

2002추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

고리1호기 구증기발생기 전열관 pitting 분석 Pitting Evaluation on Alloy 600 tubings of Kori 1 Retired Steam Generator

김홍표, 김동진, 황성식, 임연수, 김정수, 김우철, 최명식

한국원자력연구소

대전시 유성구 덕진동 150

요약

고리1호기 구증기발생기 전열관에서의 pitting을 인출전열관 분석자료와 ISI기간중 수행한 ECT검사 결과 및 보수 전열관의 관점에서 분석하였다. 전열관의 pitting은 전열관이 sludge file로 덮여 있는 부분에서 진행되었다. Pit내부는 부식생성물로 채워져 있었으며, 부식생성물은 퇴적된 흔적을 보였다. 부식생성물이 퇴적된 흔적을 보인 것은 재기동시 2차 계통수에 용존산소가 많아서 이때 동합금이 부식되고, 부식생성물이 2차 계통을 통하여 증기발생기에 유입이 되고, 가동시간이 증가함에 따라 용존산소가 감소되면서 환원성 분위기로 바뀌면서 동이온이 동금속으로 환원되면서 발생한 것으로 생각된다. Pitting은 해수의 유입(Cl이온), 용존산소, Cu이온등에 의해 산성의 산화성 분위기에서 진행된 것으로 판단된다. Pitting은 복수기와 preheater의 교체, 화학세정과 수처리의 개선에 의해 1990년 이후 뚜렷하게 감소하였다.

Abstract

Pitting on Alloy 600 in Kori 1 retired steam generator has been evaluated using results obtained from pulled out tube and repaired tube due to pitting with EFPD. Pitting occurred exclusively at crevice between tube and sludge. Pit was filled with corrosion product. The corrosion product was seemed to be a sediment which proceeded following process. At start up, Cu base alloys dissolve due to high dissolved oxygen concentration and then dissolved copper ion or particulate moves through secondary circuit to steam generator. Dissolved oxygen concentration decreases with operating time, so copper ion is reduced. around pit and then corrosion product was formed inside a pit due to metal dissolution. By repeating the two processes, sediment in pit was formed. Pitting seemed to be caused by influx of sea water through condenser tube, high oxygen concentration, copper ion and sulfur

compound detached from resin. Pitting was mitigated by replacement of condenser and preheater material, chemical cleaning and advancement in water chemistry treatment.

1. 서론

고리1호기는 1978년 상업운전을 시작한 한국 최초의 원전으로 복수기에서 해수 유입이 여러 차례 있었다. 또한 2차 계통 preheater로 Cu계 합금을 사용하였으며, 복수기 전열관 재료로 CuproNickel을 사용하였다. 이와 더불어 2차 계통냉각수의 용존 산소를 초창기에 정밀하게 조절하지 못하였다. 이런 이유에 의해 구증기발생기 cold leg에 있는 전열관에 많은 pitting이 발생하였다. 이런 pitting을 억제하고 나아가 방지하기 위해 sludge lancing과 화학세정을 통하여 soft sludge 및 hard sludge를 제거하였다.

본 연구에서는 고리1호기 구증기발생기 인출전열관에서 pitting평가, pitting의 연도별 추이와 pitting과 복수기 교체, 수처리 및 화학세정이 어떤 연관 관계가 있는지를 비파괴 검사자료와 전열관 인출검사 자료를 통하여 분석하였다.

2. 본론

2.1 비파괴검사(ECT검사와 육안검사비교)

ECT검사는 Bobbin probe와 8x1 probe를 검사하였다. 전열관에 8x1 probe가 삽입되지 않은 경우 Bobbin probe로만 검사하였다. Bobbin probe와 8x1 probe로는 pit의 높이는 알 수 있지만 radial방향으로의 위치는 알 수 없어 육안검사 결과를 기준으로 radial 방향을 표시하였다. Bobbin probe는 위상각으로 결함의 깊이를 평가하고, voltage로 체적결함을 평가한다. 대체적으로 비파괴 검사와 육안검사결과는 결함의 위치 측면에서 일치하였다. 다만 결함의 깊이에 관한 비교는 할 수 없었다. 현장 ECT와 실험실ECT를 비교한 것을 Table 1에 나타냈다. 전반적으로 큰 pit에 대해서는 현장ECT와 실험실 ECT결과는 일치하나, 결함깊이와 voltage는 조금씩 차이가 있다. 그리고 작은 pit에 대해서는 현장 ECT에서 검출되지 않은 것이 실험실 ECT에서 검출된 pit가 있다. 이것은 현장ECT에서는 전열관 표면에 deposit와 sludge등이 많이 있는 반면에 인출전열관에서는 이런 것들이 많이 제거되었기 때문이다. 또한 ECT평가자가 작은 pit에 대해 정밀평가를 하지 않은 것도 한 원인이 될 수 있다. 전열관에서 pit의 위치를 Fig. 1에 나타냈다.

2.2. Pit 관찰

Pit의 단면을 SEM으로 관찰하였다. 여기서는 관찰한 여러개의 pit중 대표적인 것의 결과만 기술하였다. pit내부의 부식생성물은 마치 퇴적물이 누적될 때 관찰되는 층상구조를 보인다. 층상구조가 잘 발달된 것과 덜 발달된 것이 있는 데, 이것은 층상구조를 이루는 부식생성물이 무엇이나에 기인하는 것으로 보인다.

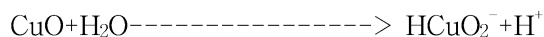
2.3. Pit분석

Pit의 내부 부식생성물을 EDX dot 분석을 하였다. Pit내부의 부식생성물중 밝게 보이는 띠형태의 부분은 금속동(Cu)이 대부분이며 일부 산화동(Cu₂O)이 관찰되었다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 Pit내부의 부식생성물을 구성하는 원소중 관심을 가져야 할 것이 Ni, Cr, Fe의 상대적 비율이다. 모재 금속인 Alloy 600에 비해 pitso부에는 Ni가 고갈되었고, Cr이 농축되었다는 점이다. 이것은 고전적으로 인용되는 pit내부의 pH가 산성인 것을 의미한다. 즉 pitting이 산성 분위기에서 진행된 것을 의미한다. 또한 주목해야 할 것은 pit내부에 Cu와 S등이 다량 존재한다는 것이다. Cu는 복수 기재료와 preheater재료의 부식이나 erosion에 의해 증기발생기쪽으로 유입된 것으로 판단된다. S의 공급원은 해수, 이온교환수지와 고무가스켓등의 유기물질의 분해생성물이 될 수 있는데, 이온교환수지에 파쇄된 미세 이온교환 수지가 탈염기에 존재한다는 것으로부터 S의 주공급원은 파쇄 이온교환수지일 것으로 예상된다.

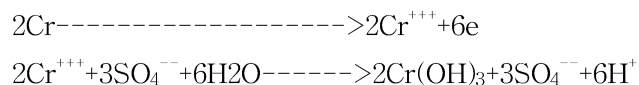
2.4. Pitting기구

Pit가 진행된 전열관 표면은 상당히 많은 부식이 진행된 것을 보여준다. Alloy 600의 일반부식에 대한 저항성이 큰 것을 감안하면 이것은 pit주변이 상당히 가혹한 부식성 분위기를 형성하였다는 것을 의미한다. 가혹한 부식분위기는 빈번한 해수 유입(Cl이온), 용존산소가 가동 초기에 많았던 것, Cu가 부식되면서 유입되어 TS에 퇴적된 것, 황화합물이 다수 존재하는 것과 관련된다.

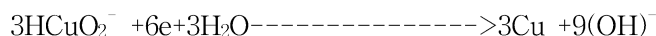
산소는 동합금과 철 등과 반응하여 산화물이나 complex를 형성한다.



산화물이나 오염물질이 이온이나 입자로 2차계통을 통하여 증기발생기로 유입된다. 비등에 의해 이런 것들이 전열관과 sludge계면에 농축된다. 오염물질과 전열관 재료사이의 반응에 의해 산성 분위기를 형성한다. 즉



의 반응과 부식전위를 높여주는 Cu의 환원반응에 기인한다. 즉



이때 Cl이온은 부식피막을 불안전하게 만들어 pitting이 촉진되게 한다.

부식생성물이 퇴적된 흔적을 보인 것은 재기동시 2차 계통수에 용존산소가 많아서 이때 동합금이 부식되고, 부식생성물이 2차 계통을 통하여 증기발생기에 유입이 되고, 가동시간이 증가함에 따라 용존산소가 감소되면서 환원성 분위기로 바뀌면서 동이온이 동금속으로 환원되면서 발생한 것으로 생각된다.

2.5. Pitting 추세

Fig.1에 EFPD별 pitting에 의한 보수 전열관 수를, Fig.2에 pitting에 의한 보수 전열관 누적수를 나타냈다. 1985년 6차 ISI때 419개의 전열관을 pitting 때문에 보수하였고, 그 이후 8차 ISI까지 pitting에 의한 전열관의 보수는 감소하였다. 6차부터 8차 ISI까지 pitting에 의한 전열관의 보수량이 감소한 것은 1985년 대대적으로 보수한 것에 기인하는 것으로 보인다. 1985년 pitting에 의한 전열관 손상을 억제하기 위해 동합금 전열관을 각는 condenser를 Ti전열관 복수기로 대체하였다. 이로 해수 유입이 거의 중단되었다. 그럼에도 불구하고 9차와 10차 ISI에서 pitting에 의한 전열관 보수가 증가했는데, 이것은 이미 증기발생기 sludge내에 있는 Cl이온과 Cu등에 기인하는 것으로 보인다. 10차 ISI중 화학세정을 수행하였고, 화학세정 이후 pitting에 의한 전열관 보수가 괄목할만하게 감소하였는데, 이것은 화학세정으로 soft sludge뿐만 아니라 hard sludge가 제거된 것에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 보수기 교체, preheater교체, 화학세정, 2차계통 수처리의 개선을 통해 pitting에 의한 전열관 손상은 크게 억제된 것을 볼 수 있다.

3. 결론

전열관의 pitting은 전열관이 sludge file로 덮여 있는 부분에서 진행되었다. Pit내부는 부식생성물로 채워져 있었으며, 부식생성물은 퇴적된 흔적을 보였다. 부식생성물이 퇴적된 흔적을 보인 것은 재기동시 2차 계통수에 용존산소가 많아서 이때 동합금이 부식되고, 부식생성물이 2차 계통을 통하여 증기발생기에 유입이 되고, 가동시간이 증가함에 따라 용존산소가 감소되면서 환원성 분위기로 바뀌면서 동이온이 동금속으로 환원되면서 발생한 것으로 생각된다. Pitting은 해수의 유입(Cl이온), 용존산소, Cu이온등에 의해 산성의 산화성 분위기에서 진행된 것으로 판단된다. Pitting은 복수기와 preheater의 교체, 화학세정과 수처리의 개선에 의해 1990년 이후 뚜렷하게 감소하였다.

Table 1 Pits on pulled out tubes from Kori 1 retired S/G

Pulled out year	Pulled out location	Defect number		Defect length(mm)		Defect depth (% of thickness)	
		Field ECT	Destruc	Field ECT	Destruc	Field ECT	Destruc
1988	A/CL/R25C48	2				37 64	(*)
	A/CL/R26C38	2				37 64	(*)
	B/CL/R28C53	3				83 71 83	(*)
	B/HL/R36C45	1				94	(*)
1992	B/HL/R25C29	Muti	Multi			44(max)	40(max) (****)

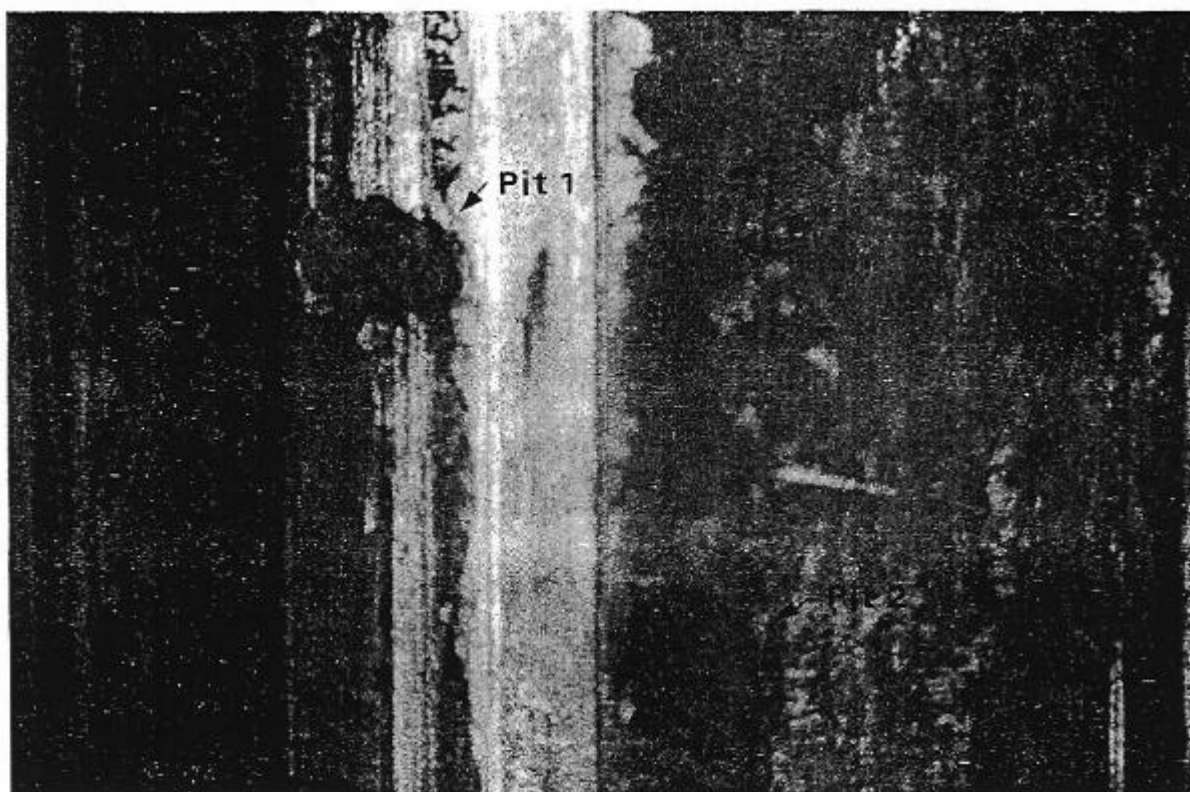


Fig.1 Pit on pulled out tube

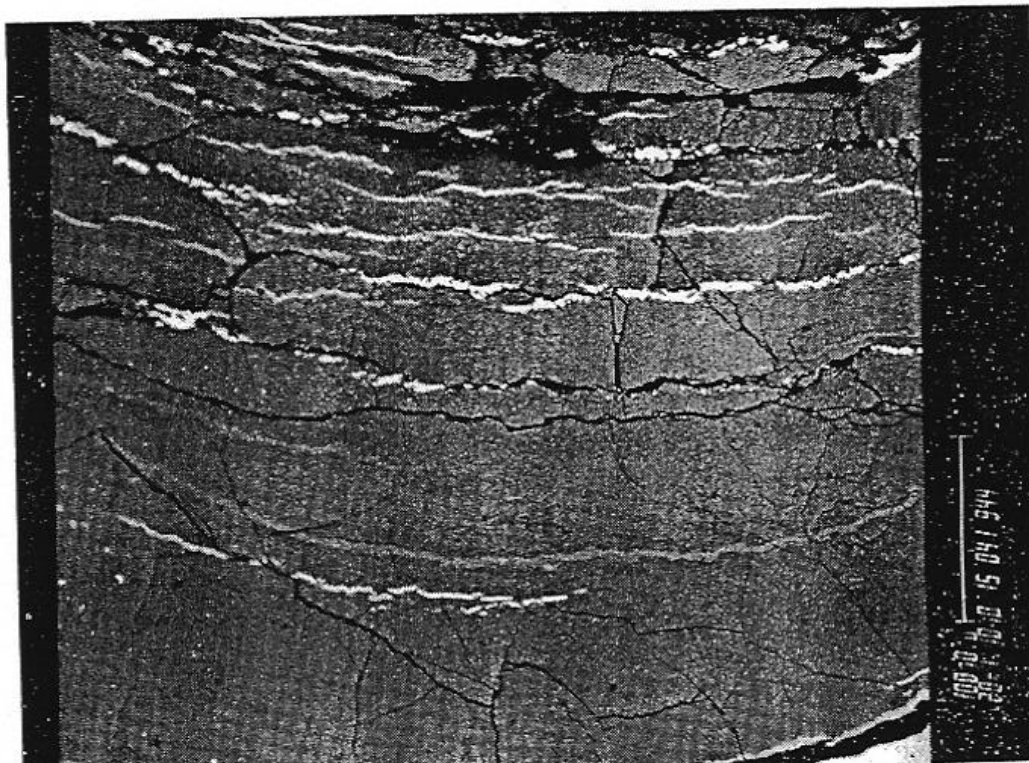
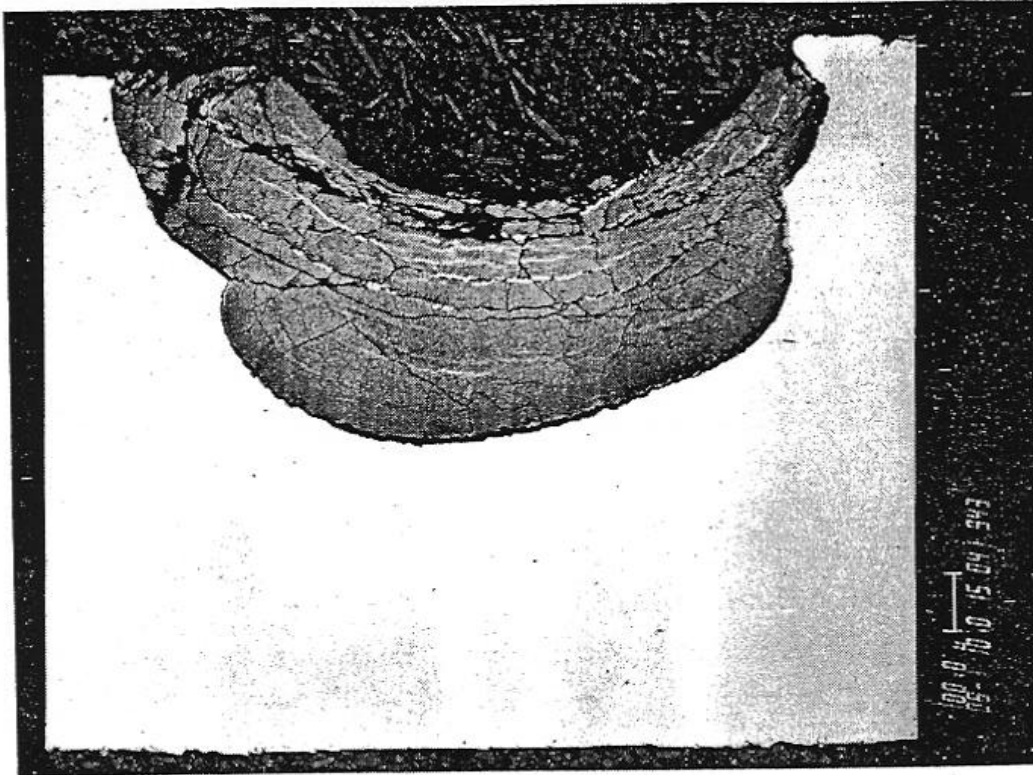


Fig.2 Cross section of pit

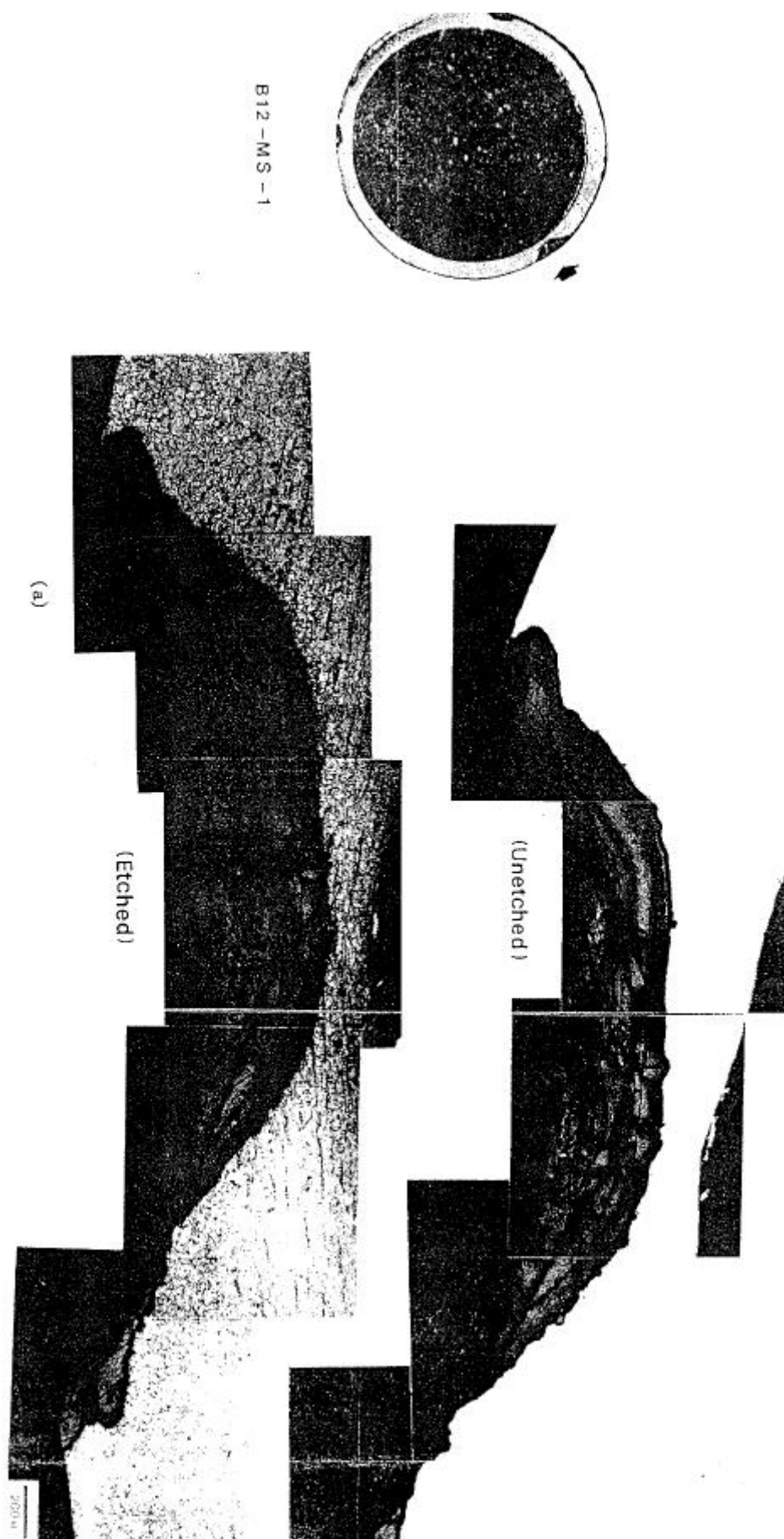


Fig.3 Cross section of pit on pulled out tube

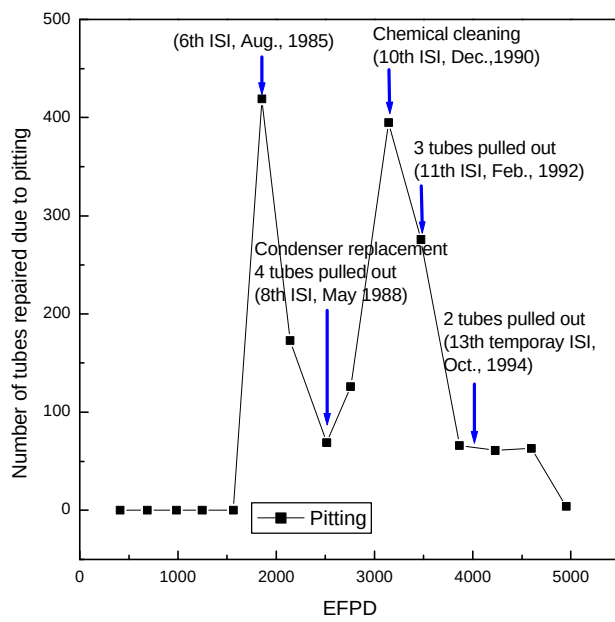


Fig. 4 Number of tubes repaired with EFPD

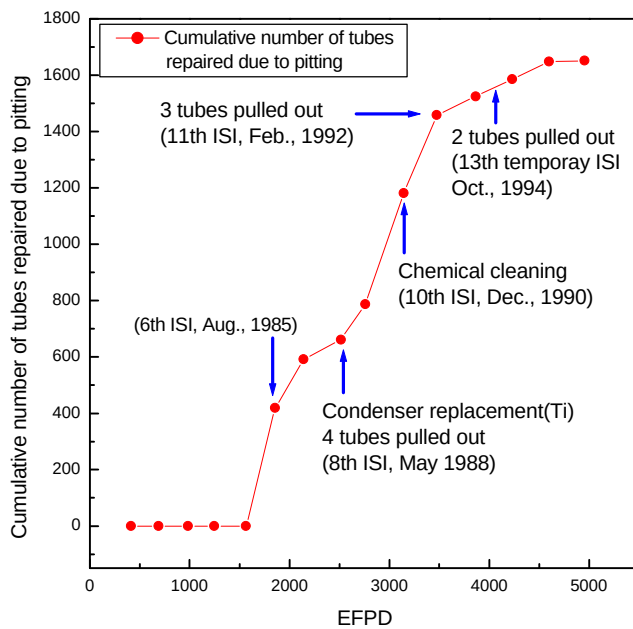


Fig.5 Cumulative number of tubes repaired with EFPD