Ni	Cr	Fe	Si	Ti	Al	Mn	Ca	Zr	Co	Cu	Mg	Zn	S	Cl	K	Mo	Pb	Na
Area A	26.2	12.4	16.2	13.5	0.5	2.4	0.3	1.4	4.8	-	6.3	1.8	4.1	7.8	-	-	-	-	1.7
Area B	70.9	16	11.1	0.6	0.1	0.2	0.3	0.1	0.4	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Area C	75.0	15.5	8.1	0.7	0.1	0.1	0.4	0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Area D	75.9	15	7.6	0.5	0.2	0.1	0.4	0.1	0.1	0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Area E	73.2	16.4	8.9	0.7	0.2	0.1	0.4	0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Point 1	15.1	6.3	10.1	19.7	-	14	-	1.1	-	0.3	1.8	11	1.4	4.3	2.5	1.0	8.5	2.2	-
Point 2	30.6	10.2	13.3	9.6	0.3	11	0.4	2.8	-	-	2.4	1.7	2.4	4.7	1.7	0.7	6.9	-	1.2
Point 3	26.6	15.8	4.9	17.3	0.4	2.0	4.1	0.6	0.6	-	11	4.2	3.4	1.9	0.3	0.1	-	6.8	-
Area 1	72.3	15.9	9.6	0.7	0.2	-	0.2	0.3	0.4	0.1	0.3	-	-	-	-	-	-	-	-
Area 2	39.6	22.9	26.7	0.9	0.3	0.5	-	0.1	8.3	0.3	-	-	0.3	-	0.1	-	-	-	-
Point P1	38.7	16.1	17.4	16	0.3	0.6	0.5	0.2	7.4	-	-	1.5	1.2	-	0.1	-	-	-	-
Point P2	33.1	24.7	31.1	1.5	0.1	0.2	0.1	0.3	8.3	0.2	-	-	0.4	-	-	-	-	-	-
Area A	15.1	8.0	15.5	27.9	0.2	6.8	1.7	0.6	-	-	14.9	4.9	0.3	1.6	0.2	-	-	2.3	-
Area B	38.6	15.0	6.7	12.6	0.2	2.4	0.6	0.3	-	-	17.4	2.3	0.2	2.0	0.8	-	-	0.9	-
Area C	39.5	24.6	8.9	6.0	0.2	1.7	1.0	0.5	-	-	10.5	1.2	0.2	1.9	1.2	-	-	2.6	-

Table 20 EDS Analyses of of the deposit in a pit(Area 1, 2 and 3) and outer surface

Elements	Ni	Cr	Fe	Si	Ti	Al	Mn	Ca	Cu	Mg	Zn	S	Cl	Pb	Ba	K
Area 1	13.6	1.1	8.3	38.3	0.3	*	1.0	1.9	19.4	2.7	1.8	0.8	-	2.3	8.2	0.3
Area 2	6.8	0.3	7.0	35.5	1.1	12	0.7	1.2	3.9	1.3	1.0	2.3	0.2	3.5	23.	0.4
Area 3	49.8	11.2	6.0	9.3	0.2	3.6	0.7	0.2	12.8	1.6	0.7	0.7	-	2.5	0.7	-
Outer Surf.1	8.5	1.7	6.3	57.6	-	5.5	0.5	1.2	15.1	1.9	-	0.6	0.1	-	1.0	-
Outer Surf.2	18.5	3.7	14.1	22.8	0.2	6.8	1.2	0.6	24.8	3.4	0.3	1.0	0.2	1.6	0.3	0.2
Outer Surf.3	34.5	9.2	12.6	20.4	0.1	7.0	1.0	0.7	9.2	2.7	0.2	1.3	-	0.8	-	0.1