'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

신형 핵연료피복관용 K-series 신합금의 노외성능 평가

Evaluation of Out-of-pile Performance of K-series New Alloys for Advanced Fuel Cladding

정용환, 백종혁, 김경호, 박상윤, 이명호, 남철, 최병권, 정연호

한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

고연소도용 Zr 신합금을 개발하기 위해서 합금설계, 합금 용해기술 개발, 판재시편제조기술 개발, 노외성능 평가등의 연구를 수행하였다. 부식성능은 360℃ 물분위기, 400℃ 수증기 분위기, LiOH 분위기에서 최대 700일까지 시험하여 평가하였으며, 인장시험, 크립시험 및 석출물 특성 분석시험은 내식성이 우수한 일부합금들에 대해서 수행되었다. 150여종의 예비합금을 설계/제조한후 screening test를 거쳐서 내식성이 Zircaloy-4보다 우수한 10여종의 신합금을 선정하였다. 이중 Nb가 첨가된 일부합금(K1, K2)은 외국에서 개발한 Z합금보다 내식성이 우수한 것으로 나타났다. 특히 K합금은 원자로 분위기인 LiOH 조건에서 내식성이 우수한 것으로 관찰 되었다. 이들 합금의 우수한 내식성은 기지조직내에 함유된 Nb의 농도와 beta Nb에 의해서 제어되는 것으로 밝혀졌다.

Abstract

To develop the advanced zirconium alloys for high burn-up fuel cladding, alloy design, manufacturing process optimization, and performance evaluation were performed for the various zirconium alloys. The corrosion tests were carried out in 3 conditions of 360C water, 400C steam, and LiOH solution for 700 days. Tensile test, creep test, and microstructure characterization were also performed for the high corrosion resistant alloys. From the evaluation of corrosion characteristics on the 150 kinds of alloys, 10 alloys which have superior corrosion resistance to Zircaloy-4 were selected as candidate new alloys for advanced fuel cladding tube. K1 and K2 alloys among the 10 candidate alloys showed higher corrosion resistance than Z alloy which was developed in foreign country. It is suggested that the high corrosion resistance of Nb-containing K-series alloys would be controlled by Nb concentration in the matrix and beta Nb.

1. 서 론

Zr합금은 중성자 흡수성, 내식성 및 우수한 기계적 특성 때문에 핵연료 피복관 재료로 사용되어 오고 있다. 서구권의 PWR 발전소에서는 '60년대에 개발된 Zircaloy-4 합금이 수십 년동안 사용되어 왔으며, BWR 발전소에서는 Zircaloy-2 합금이 사용되어 오고 있다. 반면에 동구권에서는 Zircaloy와는 조성이 완전히 다른 Zr-1Nb 합금이 피복관 재료로 사용되어 왔다. 그러나 핵연료의 연소도가 점차 증가함에 따라서 피복관 재료의 내식성은 피복관의 수명을 제한하는 중요한 요소로 작용하게 되었다. 그림 1은 고연소도에서 Zircaloy 피복관의 산화막 두께가 증가하는 현상을 보여준다. 동일한 재료를 가지고 Autoclave 시험과 노내시험한 결과를 비교 해 보면 산화막 두께의 증가 경향이 매우 다르다는 것을 볼 수 있다. Autoclave 조건에서는 단순히 고온 고압의 조건이기 때문에 산화막은 시간이 증가함에 따라서 점진적으로 증가하는 경향을 보인다. 그러나 이러한 재료를 노내에서 시험할 경우는 방사선에 의한 가속부식이 일어나기 때문에 산화막이 약 5㎛ 이상부터는 부식이 급격히 증가하는 현상이 발생한다. 더구나 실제 핵연료봉에서는 내부의 핵연료로부터 외부의 Coolant 쪽으로 열유속이 있기 때문에 이런 가속부식은 더욱 심각해진다. 이와 같이 산화막의 두께가 두꺼워 지면 핵연료 피복관의 건전성을 유지할 수 없을 뿐 아니라 열전도도는 급격이 저하하게 된다. 따라서 부식은 핵연료 피복관에서 가장 중요한 문제점으로 대두되고 있다. 이를 극복하기 위한 방법으로 1980년도부터 Zircaloy의 성질을 개량하려는 연구가 활발히 진행되어 Low Sn Zircaloy-4 나 PCA 등을 개발할 수 있었으며 현재 대부분의 국내외의 원자로에는 Low Sn Zircaloy-4가 사용되고 있다[1-3]. 그러나 Low Sn Zircaloy-4로는 연소도를 증가시키는데 한계가 있기 때문에 새로운 조성을 갖는 신형 피복관이 개발되게 되었다. 미국의 Westinghouse 에서는 Zirlo합금을 계발하여 노내에서 시험을 마친후 현재 상용로에 공급하고 있으며[4-6] 국내 원전에서도 Zirlo피복관 사용을 계획하고 있다. 프랑스의 Framatone사에서는 기존에 러시아에서 사용되던 Zr-1Nb합금에 S를 미량 첨가하고 열처리 조건을 최적화한 M5합금을 개발하여 노내 조사시험 중이며 Sumitomo에서는 NDA합금을 그리고 Mitsubishi사에서는 MDA합금을 개발하여[7] 연구로내 시험중이다. 한편 러시아에서는 E635 합금을 계발하여 노내시험을 마친후 러시아원자로의 핵연료 피복관으로 사용을 계획하고 있다. 그러나 국내에서는 피복관을 전량 수입하고 있는 실정이며 세계각국에서 사용되는 여러 종류의 피복관이 다양하게 공급되고 있는 실정이다. 그동안 Zircaloy-4를 사용할 때에는 누구나 Zircaloy-4 피복관을 생산할 수 없기 때문에 가격경쟁력 면에서 문제가 없었으나 신형 피복관으로 갈 경우 엄청난 Royalty를 지불해야 되는 실정으로 국내의 피복관 공급현황은 변하고 있는 추세이다.

따라서 국내에서도 국제경쟁력을 갖는 신합금 피복관을 개발하기 위하여 중장기 과제로 합금 개발에 관한 연구를 추진해 오고 있다. 본 연구에서는 국내에서 개발한 K-series 합금의 노외 성능 평가 결과에 대해서 기술하고 내식성과 Nb과의 관계를 고찰하고자 한다.

2. 실험 방법

신합금을 설계하기 위해서 Zirlo를 비롯한 10여종의 외국 피복관을 확보하여 실험실에서 성능을 평가하였으며 문헌조사를 통해서 외국에서 개발한 개량피복관의 장.단점을 면밀히 분석하였다. 또한 100여종의 국제특허를 정밀분석하여 나중에 특허가 확보된 후에도 분쟁을 막을 수 있는 방안을 수립하였다. 이런 분석결과를 근거로 150여종의 예비합금을 설계하였으며, 설계된 합금을 판재시편으로 제조하기에 앞서서 합금용해 기술을 확립하는 연구

를 수행하여 첨가 원소가 균질하게 분포하는 시험 및 판재 제조공정을 수립하였다. 수립된 제조공정에 의해서 8차에 걸쳐서 약 650개의 잉곳을 제조한 후, β열처리, 열간압연, 냉간압연, 진공열처리 등의 제조공정을 거쳐서 판재시편을 제조하였다. 합금의 용해시 성분원소를 제어하는 것은 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 여러번의 반복 용해 및 분석을 통해서 원하는 조성을 ±10%이내에서 제어할 수 있는 기술을 수립하였다. 또한 시편내에서 성분이 고르게 분포되지 않으면 성능에 악영향을 미치므로 이를 극복하기 위해서 4회 반복용해 방범을 도입하고 button의 크기를 조절하는 방안을 수립하였다. 수 십종의 신합금을 제조할 경우는 주로 소형 button 형태의 잉곳을 제조하지만 이것은 기계적 가공 변수를 변화시키는데 한계가 있다. 따라서 실제 Tube 제조공정을 모사하기 위하여 25kg의 중형 잉곳을 미국의 OWC에 주문 제작하였다. 중형 잉곳에 실제 tube 제조시에 적용되는 압하율과 β-단조 공정을 추가하여 시험용 판재시편을 제조하였다. 이와 같이 중형 잉곳으로 시편을 제작한 결과 소형 잉곳으로 제작시 발생되었던 가장자리 터짐현상은 발생하지 않았으며 최종시편의 표면상태가 매우 양호하고 미세조직도 역시 매우 균일한 조직을 보였다. 제조된 판재시편은 360℃물, 400℃수증기, LiOH조건에서 1차적으로 부식시험을 실시하였으며 내식성이 우수한 일부 합금에 대해서 인장시험, Creep시험, 미세조직 관찰시험 등을 수행하였다. 이러한 일련의 시험을 통해서 1차적으로 후보합금을 선정 하였으며, 이들 합금을 다시 제조하여 제조공정을 최적화 하기 위한 연구를 수행하여 판재시편을 제조한 후 부식성능을 재평가하여 10여종의 2차후보 합금을 선정하였다.

신합금의 성능은 합금원소 뿐 아니라 제조공정에 의해서도 크게 영향을 받기 때문에 신합금의 제조공정 최적화 기술을 개발하는 연구를 아울러 수행하였다. 제조공정관련 연구로서는 A-parameter 영향평가시험, 신합금 재결정 조건평가시험, 합금별 제조공정 최적화 시험, 마지막 열처리공정 최적화 연구등을 수행하여 Nb이 첨가된 신합금의 제조공정을 확립하였다

3. 연구결과 및 고찰

3.1 신합금 개발 연구

1차적으로 약 75종의 합금을 설계한후 이들 합금을 판재시편으로 제조하여 부식시험을 수행하였다. 1차 시도합금은 제조공정이 확립되지 않은 상태에서 만들었기 때문에 우수한 내식성을 갖는 합금을 선정할 수가 없었다. 따라서 2차로 75종의 합금을 재 설계하여 부식특성을 평가하였다. Autoclave를 이용한 부식시험의 경우는 적어도 300일 이상(경우에 따라서는 1,000일 이상) 시험이 되어야 신합금의 내식성을 정확히 판단할 수 있다. 따라서 약 300일 시험결과를 분석하여 내식성이 우수한 일부합금은 계속해서 부식시험을 실시하는 반면에 3차 합금을 설계하여 성능을 평가하는 방법으로 연구를 수행하였다. 이와 같이 합금설계/제조/평가 방법을 반복하여 Screening Test를 실시하여 현재 10여종의 2차 후보합금을 선정하는 단계에 도달하였다.

제조공정에 있어서도 초기에는 동일공정을 도입하였는데 여러 가지 연구를 통해서 얻은 결과를 바탕으로 나중에는 합금조성에 따라서 열처리조건이 다른 공정을 도입하여 시편을 제조하였다.

예비합금의 부식특성을 평가하기 위해서 ASTM 기준에 따라서 360°C water와 400°C steam 분위기에서 내식성을 평가하였으며, 원전내에서 내식성을 평가하는 기준인 LiOH조건에서도 동시에 부식시험을 수행하였다. 1, 2, 3차 시험에서 우수한 내식성을 보였던 일부 합금들

은 4차, 5차에서 다시 제조하여 부식성능을 정확히 재평가하고자 하였다. 그 결과 처음에 우수한 내식성을 보였던 합금들은 계속해서 우수한 부식특성을 나타냈다. 이와 같은 방법으로 총 8회에 걸쳐서 약 650종의 시편을 제조하여 세조건에서 시험을 실시하였다. 또한 부식저항성을 보다 향상시키기 위하여 첨가되는 합금성분에 따라 제조공정(열처리 조건)을 조금씩 변화시켜 최적의 조건을 찾으려고 시도하였다.

본 연구에서 개발한 신합금들의 내식성을 외국에서 개발한 Z피복관과 비교하여 평가함으로서 신합금의 개발방향과 가능성을 파악할 수 있었으며, 일부 합금들은 Z보다 우수한 노외부식특성을 나타냈다. 그러므로 이들 합금의 제조공정을 보다 최적화 한다면 성능을 월등히 향상시킬 수 있을 것으로 판단되었다. 내식성이 우수한 합금들 중에서 기존의 특허 범위를 피할 수 있는 20종의 신합금을 1차적으로 선정하였는데 이들 결과를 그림 2에 보여준다. 선정된 모든 합금들은 Zircaloy-4보다 내식성이 40%이상 향상된 것을 볼 수 있다. 이들 합금에 대해서 집중적으로 연구를 수행하여 2차 후보합금 10종을 선정할 수 있었다. 그림 3은 10종의 2차후보합금의 내식성을 Z합금과 비교하여 평가한 결과인데 Z합금에 비해 내식성이 30%이상 향상됨을 알 수 있다. 이중에서 대표적으로 K1합금의 내식성을 Z합금과 비교하여 나타내면 그림 4와 같다. 일반적으로 Z합금은 LiOH 분위기에서 내식성이 우수한 것으로 알려져 있는데, K1합금은 Z합금보다 LiOH에서 내식성이 월등히 우수한 것을 확인하였다. 또한 360C 물분위기에서도 3차에 걸친 반복시험 결과 그림 5에서 보는바와 같이 K1합금은 Z합금보다 내식성이 우수함을 알 수 있다.

1차적으로 부식시험을 실시하여 내식성이 우수하다고 평가된 합금들(Batch당 약20여종)에 대해서만 상온과 고온에서 인장시험을 실시하였다. K-series 합금의 기계적특성을 평가한 결과를 그림 6에 보여주는데, 모든 합금이 Spec.보다 우수한 강도를 나타내는 것을 볼 수 있다 그러나 기계적 특성은 시편의 제조공정에 따라서 크게 달라질 수 있으므로 피복관 제조시에 열처리 공정을 충분히 제어하여 최적의 강도를 유지할수 있는 조건을 수립해야 할 것이다. 크리프 시험의 특성상 긴 시험시간을 요구하기 때문에 시험편의 선정은 기 수행된 부식시험 결과와 상.고온 인장실험 결과를 중심으로 그 중에 부식이 우수하면서도 강도 및 연신률이 우수한 합금을 batch당 약 20여종씩 선정하였다. K-series 합금의 Creep 저항성은 Zircaloy-보다 우수한 것으로 나타냈다.

합금원소 관점에서 상. 고온 인장 시험에서의 결과와 마찬가지로 꼭 일치하지는 않지만 다원계(4원계 이상)로 구성된 합금에서 크리프 저항성이 우수함을 알 수 있었다. 그리고 그림 7에서 보는바와 같이 Sn은 Creep 저항성을 향상시키는데 Nb보다 월등히 효과가 있는 것으로 나타났다. 따라서 Creep 정항성을 향상시키려면 반드시 Sn이 어느정도 첨가되어야 한다. 그러나 Sn이 많이 첨가될 경우에 내식성이 저하되기 때문에 부식과 Creep을 동시에 고려하여 약0.8-1.2% 정도에서 첨가하는 것이 바람직하다고 판단된다.

각 batch에 대하여 제조공정 단계 별로 광학현미경을 이용하여 미세조직을 관찰하였으며, 특히 관심을 두는 합금에 대해서는 그림 8에서 보는바와 같이 전자현미경(TEM) 분석을 통해서 석출물의 조성이나 크기등을 면밀히 관찰하여, 부식특성에 미치는 미세조직의 영향을 분석하는데 활용하였다.

3.2 신합금 제조공정 최적화 기술 개발

본연구의 주관심 대상인 Nb첨가 합금의 열처리 변수와 부식특성과의 상호관계를 정확히 분석하여 시제품 피복관 제조시 이들 결과를 활용하기 위하여 Nb의 첨가량 및 열처리변

수가 부식저항성에 미치는 영향을 조사하였다. 일반적으로 Zircaloy-4에서는 열처리변수가 (A-parameter)가 증가함에 따라 내식성이 증가하는 것으로 알려져 있으나 Nb첨가 합금에서는 ΣA값이 적을수록 내식성이 증가하는 결과를 나타냈다. 따라서 피복관 제조시 가능한 한 낮은 온도에서 열처리를 실시하여 내식성을 향상시킬 예정이다. Nb의 첨가량이 적은 합금(Zr-0.8Sn-0.1Nb와 Zr-0.8Sn-0.2Nb)의 부식저항성은 열처리변수에 매우 민감하였다. Zr-0.8Sn-0.4Nb와 Zr-0.8Sn-0.8Nb 합금을 동일한 열처리변수를 갖도록 조건을 역으로 열처리하였을 때 열처리변수가 부식에 미치는 영향은 정상조건으로 열처리하였을 때와 동일한 경향을 나타냈다.

신합금 개발시 각 제조공정에서 열처리 조건은 재료의 모든 성능을 좌우하기 때문에 매우 중요하다. 이러한 열처리조건을 확립하기 위해서는 재료가 갖고 있는 재결정 특성을 파악하기 위한 연구를 반드시 수행해야 한다. 본 연구에서는 Zr합금의 재결정에 미치는 Sn영향을 조사하기 위해서 Zr-xSn 및 Zr-0.8Sn-X(V,Sb)합금을 판재로 제조하여 열처리 온도에 따른 Zr합금의 경도, 미세조직 및 석출물 특성을 미소경도계, 광학 현미경 및 투과 전자 현미경을 이용하여 조사하였다. 냉간가공된 Zr-xSn 합금은 회복, 재결정, 결정립 성장을 보이는 전형적인 재결정 거동을 나타내었다. Sn량이 증가함에 따라서 재결정온도는 증가하였으며 재결정의 결정립 크기는 감소하였다. 냉간가공재의 재결정은 500℃내지 700℃에서 완료되었으며 경도 변화는 미세조직 변화와 잘 일치하는 경향을 보였다.

신합금이 실제로 상용화되기 위해서는 내식성이나 기계적 성질을 최대한 향상시키도록 최적의 제조 공정이 확립되어야 하며, 특히 합금의 열처리에 따른 상변태 특성을 파악하는 것이 선행되어야하므로 Zr 신합금의 합금조성과 열처리의 변화에 따른 미세조직의 변화와 그로 인한 부식특성을 연구하였다. 본 연구에서는 Zr-1Nb-0.2Cu, Zr-1Nb-1Sn-0.3Fe-0.1Cu 및 Zr-0.2Nb-1.4Sn-0.4Fe-0.2Cu 합금을 두 가지 다른 제조공정을 통하여 판재시편을 제조하였으며, 마지막 열처리를 480, 580°C 두 온도에서 30분부터 500시간까지 수행하였다. 열처리가 완료된 시편은 400°C 수증기 분위기 하에서 Autoclave 부식시험, 미소경도시험 및 미세조직을 관찰하였다. 그림 9는 여러 가지 공정에 의해서 제조된 시편의 부식시험 결과를 보여준다. 부식시험 결과에 의하면 세가지 합금 모두 beta-열처리와 냉간가공을 연이어 수행하고 마지막 열처리를 수행한 것이 beta-열처리 후에 바로 마지막 열처리를 수행하는 것 보다 우수하였다. Zr-1Nb-0.2Cu 합금의 경우 480°C에서 장시간(50-200시간) 열처리한 시편이 580°C에서 열처리한 시편보다 내식성이 우수하였으며 이는 비교적 미세한 Nb-함유 석출물의 형성에 기인하였으며, Zr-1Nb-1Sn-0.3Fe-0.1Cu 합금 역시 480°C에서 장시간(50-200시간) 열처리한 시편이 가장 우수한 내식성을 나타내었으며 이는 비교적 미세한 Zr-Nb-Fe type 석출물의 분포에 의한 것으로 생각되었다.

신합금의 내식성과 기계적 특성은 열처리에 매우 민감하고 특히 마지막 열처리공정에 따라 큰 차이가 나타난다. 본 연구에서는 후보합금의 마지막 열처리조건을 460 530℃까지 10℃ 간격으로 미세하게 변화시켜 360℃ 물, 400℃ 수증기 및 360℃ 70ppm LiOH 분위기에서 부식 특성을 평가하였고, 고온에서 인장실험을 실시하는 방법으로 최종 열처리조건이 신합금 성능에 미치는 영향을 조사하였다. 세 가지 조건에서 210일 부식시험 한 결과 후보합금의 부식거동은 아직 큰 차이를 나타내지 않았으나 열처리 온도가 높은 합금에서 내식성이 향상되는 경향을 보였다. 한편 기계적 특성은 3종의 합금에서 열처리 온도가 상승함에 따라 항복강도 및 최대 인장강도가 감소하였으나 연신률은 그 반대의 형상을 나타내었으며 첨가원소가 가장 많은 합금에서 가장 우수한 기계적 특성을 보여주었다.

그림 10은 마지막 열처리 온도를 달리한 시편에 대해서 크립 시험한 결과를 보여준다. 490C까지는 크립속도가 크게 변하지 않으나 520C 이상으로 열처리를 하면 크립 속도는 급격히 증가하는 경향을 보이는데, 이는 520C 이상에서 재료는 완전 재결정된 조직을 가지며 이러한 미세조직은 크립을 가속하기 때문에 발생하는 것으로 사료된다. 그림 11은 3종의 K-series 합금의 석출물 특성을 보여준다. Nb가 0.2% 첨가될 경우는 석출물에 Nb가 함유되지 않으나 0.4% 이상의 Nb가 첨가될 경우는 석출물에 Nb가 함유된다. 일반적으로 Nb의 고용도는 0.5-0.6%인 것으로 알려져 있는데 본연구 결과에 의하면 다원계 Zr합금에서는 Nb의 고용도가 0.4%이하로 감소할 수 있음을 나타낸다. 그리고 Nb가 첨가된 Zr합금의 내식성은 Matrix내에 첨가된 Nb농도와 Nb이 함유된 석출물에 의해서 제어된다고 사료된다.

3. 결 론

1) K-series 신합금의 내식성은 Z합금에 비해 내식성이 우수한 것으로 나타났다. 특히 K합금은 원자로 분위기인 LiOH 분위기에서 부식저항성이 뛰어난 것으로 관찰 되었다.
2) K-series 신합금의 인장강도는 ASTM Spec.을 훨씬 상회하며 크립 저항성도 우수한 것으로 나타났다.
3) Nb가 0.4%이상으로 첨가될 때는 Nb가 석출물에 함유되는데, 이는 다원계 Zr합금에서 Nb의 고용도가 0.4%이하로 감소함을 의미한다.
4) 마지막 열처리 온도가 520C 이상으로 증가하면 크립 저항성이 급격히 저하되는데, 이는 재료의 미세 조직이 재결정 조직으로 바뀌고 이러한 조직이 크립 저항성을 저하시키기 때문이라 사료된다.

4. 참고 문헌

1) G. Schonberger : Material Programs Westinghouse-KAERI/KNFC-KEPCO, Jan., (1991)
2) F. Garzarolli, F. Schlemmer, E. Steinberg, H.G. Weidinger : 9th International Symposium on Zirconium in the Nuclear Industries, Kobe, Japan, Nov., 395, (1990)
3) H.P. Fuchs, F. Garzarolli, H.G. Weidinger, R.P. Bodmer and G. Meier : International Topical Meeting on the LWR Fuel Performance, Avignon, France, April, 21-24, (1991)
4) G.R. Kilp, D.R. Thornburg and R.J. Comstock : IAEA Technical Committe Meeting on "Fundmental Aspects of Corrosion and Zirconium Base Alloys in Water Reactor Environments" Portland, Oregon, Sep., 11-15 (1989)
5) G.P. Sabal, G.R. Kilp, M.G. Bafour and E. Roberts : Zirconium in the Nuclear Industry, 8th International Symposium, ASTM STP 1023, 127 (1989)
6) G.R. Kilp, M.G. Balfour, R.N. Stanutz, K.R. Mcatee : International Topical Meeting on the LWR Fuel Performance, Avignon, France, April, 21, (1991)
7) T. Isobe and Y. Matsuo : 9th International Symposium on Zirconium in the Nuclear Industries, Kobe, Japan, Nov., 346, (1990)

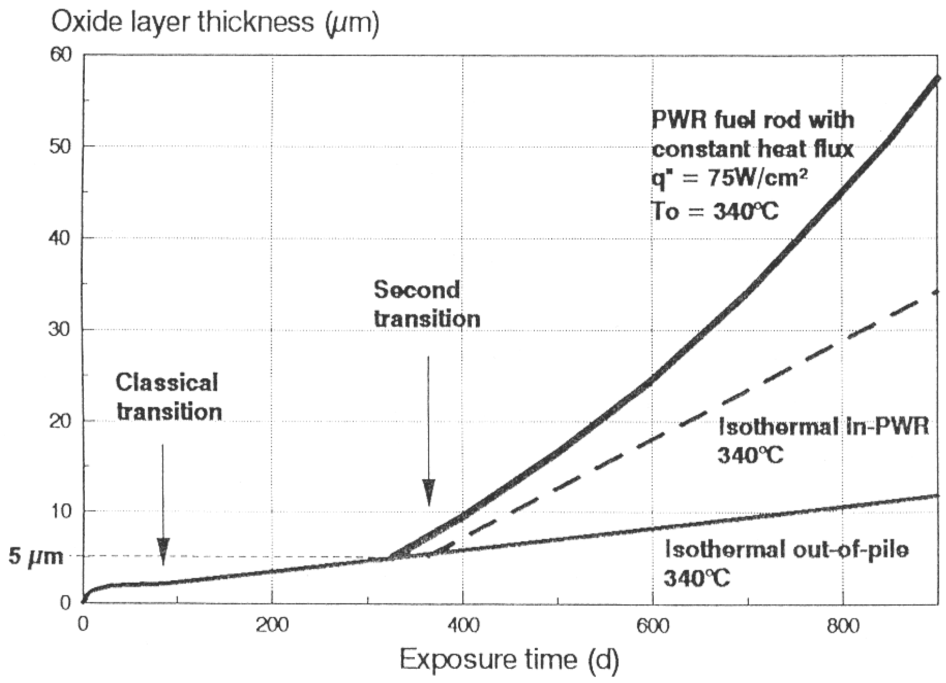


Fig.1 Oxide thickness of Zircaloy **cladding** in high burn-up fuel

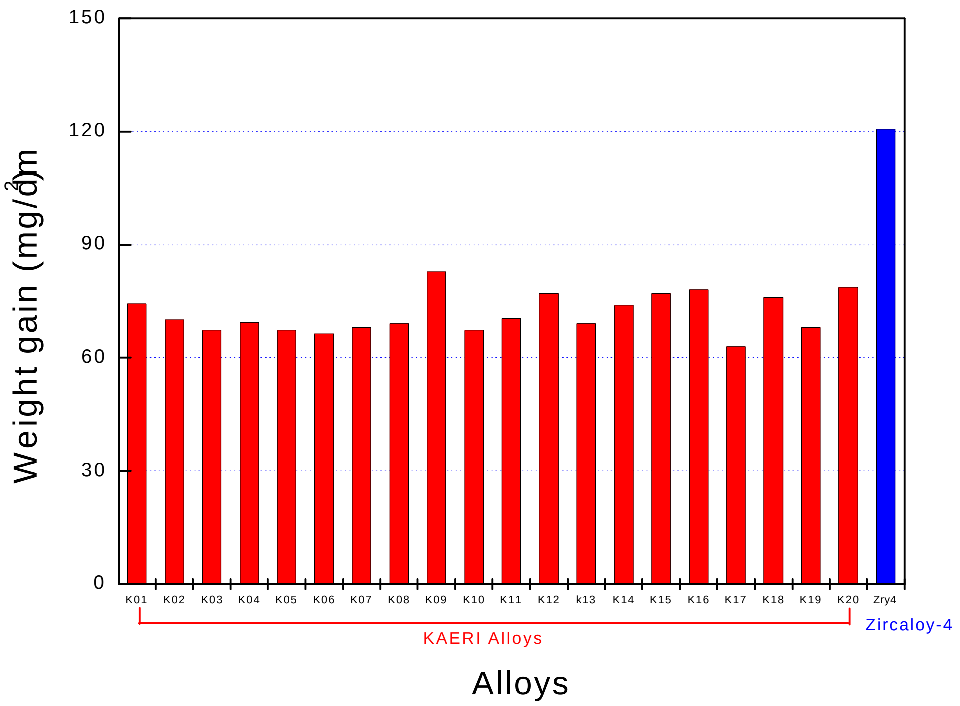


Fig.2 Corrosion of K-series alloys in 70 ppm LiOH solution

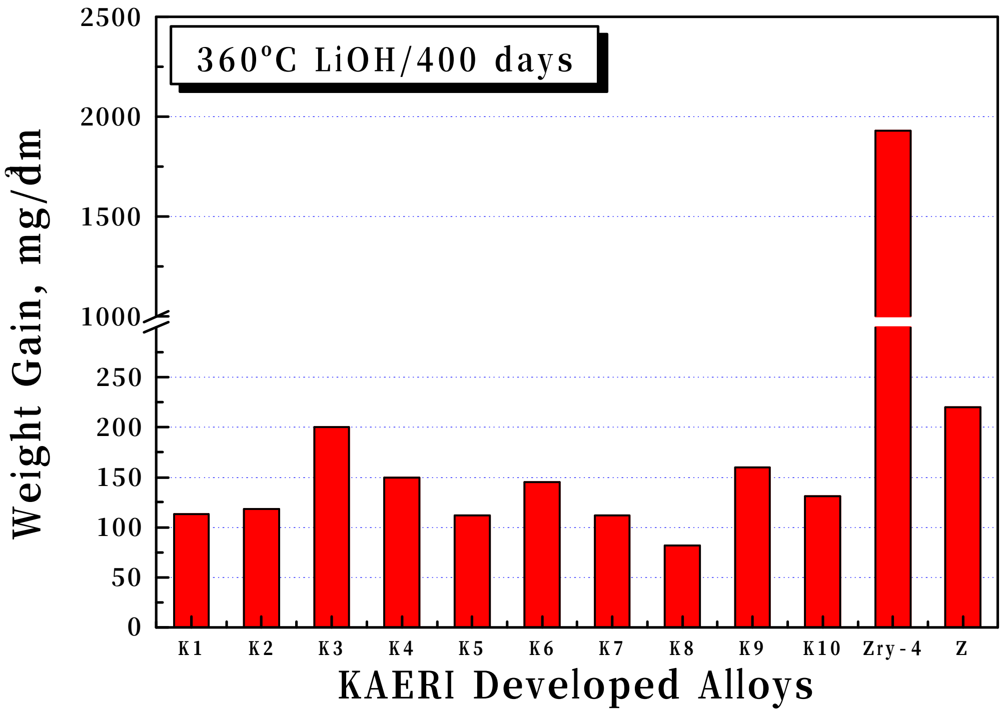


Fig.3 Corrosion of K-series alloys in 70 ppm LiOH solution

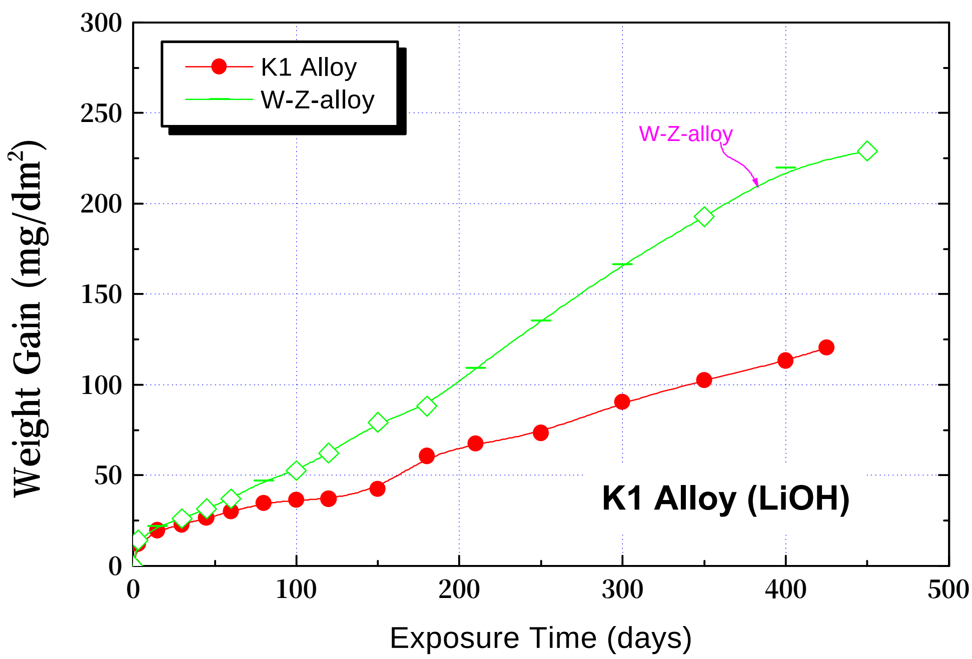


Fig.4 Corrosion behavior of K1 alloys in 70 ppm LiOH solution

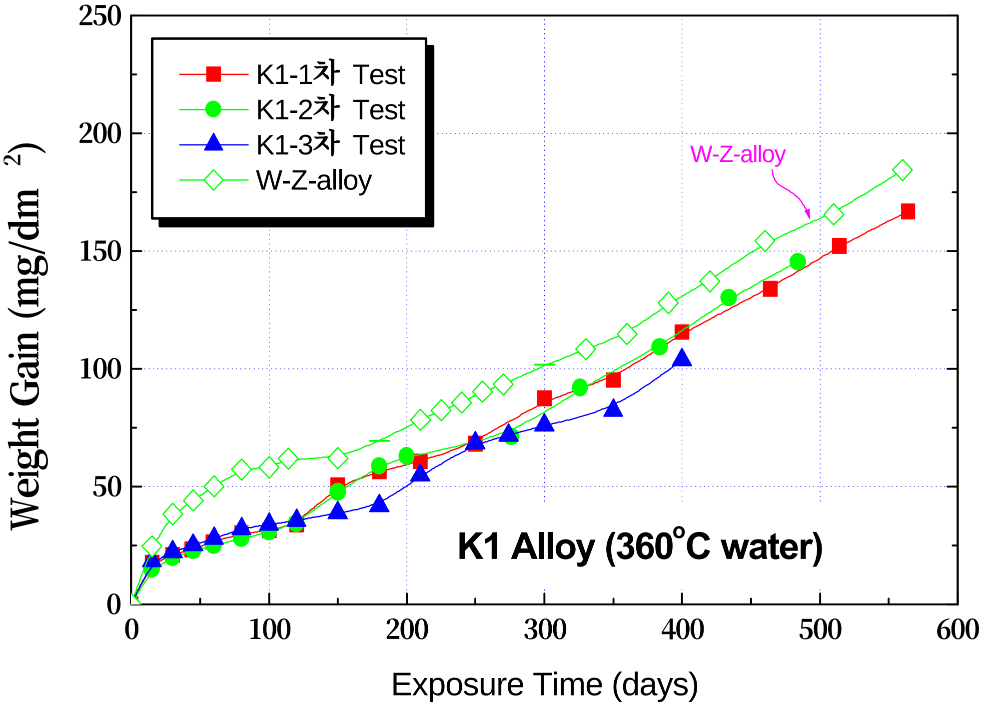


Fig.5 Corrosion behavior of K1 alloys in 360C water

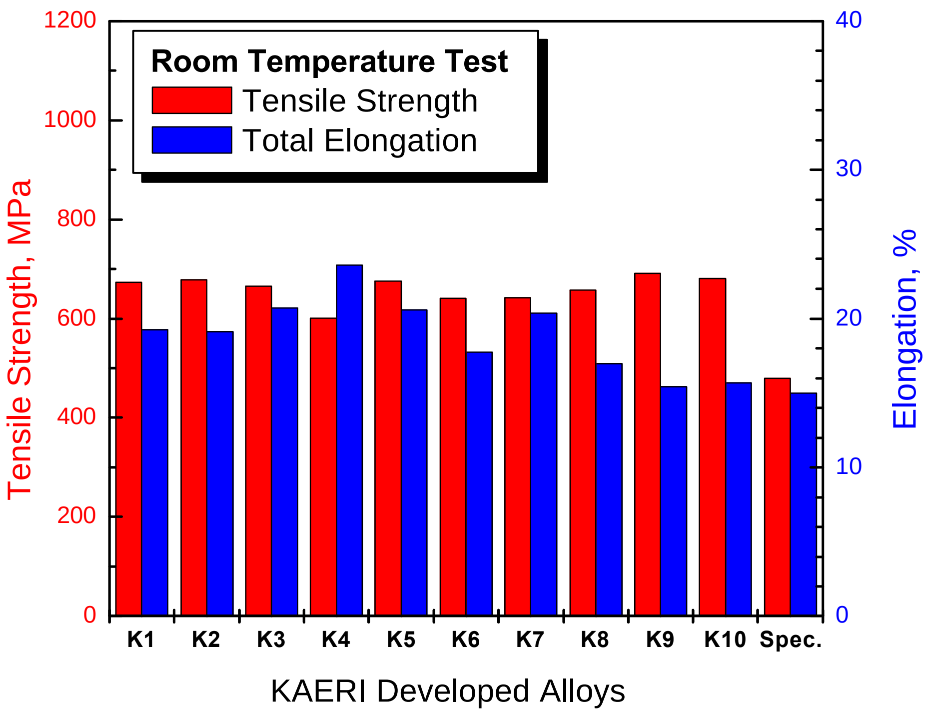


Fig.6 Tensile strength of K-series alloys at room temperature and 400C

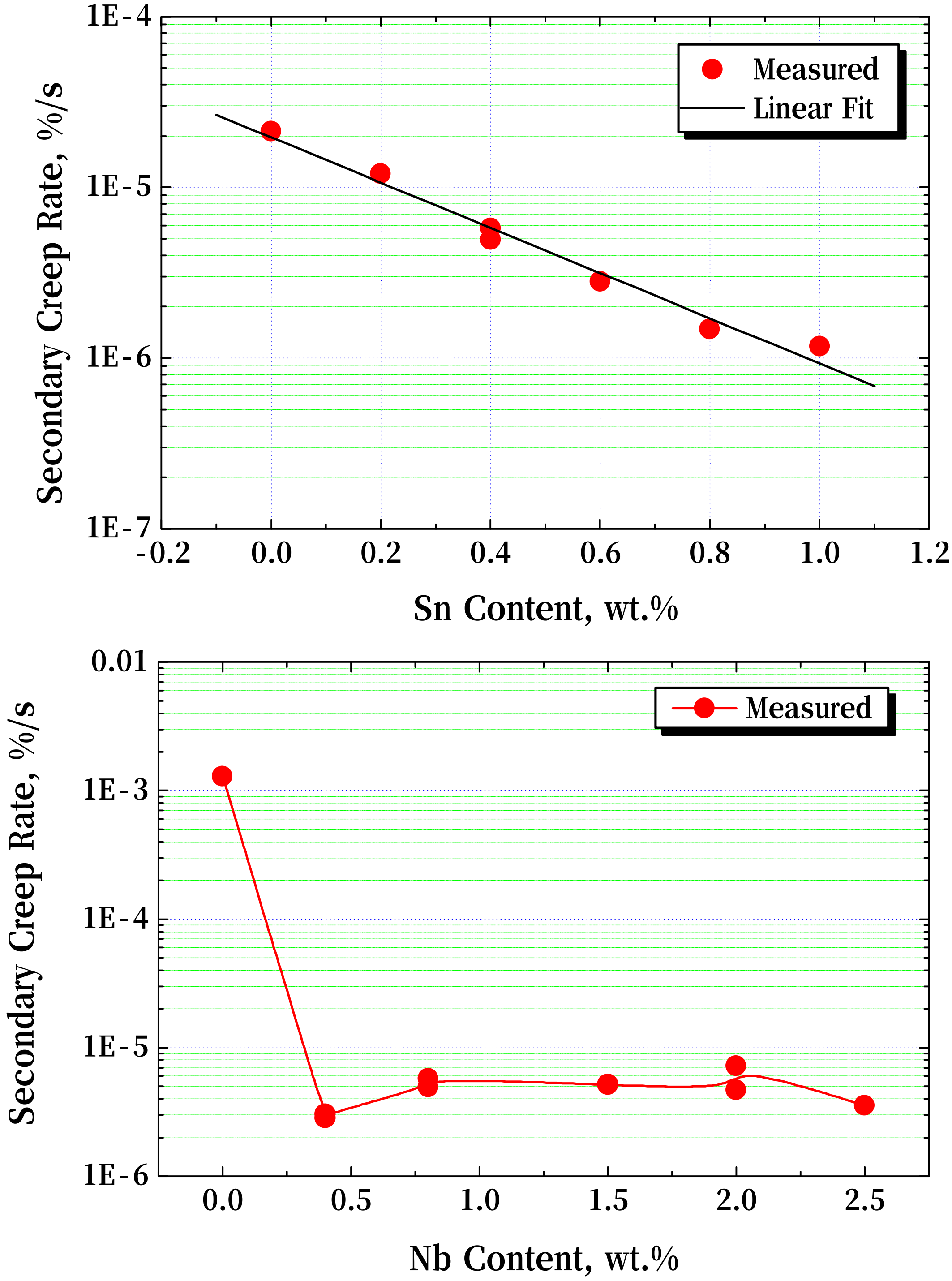


Fig.7 Effect of Sn and Nb on secondary creep rate in K-series alloys

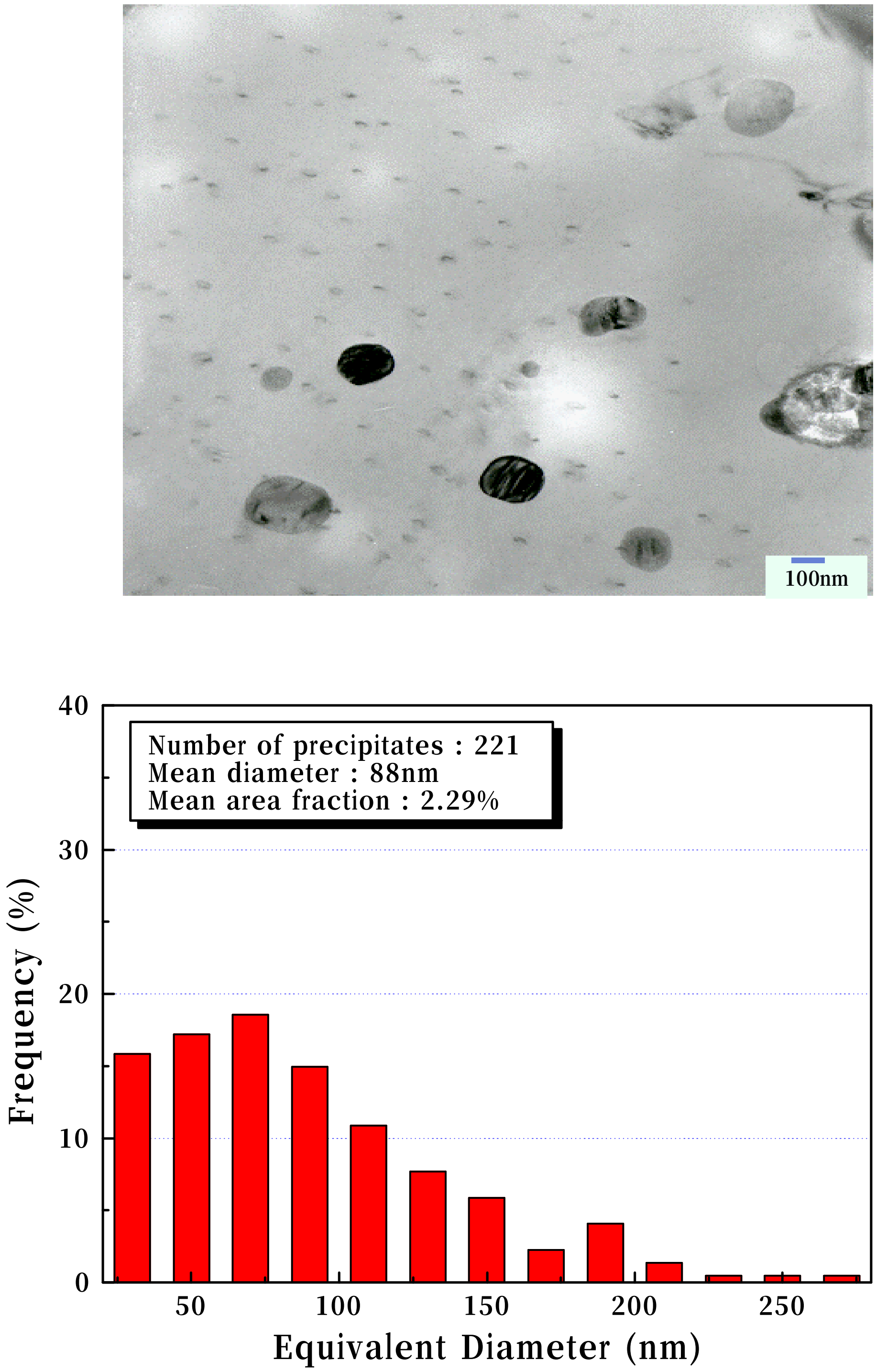
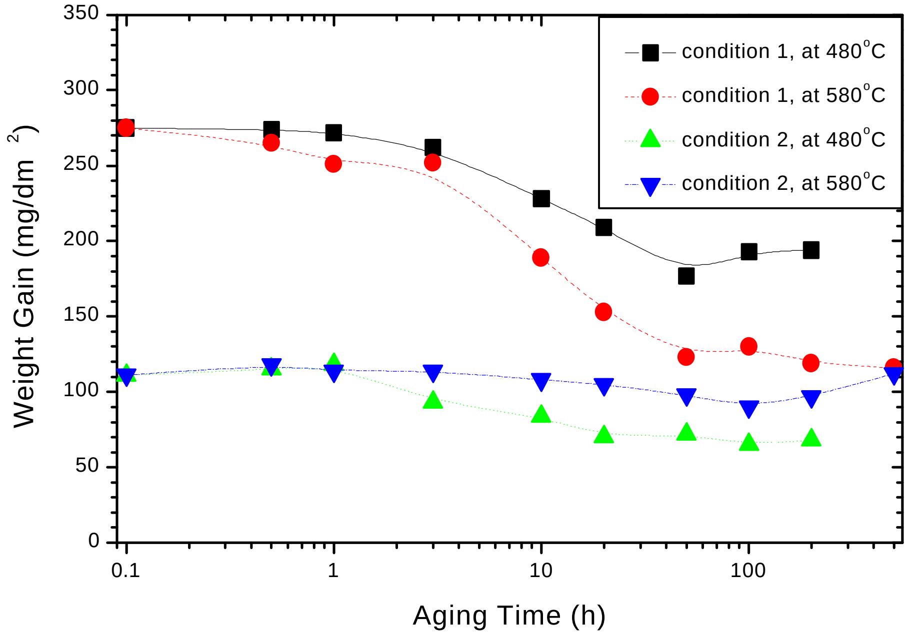


Fig.8 Characteristics of precipitate of K-series alloys



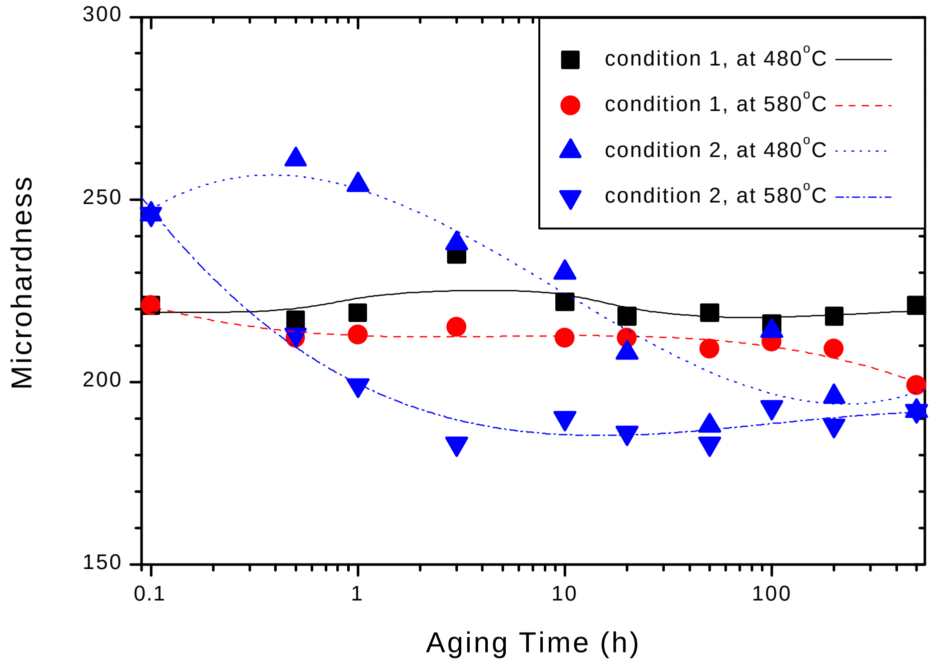


Fig.9 Optimization of corrosion resistance of K-series alloys by heat treatment

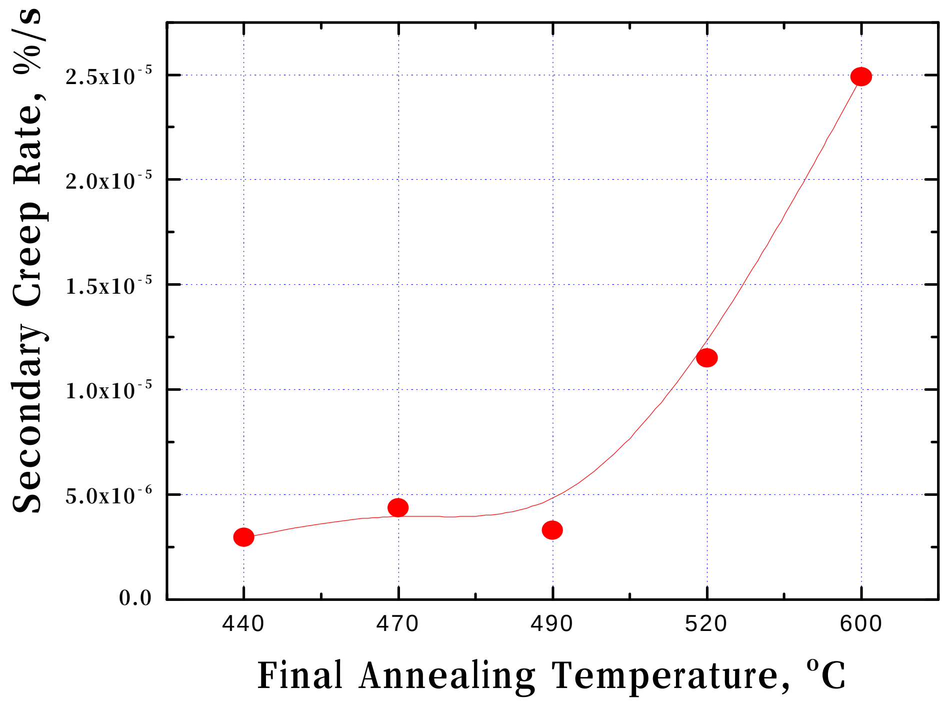


Fig.10 Effect of final annealing temperature on the creep rate

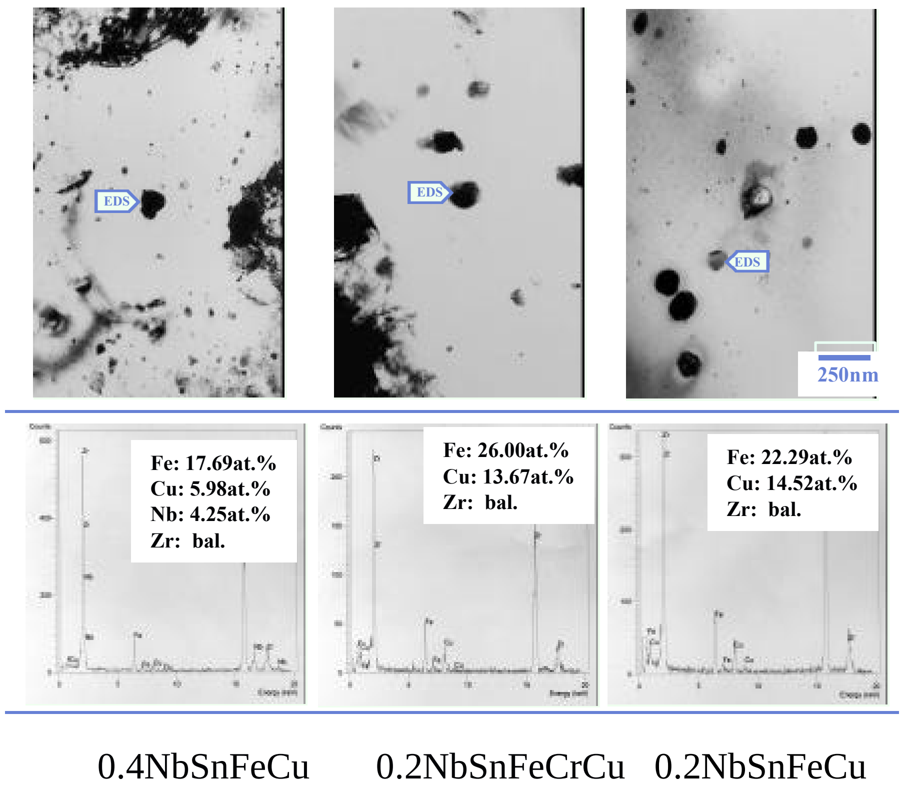


Fig.11 Composition and distribution of precipitates in K-series alloys