

화성운석 (Zagami, ALHA77005)과 아카풀코아이트
(TIL07012, EET14074)의 단입자 (U-Th)/He계를
이용한 열역사 연구

Single-grain (U-Th)/He ages from Martian meteorites
(Zagami, ALHA77005) and Acapulcoites (TIL07012,
EET14074): Implications to their thermal histories



University of Florida

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “남극빅토리아랜드 지역 지각진화 및 행성형성과정 연구” 과제의 위탁연구 “화성운석 (Zagami, ALHA77005)과 아카폴코아이트 (TIL07012, EET14074)의 단입자 (U-Th)/He계를 이용한 열역사 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자 : 이 종 익

위탁연구기관명 : University of Florida

위탁연구책임자 : 민 경 원

보고서 초록

위탁연구과제명	화성운석 (Zagami, ALHA77005)과 아카폴코아이트 (TIL07012, EET14074)의 단입자 (U-Th)/He계를 이용한 열역사 연구				
위탁연구책임자	민 경 원	해당단계 참여연구원수		해당단계 연구비	
연구기관명 및 소속부서명	University of Florida (Department of Geological Sciences)		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 미국		상대국연구기관명 : University of Florida		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	41
<ul style="list-style-type: none"> - Zagami 및 ALHA77005 화성 운석에서 산출하는 인산염 집계의 단입자 (U-Th)/He 연령은 그 대표값이 각각 92.2 ± 4.4 Ma 및 8.2 ± 1.2 Ma에 해당함. 이러한 연령은 기존의 전암 연령과 유사하나, 그 정밀도가 높음. - 측정된 (U-Th)/He 연령과 He 확산 도메인 측정치를 이용하여 열역사 모델링을 실행한 결과, Zagami 는 약 360-410°C, ALHA77005는 약 460-560°C의 충돌조건을 겪었을 것으로 추정. - 이러한 충돌온도조건은 이전에 조직비교 방법을 통해 측정된 온도조건보다 상당히 높고, 따라서 화성 운석의 충돌조건에 대한 수정이 필요함. - TIL07012 및 EET14074 아카폴코아이트에서 산출하는 인산염 집계의 단입자 (U-Th)/He 연령은 입자의 반경이나 U-Th-Sm 함량과 양의 상관관계를 보임. - 이러한 상관관계를 이용하여 He확산 모델링을 실행한 결과, 이 두 운석이 짧은 시간에 비교적 고온의 열적 작용을 겪었음을 지시. - 이러한 열역사는 우주공간에서 비교적 장시간에 걸친 태양열에 의한 가열보다는, 지구대기 통과시 마찰열에 의한 He확산이 일어났을 가능성이 높다는 것을 지시. 					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	Zagami 화성운석, ALHA77005 화성운석, TIL07012 아카폴코아이트, EET14074 아카폴코아이트, 충돌조건, 열역사			
	영 어	Zagami, ALHA77005, TIL07012, EET14074, Shock conditions, Thermal history			

요 약 문

I. 제 목

화성운석 (Zagami, ALHA77005)과 아카폴코아이트 (TIL07012, EET14074)의 단입자 (U-Th)/He계를 이용한 열역사 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

화성운석은 화성지각의 연구에 이용될수 있는 유일한 시료이다. 이러한 운석이 강한 충돌에 의해 화성에서 떨어져 나올때, 그 조직 및 화학조성이 변하게 되며, 이러한 변화는 화성운석의 원래 특성을 연구하는데 매우 중요하다. 또한 생명체가 행성간에 전이될수 있는지에 대한 연구에 있어, 이러한 충돌조건 연구는 필수적이다. 보다 일반적으로, 운석이 모암에서 분리되어 우주 공간상에서 떠돌다가 지구에 도달하는 과정은 비교적 복잡하며, 잘 알려져있지 않다. 이러한 과정을 규명하기 위해 두개의 화성운석 및 두개의 아카폴코아이트에 대한 단입자 (U-Th)/He 계를 연구하였다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

He확산은 비교적 짧은 가열이나 낮은 온도의 가열에서도 잘 일어나기 때문에 다른 방법으로 규명하기 어려운 여러 행성학적 현상들, 즉 모암에서 운석이 분리되는 과정, 우주 궤도상에서의 이동 및 지구 대기통과 등의 조건을 연구하는데 효과적으로 이용될수 있다. 이러한 연구는 아직 몇몇 운석에 대해서만 보고되었으며, 대부분의 운석에 대해서는 아직 그 연구가 전무한 실정이다. 이번 연구는 어떻게 이 방법이 일반적인 운석군에 대해 적용될수 있는지를 설명하고 있다.

IV. 연구개발결과

이번 연구를 통해 Zagami와 ALHA77005 화성운석의 인산염 집계 시료로부터 평균 92.2 ± 4.4 Ma와 8.4 ± 1.2 Ma에 해당하는 단입자 (U-Th)/He연령을 얻었다. 이러한 연령은 기존에 보고된 전암 (U-Th)/He 연령과 동일하거나 매우 유사하다. 또한 단입자 연령은 그 연령오차가 전암 연령보다 작아서 정밀도(precision)가 높은 연령 측정이 가능함을 보였다. 주사전자 현미경을 이용한 미세조직 관찰을 통해 Zagami 시료의 He 확산 도메인의 크기를 추정하였다. 이러한 추정치는 다단계 가열 실험으로부터 추정한 He 확산 도메인의 크기와 그 오차범위 내에서 동일하다. 보다 많은 시료에 대해

이러한 비교 연구가 이루어 져야 하겠지만, 주사전자 현미경을 이용한 확산 도메인 추정도 상당히 신빙성이 높다고 추정할수 있다. 단입자 (U-Th)/He 연령을 이용한 열역사 모델링을 통해 ALHA77005의 경우 약 460-560°C의 충돌 온도를 겪었을 것으로 추정하였다. 이러한 조건은 화성에서 방출될 당시의 충돌 온도 조건을 의미하는데, 이전에 조직 비교 방법을 통해 추정한 온도조건과 오차범위내에서 동일하다. Zagami의 경우 약 360-410°C의 충돌 온도를 추정하였는데, 이는 기존에 조직 비교 방법을 통해 추정한 온도조건보다 상당히 높다.

TIL07012 및 EET14074 아카폴코 운석의 (U-Th)/He 연령은 매우 넓은 분포를 보이는데, 이는 알파입자의 손실정도와 인산염 입자의 크기가 시료마다 매우 다르기 때문으로 추정된다. 연령은 입자의 반경이나 U-Th-Sm 함량과 양의 상관관계를 보이며, 이러한 분포의 열역사 모델링 결과 이 운석들이 모암에서 방출된 후 우주 궤도 이동중 태양에서 상당히 멀어 저온의 상태를 유지했으며, 지구 대기 진입시 단기간의 고온 가열에 의해 He-Ar을 손실했을 가능성이 높은 것으로 추정된다. TIL07012의 경우 이보다 가능성은 작지만, 만일 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연령이 1-5 % 이상의 Ar 손실을 지시한다면, 이 운석은 모암에서 방출된후 근일점이 태양에서 상대적으로 가까운 우주궤도를 따라 이동했으며 부분적인 가열을 통해 Ar-He 확산이 일어났음 지시한다. 보다 자세한 규제를 위해서는 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 자료와 함께 해석하는 연구가 필요할 것이다.

V. 연구제안

지금까지 보고된 대부분의 운석-불활성 기체 연구는 비교적 고온에서 이루어 졌는데, 이는 기존의 연구들이 He 보다는 원자 크기가 큰 다른 불활성 기체의 확산 현상에 중점을 두었기 때문이다. 이번 연구를 통해 저온 등온 가열 실험 (isothermal heating experiment) 또는 다단계 가열 실험 (incremental-heating experiment) 이 시료의 확산 도메인을 규제하는데 결정적인 정보를 제공한다는 사실을 밝혔다. 따라서, 다른 많은 운석 시료들에 대해 저온 가열 실험이 운석 (U-Th)/He 연구를 포함한 열역사 연구에 큰 과학적 가치를 제공할 것으로 전망된다. 이러한 연구는 주사전자 현미경을 통한 확산 도메인 추정과 더불어 독립적인 방법론을 제시하는바, 그 중요성이 크다고 할수 있다. 보다 많은 화성운석에 대해 (U-Th)/He 단입자 연령 측정법을 적용해서, 충돌 온도 조건을 추정할 필요가 있다. 이러한 결과를 '조직 비교 방법'을 통한 온도 추정치와 비교하여, 보다 신빙성 있는 충돌 조건을 도출할수 있다. 이러한 연구는 화성 지각의 특성 및 운석의 지구 전달과정을 규명하는데 중요한 자료를 제공할 것이다. 또한 카폴코아이트내 인산염 광물 집계의 단입자 (U-Th)/He 연령은 넓은 분포를 보이는데, 이러한 분포는 흔히 무시되어왔다. 이번 연구를 통해 이러한 연령의 분산도 많은 연령이 측정된다면 의미있는 결론을 도출할수 있다는 근거를 제시하였다. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연령 측정은 이러한 가설의 보다 확고한 검증을 가능하게 해 주리라 기대한다.

S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Single-grain (U-Th)/He ages from Martian meteorites (Zagami, ALHA77005) and Acapulcoites (TIL07012, EET14074): Implications to their thermal histories

II. Purpose and Necessity of R&D

Martian meteorites are the only samples available for the laboratory study of the Martian crust. When these meteorites were separated from Mars by strong collisions, their textures and chemical compositions changed; therefore understanding these changes are very important for studying the original characteristics of Martian meteorites when they were in the Martian crust. Understanding these collision conditions is also important in the study of whether life can be transferred between planets ("panspermia hypothesis"). In general, the entire journey of a meteorite, from detachment from its parent body to arrival in the Earth surface, is poorly understood. To clarify these processes, we performed single-grain (U-Th)/He dating for two Martian meteorites and two Acapulcoites.

III. Contents and Extent of R&D

Because He diffusion is relatively sensitive to temperatures, it can be efficiently used in studying various planetary processes, such as separation of a meteorite from its parent body, orbital trajectory in space, and transfer in Earth's atmosphere. The (U-Th)/He methods have been applied to a limited number of meteorites, but most meteorites are unexplored. This study shows how the methods can be used to general meteorites.

IV. R&D Results

Zagami and ALHA77005 yielded overall single-grain (U-Th)/He ages of 92.2 ± 4.4 Ma and 8.4 ± 1.2 Ma, respectively. These ages are consistent with previously reported whole-rock (U-Th)/He ages. However, the overall single-grain (U-Th)/He ages have higher analytical precision. To constrain the diffusion domain size, the microtextures of Zagami phosphates were investigated

using a scanning electron microscope (SEM). This approach yielded diffusion domain size consistent with the results from the incremental-heating experiments. Although further investigation is required, it is likely that the approach using a SEM can yield reliable constraints regarding the diffusion domain size. Thermal history modeling of the new single-grain (U-Th)/He data from ALHA77005 resulted in shock temperatures of 460-560 °C, consistent with the previously reported conditions deduced from the textural analysis. For Zagami, the modeling yielded shock temperatures of 360-410 °C that are significantly higher than the previously reported estimates.

The single grain (U-Th)/He ages from two Acapulcoites of TIL07012 and EET14074 are widely scattered, probably due to differential alpha recoil loss and diffusion domain size of individual samples. The ages show positive correlation with grain radius or U-Th-Sm content, and these relationships were used for thermal history modeling. The results indicate that these meteorites are likely to have stayed at low temperatures during their orbital delivery to Earth, and most of the He and Ar diffusion occurred during their passage in the Earth's atmosphere. For TIL07012, there is a possibility that this meteorite experienced higher temperatures during its orbital trajectory if the Ar loss in this meteorite is higher than 1-5%. For more detailed constraints, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analysis is required.

V. Suggested Research

Although there are numerous studies about heavy noble gases in meteorites, only a few studies are reported about meteoritic He systems using low-temperature diffusion experiments. According to this project, it became clear that low-temperature isothermal heating experiments or incremental incremental heating experiments are crucial in constraining the He diffusion domain radius. Therefore, such experiments, even in a whole-rock scale, will greatly enhance our understanding of He systems in various types of meteorites. This approach can be combined with SEM-based investigation to better constrain diffusion domain size. Also, the single-grain (U-Th)/He methods can be applied to other Martian meteorites to better constrain the shock conditions. Such efforts will provide more reliable dataset that can be used for comparison with the results from the textural analysis, and eventually it will improve the quality of intercalibration between the He diffusion and textural analysis. From the study about the two acapulcoites in this project, it is shown that the scattered (U-Th)/He ages can be used to model the thermal history if the resulting ages show expected relationship with the grains size or U-Th-Sm contents. This suggests that highly scattered (U-Th)/He ages, commonly identified in meteoritic samples, can be utilized with some assumptions. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating in combination with single-grain (U-Th)/He will be very useful in constructing thermal history of meteorites.

목 차

제 1 장 서론	8
제 2 장 국내외 기술개발 현황	10
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	11
제 1 절 Zagami와 ALHA77005 화성 운석	11
1. 연구의 중요성	11
2. 주사전자 현미경 및 (U-Th)/He 연령측정 결과	12
3. 열역사 모델링을 위한 확산 도메인 반경 추정	14
4. 열역사 모델링	17
5. 연구 결과	19
6. 연구 제안	20
제 2 절 TIL07012와 EET14074 아카폴코운석 (아카폴코아이트)	21
1. 연구의 중요성	21
2. TIL07012	22
가. 주사전자 현미경 분석 결과	22
나. (U-Th)/He 연령 측정 결과	22
다. 열역사 모델링	26
라. 결론	30
3. EET14074	30
가. 주사전자 현미경 분석 결과	30
나. (U-Th)/He 연령 측정 결과	31
다. 열역사 모델링	33
라. 결론	35
마. 연구의 성과 및 중요성	36
제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	38
제 5 장 참고문헌	39

제 1 장 서론

운석이 형성된 이후 지구에서 발견될 때까지의 여러 행성학적 과정 (planetary process) 을 규명하기 위해 운석의 열역사를 연구하였다. 열역사를 통해 규제할수 있는 행성학적 현상들은 여러가지가 있는데, 우선 모암의 크기 및 내부 구조 연구 (Pellas and Storzer, 1981; Trieloff et al., 2003), 모암의 충돌 조건 연구 (Bogard, 1995), 화성 대기의 온도 변화 연구 (Shuster and Weiss, 2005), 화성 표면에서의 충돌 조건 연구 (Ash et al., 1996; Schwenzer et al., 2008; Min et al., 2017), 초기 태양계의 충돌 빈도에 대한 연구 (Turner et al., 1971; Kring and Cohen, 2002; Chapman et al., 2007; Boehnke and Harrison, 2016), 태양계 내의 우주공간내 궤도에 대한 연구 (Gladman, 1997; Morbidelli and Gladman, 1998), 운석이 지구의 대기권을 통과할 때의 물리적 조건 연구 (Melcher, 1979; Foucher et al., 2010) 등이 있다 (그림 1). 이러한 연구는 태양계 형성 초기에 존재하였던 소행성의 여러 특성 뿐 아니라, 화성 표면의 환경, 지구 대기 통과중 마찰열에 의한 교란등을 연구하는데 결정적인 단서를 제공한다. 이러한 연구는 전통적으로 고온의 열역사 측정법(thermochronometer)인 U/Pb, Sm/Nd 또는 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 방법, 우주선 노출 연령 측정법 (cosmic-ray exposure age dating), 원소의 확산정도를 이용한 냉가속도 추정법 (speedometry) 등을 이용하여 이루어졌다. 최근에는 저온의 열역사 측정법인 (U-Th)/He 방법이 쓰이기도 하는데, 이는 He 확산이 온도에 매우 민감해, 비교적 단기간에 일어난 열적 현상도 규명할수 있기 때문이다. 이번 연구에서는 충돌을 경험한 Zagami 와 ALHA77005 화성 운석뿐 아니라, 충돌의 흔적이 없는 TIL07012 및 EET14074 아카폴코아이트에 대해서 입자단위 (single-grain scale) 의 (U-Th)/He 연령측정을 시도하였으며, 이를 통해 근원적인 연령 분포에 대한 고찰 (알파 입자 손실, 확산 도메인)과 위에 언급한 행성학적 과정의 일부를 밝혔다. 특히 화성운석의 경우 화성에서 방출될 당시의 충돌조건을, 아카폴코아이트의 경우에는 모암 소행성에서 방출된후 우주궤도에서 혹은 지구 대기통과시의 조건을 밝히는 연구결과를 도출하였다.

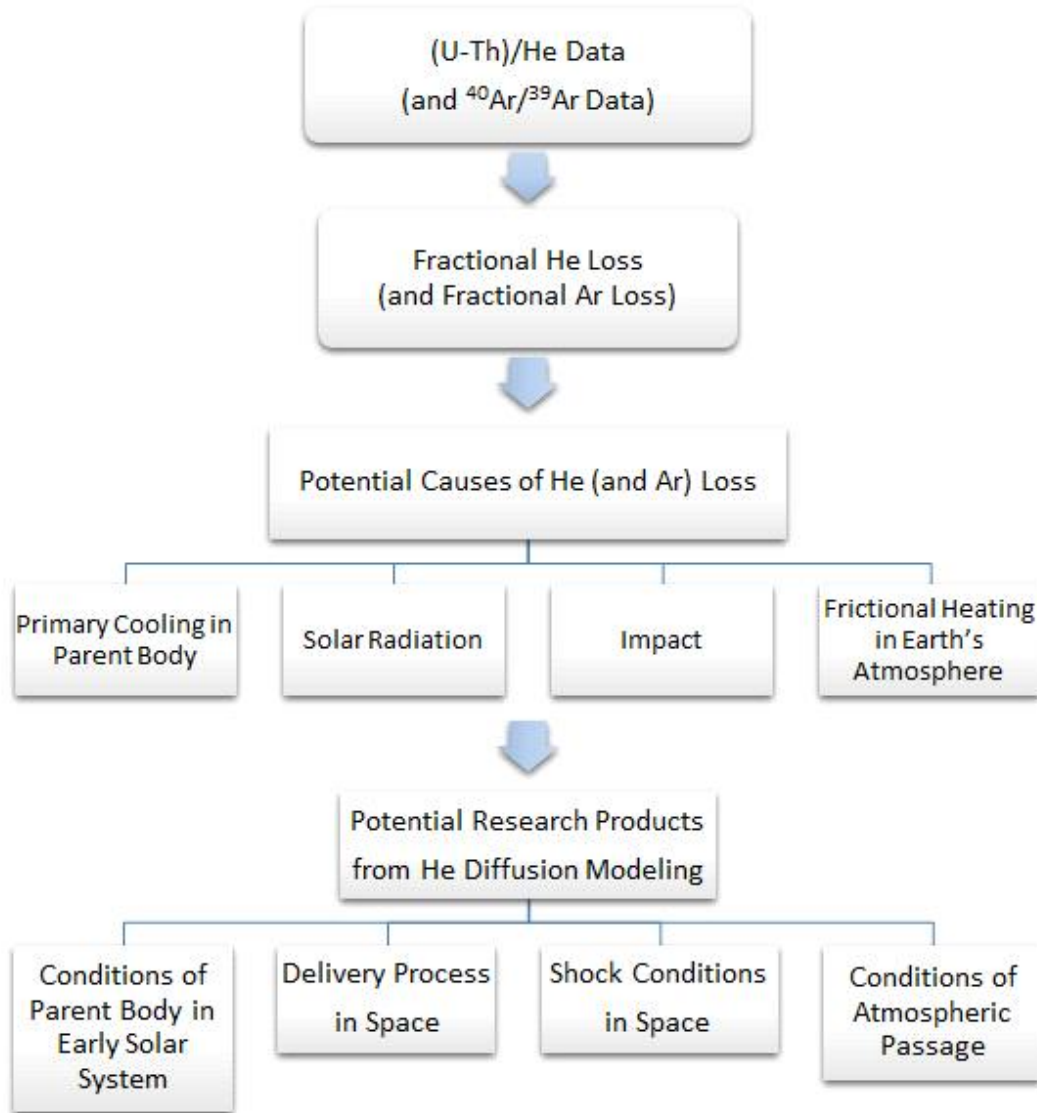


그림 1. (U-Th)/He 및 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 방법을 이용하여 어떠한 행성학적 현상들을 규명할수 있는지를 보여주는 모식도.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

현재 미국에는 약 15개의 연구기관에서 전문적인 (U-Th)/He연령 측정이 활발히 이루어지고 있으며, 대부분의 연구기관은 지각의 천부 용기역사 연구에 주로 이 방법을 사용하고 있다. 운석에 대한 (U-Th)/He 연령측정은 University of Florida와 Berkeley Geochronology Center 등에서 주로 이루어지고 있다. 실제로 운석 연구에 있어서 (U-Th)/He 계와 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 계를 동시에 이용했을 때 보다 구체적인 열역사를 밝힐 수 있다. 이 두 연령 측정법은 분석방법이나 자료해석에 있어서 유사한 점이 매우 많으며, 따라서 많은 연구자들이 이 두 방법을 병행하여 사용하고 있다. UF Themrochronology Lab은 새로 구입할 예정인 Multicollector Noble Gas Mass Spectrometer (NGX)를 이용한 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연령측정과 이미 진행중인 (U-Th)/He 연령측정을 접목시켜 운석 연구를 보다 강화할 계획이다.

국내에는 다른 종류의 Multicollector Noble Gas Mass Spectrometer (ARGUS VI)가 기초과학 지원연구원에 있기 때문에 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 계 연구에 효과적으로 쓰일 수 있다. 하지만 국내에는 아직 (U-Th)/He연령을 측정하는 연구기관이 없는 것으로 알고 있다. 따라서 국내에 (U-Th)/He 측정기기 도입이 된다면 기존의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 기기와 시너지 효과를 낼 수 있을 것으로 기대한다. 위에 언급한 바와같이 이러한 (U-Th)/He 측정기기를 이용한 저온 열역사 연구는 운석의 연구뿐 아니라 지각의 천부 용기역사를 밝히는데 선도적인 역할을 한다. 실제 한반도내에 존재하는 다양한 심성암, 화산암, 변성암, 또는 퇴적암의 열역사 및 기원 연구에도 매우 효과적으로 사용될 수 있는 방법이다. 이번 KOPRI-UF 공동연구를 통해 이러한 연령측정 기술의 향상뿐 아니라, 학문적인 교류와 협력의 발판을 마련할 수 있었다고 평가한다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 Zagami와 ALHA77005 화성 운석

1. 연구의 중요성

지금까지 발견된 61,000여개의 운석중에, 화성운석은 현재 약 200여개 만이 확인된 만큼 (Meteoritical Bulletin Database) 매우 희귀한 운석군이고, 따라서 그 연구 가치가 매우 크다고 할수 있다. 외부 충돌체가 화성 표면을 강타한 후 화성지각의 일부가 분리되어 화성의 중력권으로부터 벗어나기 위해서는 약 5 km/sec에 해당하는 탈출 속도(escape velocity)가 필요하다. 따라서 모든 화성 운석은 이러한 충돌을 겪었을 것으로 추정된다. 하지만 구체적인 충돌 조건에 대해서는 아직 의견이 분분하다. 이를 규명하기 위한 가장 전통적인 방법은 화성운석과 유사한 암상을 가진 지구 암석을 이용한 충돌실험을 한후, 이 암석에서 나타나는 여러 조직상의 특성을 운석과 비교하여 충돌 조건을 유추하는 방법이다 (Stöffler et al., 1988: “조직 비교 방법”). 이러한 방법은 실제 암석을 이용한 충돌실험을 시행한다는 장점이 있지만 여러가지 문제점이 있다. 우선 충돌 실험시 그 충돌 압력은 비교적 정확하게 측정할 수 있지만, 충돌 온도 상승분(Post-Shock Temperature)은 상태 방정식 (Equation Of State)을 통해서 계산할수 밖에 없다는 점이다. 이러한 계산은 측정된 충돌 압력값 뿐만 아니라 암석의 조성, 다공성 (porosity) 등에 의해 크게 영향을 받게 되기 때문에 그 정확도가 많이 떨어진다. 또다른 문제는, 이렇게 계산된 온도 상승분은 충돌 이전 온도에 대한 상대적인 온도 증가분으로서, 절대 온도가 아니라는 점이다. 즉, 충돌이전의 온도가 잘 알려지지 않은 경우, 온도 상승분 만으로는 정확한 충돌 온도를 추정하기 어렵다. 화성 표면의 경우 그 온도가 약 -130°C (극지방 겨울 밤)에서 +20°C (적도 지방 여름 낮)까지 크게 변하고, 특정 운석의 원래 위치와 충돌시기가 정확하게 규명되지 않았기 때문에, 충돌실험을 통한 화성운석의 충돌 온도 추정은 큰 오차를 가지고 있다.

이에 비해 He 확산을 이용한 방법 (Min and Reiners, 2007: “He 확산 방법”)은 절대 온도 조건을 추정할수 있는 장점이 있다. 물론, 이러한 계산을 위해서는 가정이 필요하다. 첫번째 가정은 대상운석의 He 확산 손실이 오로지 충돌에 의한 열적 작용에 의해서만 일어났으며, 두번째는 그 화성 운석내 인산염 광물의 He 확산 계수(E, Do)가 다른 운석 또는 지구상에서 산출하는 인산염 광물과 동일하며, 세번째는 운석이 화성에서 방출된 후 전도 냉각(conductive cooling)을 겪었다는 것이다.

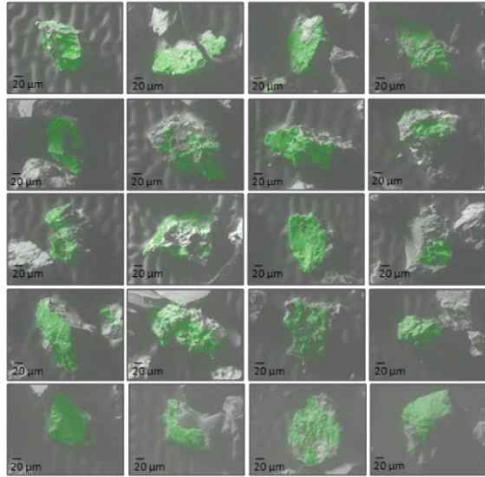
이러한 두 가지 방법으로 구한 충돌 온도의 측정은 완전히 독립적이며, 따라서 그 결과를 비교하는 것은 큰 의미가 있다. 또한 기존의 연구에서는 이론상으로 저온(<100°C)에 해당하

는 충돌조건에서도 화성의 중력권을 탈출하는것이 가능하다는 가설이 제기되었는데 (Artemieva and Ivanov, 2004) 있는데, 이러한 가설의 증거를 실제 운석에서 확인하는것이 중요하다. 또한 화성 운석의 충돌 조건은 생명체 이동설(panspermia hypothesis)의 가능성을 연구하는데 유용하게 쓰일수 있다. 이번 연구에서는 이전에 전통적인 방법으로 온도 상승분이 측정된 화성운석인 Zagami와 ALHA77005에 대한 연구를 진행하였다.

2. 주사전자 현미경 및 (U-Th)/He 연령측정 결과

우선 인산염 입자를 확인하고 분리하기 위해 주사전자 현미경을 이용하여 시료를 관찰하였다. 또한 확인된 인산염 입자의 산출 상태를 보다 자세히 기술하기 위해, 동위원소 분석에 쓰인 모든 입자의 주원소 분포도, 형태학적 특징, 그리고 에너지 분광법을 이용한 반정량적인 화학원소 측정이 고배율에서 이루어졌다. 이러한 사전연구는 동위원소 연령의 해석에 매우 중요한 단초를 제공한다. 실제 동위원소 연령 측정을 위해서는 인산염 입자(phosphate)와 이에 붙어있는 다른 상(phase)을 합친 인산염 집계(phosphate aggregate)가 쓰였다. 그림 2는 동위원소 연령을 측정된 인산염 집계의 주사전자 현미경 관찰 결과의 일부이다. 분석에 사용된 Zagami 인산염 집계는 그 형태학적 특징에 따라 군집 1과 군집 2로 나뉘었다. 군집 1은 인산염 입자에 붙어있는 다른 상(phase)이 비교적 얇은 ($\sim 20\mu\text{m}$) 층을 이루고 있는 반면, 군집 2의 인산염 집계는 비교적 두꺼운 ($> \sim 30\mu\text{m}$) 층의 다른 상이 존재한다. U-Th의 붕괴시 산출하는 알파입자는 약 $20\mu\text{m}$ 가량 원 모원소(U-Th)의 위치에서 벗어나게 되기 때문에 (알파 리코일 현상), 군집 1의 인산염 집계는 인산염으로부터 유출된 알파 입자의 일부가 전체 인산염 집계밖으로 유출되었고, 따라서 대체로 전암 연령보다 젊은 단입자 연령을 산출한다 (그림 3). 이에 반해 군집 2는 인산염 입자로부터 유출된 알파입자의 대부분이 인산염 집계내에 포획되어, 보다 정확한 (U-Th)/He 연령을 산출한다고 추정할수 있다.

Zagami Group 1
(75 -150 μm)



Zagami Group 2
(150 - 250 μm)

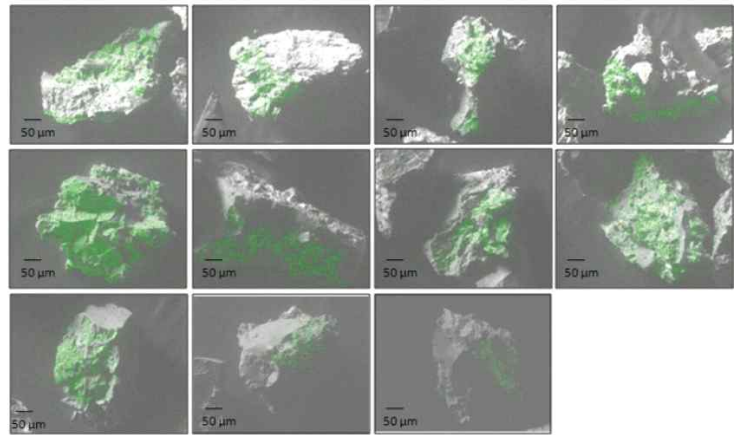


그림 2. Zagami 화성운석에서 분리된 인산염 집계의 군집 1 (75-150 μm)과 군집 2 (150-250 μm)에 대한 주사전자 현미경 관찰결과로 녹색부분은 인(phosphorous)의 화학지도를 보여준다. 따라서 녹색 부분이 인산염 집계에서 노출된 인산염 광물에 해당하고, 이외의 집계내 부분은 인산염 광물에 붙어 있는 다른 상에 해당한다. 붙어있는 상의 두께가 두꺼운 군집 2의 시료에서 보다 높은 연령이 산출되는데 (그림 3), 이는 알파 리코일현상에 의해 인산염 광물에서 방출된 알파입자가 이러한 붙어있는 상에 포획되었기 때문으로 추정된다.

그림 3의 분홍색 음영으로 표시된 부분이 군집 2의 단입자 (U-Th)/He 전체 평균 연령인데, 이는 기존에 보고된 전암 (U-Th)/He 연령(Schulz and Franke, 2004)과 동일하다. Schwenzer et al. (2008)의 전암 (U-Th)/He 연령은 이보다 약간 큰 값을 보이는데, 그 정확한 이유는 아직 불명확하다. ALHA77005의 경우 모든 인산염 입자가 비교적 두꺼운 층을 가지고 있으며, 그 단입자 (U-Th)/He 연령은 기존에 보고된 전암 연령과 동일하거나 (Schwenzer et al., 2008) 매우 유사하다 (Schulz and Franke, 2004).

따라서 시료의 암석학적 특성이 반영되어야 보다 적합한 단입자 연령의 해석이 가능하다. 만일 Zagami 시료의 군집 1 시료와 군집 2 시료를 이러한 구분없이 해석하였다면, 그 평균 연령은 실제 연령보다 젊을 것이고, 따라서 부적합한 해석을 할 가능성이 있다. 또한, 전암 연령과 단입자 연령을 비교할 시에도, 암석학적으로 의미있는 시료의 연령과 비교하는 것이 필수적이다. Zagami와 ALHA77005 단입자 평균 연령은 전암 연령과 동일하거나 매우 유사하며, 그 연령오차는 전암에 비해 작기 때문에 보다 정밀한 (U-Th)/He 연령측정이 가능하다 할수 있다.

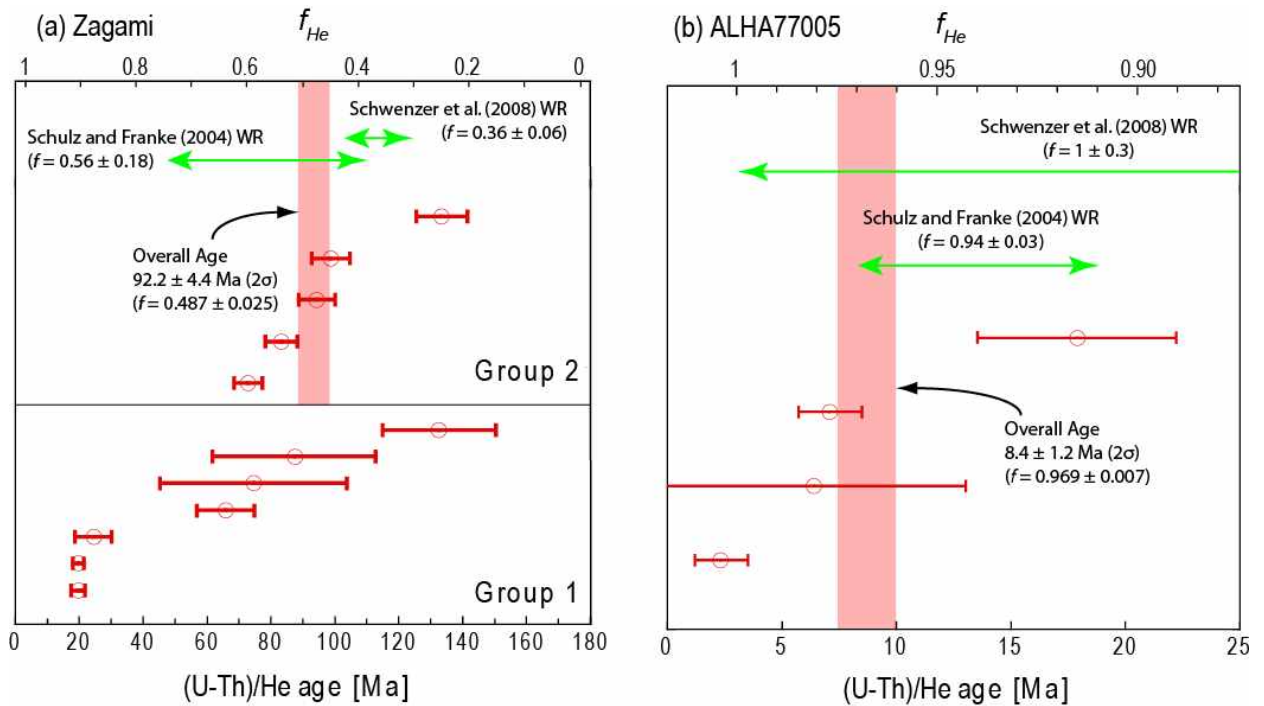


그림 3. Zagami와 ALHA77005 화성운석에서 분리된 인산염 집계의 (U-Th)/He 연령분포.

3. 열역사 모델링을 위한 확산 도메인 반경 추정

측정된 (U-Th)/He 연령을 이용해 이 두 화성운석이 어떠한 열역사를 겪었는지 추정하기 위해서는 운석 원암의 크기 (pre-atmospheric size), 분석에 이용된 시료의 원암내 위치 (distance from surface), 확산 도메인 반경 (diffusion domain radius) 등의 변수를 알아야 한다. 운석 원암의 크기 (pre-atmospheric size)는 우주선 동위원소 (cosmogenic isotope) 분석을 통해 잘 규제되어 있으며, 분석에 이용된 시료의 원암내 위치 (distance from surface)는 시료 채취시의 정보로부터 알 수 있다. 열역사 모델링에 가장 민감한 변수는 확산 도메인 반경이다. 따라서, 확산 도메인 반경의 유추는 매우 중요한 문제임에도 불구하고, 그 연구가 미진하였는데, 그 이유는 지구 물질의 광물입자 분석시에는 입자 자체가 확산 도메인이라는 가정이 잘 맞았기 때문이다. 하지만 충돌을 겪은 운석 시료의 경우, 충돌에 의해 입자 내부에 균열이 생길 가능성이 높고, 이러한 균열면을 통해 He 원자가 쉽게 입자 밖으로 방출될 수 있다. 이러한 입자의 확산 도메인은 입자 자체보다 작을 수 밖에 없다.

확산 도메인의 크기를 측정하기 위해 Zagami와 ALHA77005 운석의 박편을 주사현미경으로 관찰하였다. 각각의 인산염 입자내에 존재하는 균열면을 연결하여, 균열면에 의해 정의되는 영역(fracture-free area: FFA)을 정의하고, 이러한 영역들의 면적을 측정하여 그 분

포를 도시하였다 (그림 4). 이러한 2차원적 면적을 실제 3차원적 시료에 적용하기 위해, 가중치를 두어 계산한 확산 도메인 반경은 Zagami의 경우 약 2-9 μm , ALHA77005의 경우 약 5- 20 μm 로 추정되었다.

하지만 이러한 접근방법은 주사전자 현미경으로 관찰되지 않는 미세한 균열이 있을 경우, 실제 확산 도메인의 크기는 더욱 작아지게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 기존의 등온도 가열 실험(isothermal heating experiment) 결과를 이용하여 확산 도메인 반경을 간접적으로 추정하였다. 이를 위해서는 Bogard et al. (1984)의 Zagami 전암에 대한 실험 결과를 이용하였는데, 이는 확산 도메인의 반경이 약 3-4 μm 에 해당함을 지시한다 (그림 5). 이러한 결과는 주사전자현미경을 통해 추정한 확산 도메인의 반경 (2-9 μm)과 오차내에서 일치한다. 따라서, 주사전자 현미경을 통한 확산 도메인의 반경의 추정이 상당히 신빙성을 갖는다고 할수 있다. ALHA77005의 경우, 저온의 등가열 혹은 다단계 가열 (incremental incremental heating) 자료가 없어서, 확인하지 못하였다. 하지만, 주사전자 현미경 관찰 결과 Zagami에 비해 인산염 입자가 매우 깨끗한 점으로 미루어, 그 확산 도메인의 크기가 Zagami 시료보다 상대적으로 크다고 추정할수 있다 (그림 4).



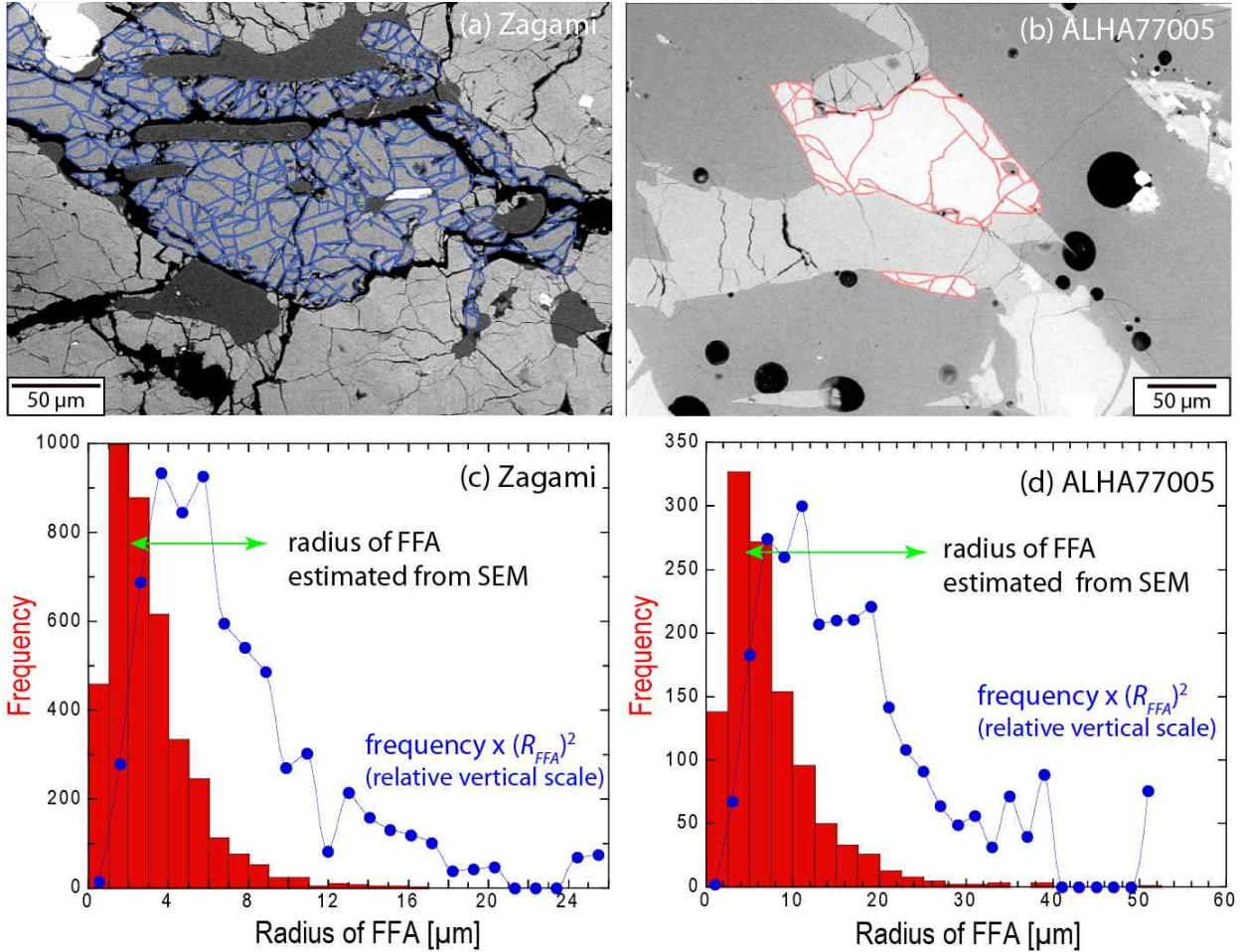


그림 4. (a, b) Zagami와 ALHA77005 화성운석의 박편상에서 관찰되는 인산염 광물의 후방산란전자 (Back-Scattered Electron) 사진. 균열면이라 추정되는 부분을 연결하였다. (c, d) 이러한 사진으로 분석한 균열면으로부터 정의되는 영역(fracture-free area: FFA)들의 면적과 동일한 면적을 가지는 원의 반경 분포를 도시한 막대 그래프. 파란 점으로 표시된 분포는, 막대 그래프의 분포를 3차원적인 확산 도메인의 분포를 고려하기 위해 가중치를 두어 계산한 반경의 분포.

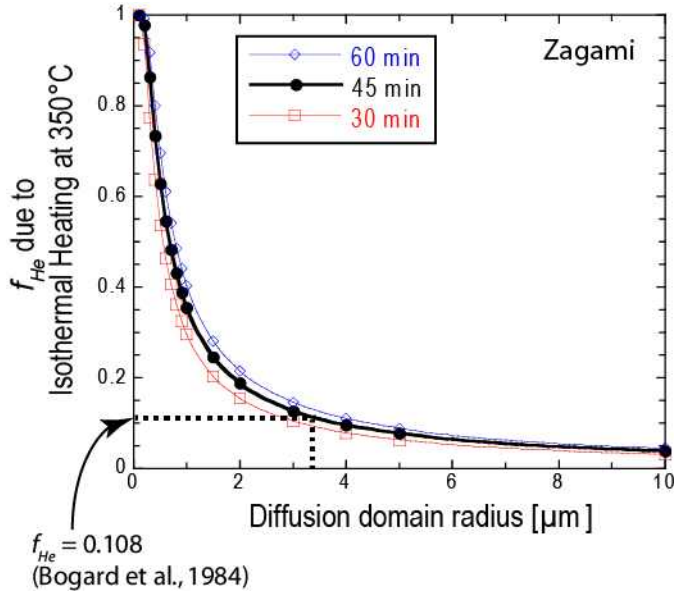


그림 5. He 손실량과 확산 도메인 반경과의 상관관계. Zagami 전암시료의 다단계 가열실험을 통해 구한 He 손실량 (0.108)은 약 3-4 μm 의 확산 도메인의 반경에 해당한다.

4. 열역사 모델링

위에 언급한 가정하에, He 확산을 이용한 충돌 온도 추정을 위해 수치모델링을 실시하였다. 먼저 Zagami의 경우 평균 연령이 약 49%의 He 손실(f_{He} = fractional He loss)을, ALHA77005의 경우 약 97%의 He 손실을 지시한다. 이러한 자료를 He 손실 - 온도 상관관계도에 도시한 결과, 충돌 평형온도(equilibrium shock temperature)가 Zagami의 경우 약 360-410°C, ALHA77005의 경우 약 460-560°C에 이르렀음을 알 수 있다 (그림 6). 비교적 약한 충격을 겪은 Zagami의 경우, He 손실-온도 곡선이 가파른 기울기를 보이는 구간에 해당하는 He 손실치를 가지고 있기 때문에, He 손실 추정치가 부정확하다 하더라도, 그 충돌 평형 온도 추정치에는 별 영향을 끼치지 않는다. 충돌 평형 온도 추정치는 확산 도메인 반경에 의해 보다 많은 영향을 받게 되는데, 이 때문에 보다 정확한 확산 도메인 반경을 추정할 필요가 있다. 비교적 강한 충격을 겪은 ALHA77005의 경우, He 손실-온도 곡선이 완만한 기울기를 보이는 구간에 해당하는 He 손실치를 가지고 있기 때문에, He 손실 추정치가 부정확하다면, 그 충돌 평형 온도 추정치에보다 큰 영향을 끼치게 된다. 따라서 ALHA77005의 충돌 평형 온도 추정치의 범위(460-560°C)가 Zagami 시료(360-410°C)에 비해 약 두배에 이른다. 또한 충돌 평형온도 추정치는 확산 도메인 반경에 의해서도 많은 영향을 받게 되기 때문에 보다 정확한 확산 도메인 반경 추정이 필요하다.

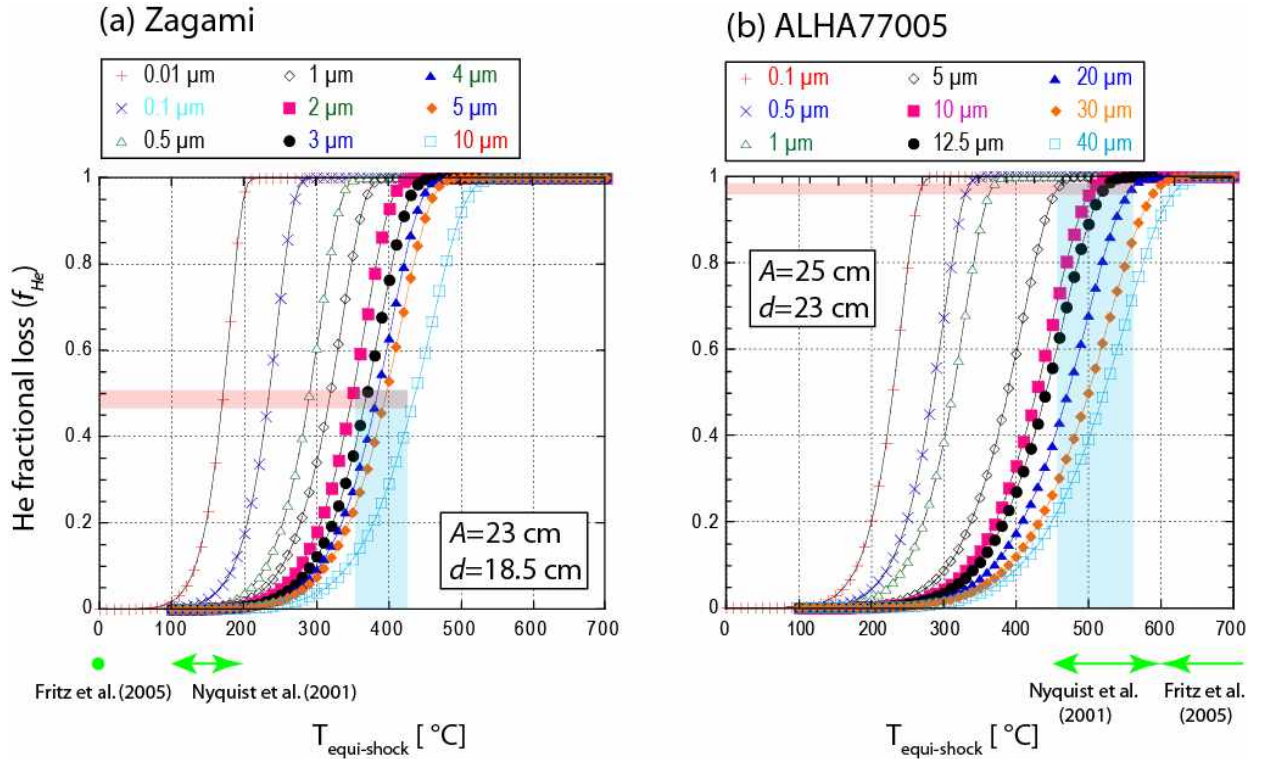


그림 6. He 손실량과 충돌 평형 온도의 관계를 도시한 그림. Zagami의 경우 그 He 손실량이 급격한 기울기 부분에 해당하기 때문에, He 손실량 추정치가 다소 부정확하다 하더라도 충돌 평형 온도 계산에는 큰 영향을 미치지 않는다. 반면, ALHA77005의 경우 He 손실량이 완만한 기울기에 해당하기 때문에 충돌 평형 온도 계산은 He 손실량 추정치에 의해 다소 많은 영향을 받는다.

이러한 연구 결과를 기존에 보고된 조직 비교 연구로부터 추정된 충돌 평형온도조건과 비교해 보았다 (그림 7). 보다 많은 자료를 취합하기 위해 이전에 동일한 방법으로 연구된 화성운석인 ALHA84001과 Los Angeles도 포함시켰다. 두 방법(조직 비교 연구, He 확산 연구)이 동일한 결과를 내는 구간을 그림에서 파란색으로 표현하였다. 특이할 점은, 비교적 강한 충돌을 겪은 ALHA77005와 Los Angeles의 경우 두 방법이 오차범위 내에서 동일한 결과를 산출한다는 사실이다. 하지만 약한 충돌을 겪은 운석인 Zagami와 ALHA84001의 경우 He 확산 연구 결과는 조직 비교 연구 결과에 비해 높은 평형 온도를 지시하고 있다. 이러한 불일치의 이유는 불명확하나, 조직 비교 연구중에서 Nyquist et al. (2001) 결과가 Fritz et al. (2005) 결과보다 He 확산 방법의 온도 추정치에 가깝다는 사실을 알수 있다. 기존의 두 조직 비교 연구 (Nyquist et al., 2001; Fritz et al., 2005) 결과는 서로 상당히 차이가 있다. 어떤 연구가 보다 신빙성이 있는 조직 비교 연구 결과인지 밝혀야, He 확산 연구 결과와 보다 공정한 비교가 가능하다.

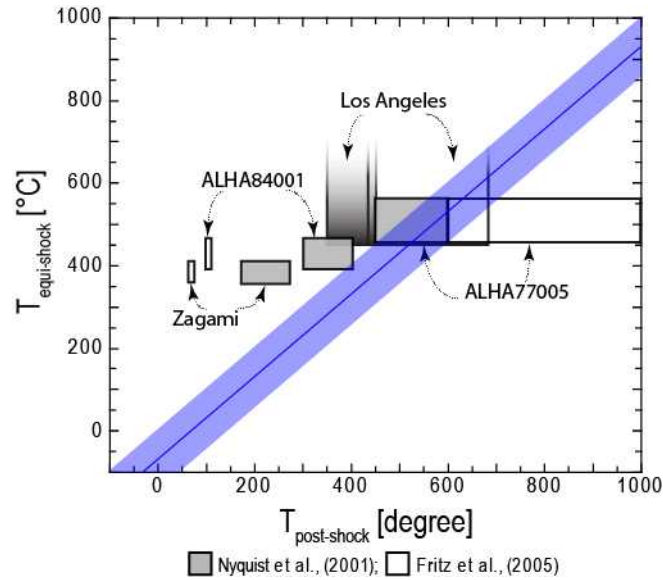


그림 7. He 확산을 이용한 방법으로 추정된 충돌 평형 온도(Y축)와 조직 비교 방법으로 구한 충돌 온도 상승분(X축)을 비교한 그림. 이 두 추정치가 일치하는 부분은 파란색으로 표시하였다. 강한 충격을 겪은 것으로 알려진 ALHA77005와 Los Angeles 화성운석은 이 두 추정치가 거의 일치한다. 하지만 비교적 약한 충격을 겪은 Zagami와 ALHA84001 화성운석은 He 확산을 이용한 충돌 평형 온도 추정치가 조직 비교 방법으로 구한 온도 추정치보다 높다.

5. 연구 결과

- 가. 이번 연구를 통해 Zagami와 ALHA77005 화성운석의 인산염 집계 시료로부터 평균 92.2 ± 4.4 Ma 와 8.4 ± 1.2 Ma에 해당하는 단입자 (U-Th)/He연령을 얻었다. 이러한 연령은 기존에 보고된 전암 (U-Th)/He 연령과 동일하거나 매우 유사하다. 또한 단입자 연령은 그 연령오차가 전암 연령보다 작아서 정밀도(precision)가 높은 연령 측정이 가능함을 보였다.
- 나. 주사전자 현미경을 이용한 미세조직 관찰을 통해 Zagami 시료의 He 확산 도메인의 크기를 추정하였다. 이러한 추정치는 다단계 가열 실험으로부터 추정된 He 확산 도메인의 크기와 그 오차범위 내에서 동일하다. 보다 많은 시료에 대해 이러한 비교 연구가 이루어 져야 하겠지만, 주사전자 현미경을 이용한 확산 도메인 추정도 상당히 신빙성이 높다고 추정할수 있다.
- 다. 단입자 (U-Th)/He 연령을 이용한 열역사 모델링을 통해 ALHA77005의 경우 약 460-560°C의 충돌 온도를 겪었을 것으로 추정하였다. 이러한 조건은 화성에서 방출될 당시의 충돌 온도 조건을 의미하는데, 이전에 조직 비교 방법을 통해 추정된 온도조건과 오차범위내에서 동일하다. Zagami의 경우 약 360-410°C의 충돌 온도를 추정하였는데, 이는 기존에 조직 비교 방법을 통해 추정된 온도조건보다 상당히 높

다. 따라서 이전에 보고된 조건의 수정이 필요하다.

6. 연구 제안

지금까지 보고된 대부분의 운석-불활성 기체 연구는 비교적 고온에서 이루어 졌는데, 이는 기존의 연구들이 He 보다는 원자 크기가 큰 다른 불활성 기체의 확산 현상에 중점을 두었기 때문이다. 이번 연구를 통해 저온 등온 가열 실험 (isothermal heating experiment) 또는 다단계 가열 실험 (incremental heating experiment)이 시료의 확산 도메인을 규제하는데 결정적인 정보를 제공한다는 사실을 밝혔다. 따라서, 다른 많은 운석 시료들에 대해 저온 가열 실험이 운석 (U-Th)/He 연구를 포함한 열역사 연구에 큰 과학적 가치를 제공할 것으로 전망된다. 이러한 연구는 주사전자 현미경을 통한 확산 도메인 추정과 더불어 독립적인 방법론을 제시하는바, 그 중요성이 크다고 할수 있다.

보다 많은 화성운석에 대해 (U-Th)/He 단입자 연령 측정법을 적용해서, 충돌 온도 조건을 추정할 필요가 있다. 이러한 결과를 '조직 비교 방법'을 통한 온도 추정치와 비교하여, 보다 신빙성 있는 충돌조건을 도출할수 있다. 이러한 연구는 화성 지각의 특성 및 운석의 지구 전달과정을 규명하는데 중요한 자료를 제공할 것이다.

극지연구소

제 2 절 TIL07012와 EET14074 아카폴코 운석 (아카폴코아이트)

1. 연구의 중요성

최근의 극지연구소 남극탐사에 의해 획득된 두 개의 아카폴코 운석인 TIL07012와 EET14074 에 대한 연구를 진행하였다. TIL07012는 2007년도 남극탐사중 티얼 산 (Thiel Mountain) 에서 30g의 운석으로 발견되었으며 2010년 Meteoritical Bulletin Database에 공식적으로 등록되었다 (Weisberg et al., 2010). 이 운석은 그 조직과 산소동위원소의 특성으로 아카폴코아이트-로드라나이트 군에 분류되었으며, 높은 사장석 함유량에 따라 최종적으로 아카폴코아이트로 분류되었다 (Choi et al, 2009). EET14074는 2014년도 남극탐사중 엘레판트 모레인 산 (Elephant Moraine Mountain)에서 14.4g의 운석으로 발견되었으며, 2018년 Meteoritical Bulletin Database에 공식적으로 등록되었다.

아카폴코아이트는 비교적 작은 소행성으로부터 파쇄되어 형성되었다고 알려져 있다. 따라서, 고온 열역사 과정 혹은 결정화 과정을 지시하는 I/Xe, U/Pb 혹은 Sm/Nd 동위원소계는 모두 태양계 형성 초기연령을 지시한다. 저온 열역사 과정을 지시하는 (U-Th)/He 연령 또한 그 오차범위 내에서 태양계 형성 연령과 일치하는데 (Min et al., 2003), 이는 아카폴코아이트가 형성후 빠른 냉각과정을 겪었음을 지시한다.

전통적으로 운석의 (U-Th)/He 연령은 전암 시료를 이용하여 측정하거나 (Schwanzer et al., 2008), 기존에 보고된 U-Th 함량 및 ^4He 함량을 이용하여 계산하는 (Wasson and Wang, 1991) 예가 많았다. 하지만, 이러한 전암 (U-Th)/He 연령은 운석에 존재하는 우주선 기원 (cosmogenic) ^4He 의 양이 방사성 (radiogenic) ^4He 의 양에 비해 상대적으로 많기 때문에 정확한 (U-Th)/He 연령을 구하는 것이 불가능하다. 또한, 전암의 (U-Th)/He 연령은 이론상으로 단입자 (U-Th)/He 연령의 평균치와 일치하여야 하는데, 대부분의 비충돌 (non-shocked) 운석의 경우 행성학적으로 의미있는 해석은 가장 높은 단입자 (U-Th)/He 연령에서 유추할수 있다. 따라서 전암 (U-Th)/He 연령은 대략적인 열역사 혹은 행성학적 현상의 선후관계를 밝히는 연구에는 쓰일수 있겠으나, 보다 구체적인 열역사나 모암내에서 일어난 태양계 형성초기의 현상을 연구하기에는 부적합하다. 이번 연구에서는 아카폴코아이트에 산출하는 인산염 광물로부터 어떻게 단입자 단위의 (U-Th)/He 연령을 구하며, 이를 해석하는 방법론을 제시한다. 또한 광범위에 걸친 단입자 단위 (U-Th)/He 연령을 통해, 운석의 우주공간 궤적과 지구 대기 통과 조건에 대한 단초를 제공하고자 한다.

2. TIL07012

가. 주사전자 현미경 분석 결과

인산광물의 종류를 알아내기 위해 에너지 분광법을 이용한 반정량분석을 실시하였다. 각 인산염 집계의 에너지 분광법 결과는 부록1에, 그 인산염 종류는 표 1에서 찾을 수 있다. Cl-인회석, F-인회석, 메릴라이트 등을 식별하기 위해 Cl, F, Mg, Na 등의 함량을 고려하였다. 우선 Cl 혹은 F의 높은 함량이 발견되고, Mg 혹은 Na의 함량이 매우 낮으면 Cl-인회석이나 F-인회석이라 결론지었다. 만일 Mg 혹은 Na의 분포가 확인된 경우, 이들이 인산 광물에 존재하는 것이 아니라 작은 규산염 포획물이나, 집계의 표면에서는 관찰되지 않지만, 집계 아래부분에 존재하는 규산 광물내에 존재할 가능성도 있다. 따라서, Si 분포가 확인된 경우, Mg 혹은 Na는 이러한 규산염으로부터 기인한 것이라 판단하였다. 46개의 인산염 집계중 7개의 인회석, 29개의 Cl-인회석, 4개의 F-인회석, 6개의 메릴라이트를 확인하였다 (표 1). 대부분의 인산염 광물이 Cl-인회석이고, 소량의 인회석, F-인회석, 메릴라이트가 존재한다는 사실은 이전에 아카폴코 운석에 대한 연구결과와 일치한다 (Min et al., 2003). 보다 정량적인 자료가 이번 연구에서 제시되었다.

	No. Grains	%	No. Grains Yielded Ages > 4.0 Ga	Ages > 4.0 Ga
Apatite	7	15%	1	4.064 ± 0.112 Ga (PI111)
Chlorapatite	29	63%	4	4.317 ± 0.183 Ga (PI112), 5.769 ± 1.506 Ga (PI112) 4.283 ± 0.144 Ga (PI115), 4.447 ± 0.149 Ga (PI115)
Fluapatite	4	9%	2	4.568 ± 0.176 Ga (PI112), 4.259 ± 0.253 Ga (PI112)
Merrillite	6	13%	0	
Total	46		7	

표 1. TIL07012 시료중 (U-Th)/He 연령측정에 사용된 인산염 광물 집계의 종류와 높은 연령값.

나. (U-Th)/He 연령 측정 결과

TIL07012의 시료는 그 시료의 크기에 따라 PI 111(150-180 μm)과 PI 112, 115(180-250 μm)로 나누어 분석하였다. 전체 (U-Th)/He 연령은 35.4 ± 8.9 (1σ) Ma 에서 5769 ± 1506 Ma까지 넓은 분포를 보인다 (그림 8). 커널 밀도 도표(Kernel Density Plot)는 기존에 흔히 쓰이던 확률 밀도 도표(Probability Density Plot) 보다 정보의 통계적 특징을 보다 잘 반영한다고 알려져 있다 (Vermeesch, 2012). PI112, 115시료는 PI 111시료보다 대개 높은 연령을 보인다 (그림 9). 또한, 표1에 기재한 바와같이 4.0 Ga 보다 높은 7개의 시료중 6

개가 Pl 112, 115 에 해당하는 180-250 μm 에서 도출되었다. 이는 큰 시료가 보다 높은 연령을 산출하는데 유리함을 지시한다. 이러한 현상은 위에서 언급한 Zagami 화성운석에서와 유사하게 설명될수 있다. 이러한 사실은 큰 인산염 입자가 He을 보다 효과적으로 보존하고, 또한 인산염 입자 주변에 비교적 두꺼운 다른 상이 존재할 경우 알파 리코일(alpha recoil)에 의해 인산염 광물로부터 방출된 He원자가 인산염 집계내에 보다 효과적으로 보존되기 때문인 것으로 추정된다. 또한 4 Ga 이상의 높은 연령은 메릴라이트 보다 인회석에서 주로 산출하는것을 알수 있다 (표 1).

그림9는 각각의 인산염 광물중에 대해 (U-Th)/He 연령과 U+Th+Sm양 과의 상관관계를 보여준다. 동일한 광물중에 대해, Pl 112, 115 시료는 대체로 양의 상관관계를 보여주는 반면, Pl 111은 이러한 상관관계를 보이지 않는다. 이는 Pl 112, 115 시료의 U+Th+Sm 양이 집계내 인산염 광물의 실제 크기를 보다 잘 반영하기 때문으로 해석된다. 메릴라이트 시료의 연령은 다른 세 광물군 시료에 비해 매우 낮은 연령값을 보인다.

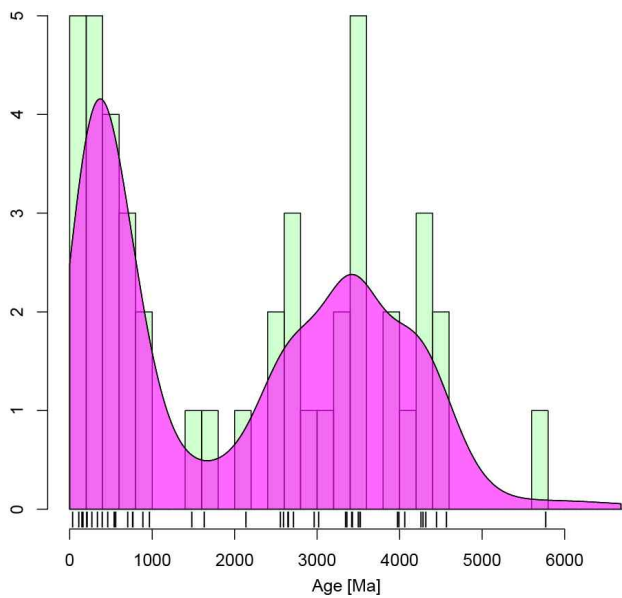


그림 8. TIL07012 운석내 인산염 집계의 단입자 (U-Th)/He 연령을 도시한 커널 밀도 도표. 연령이 매우 넓게 분포하며 이점 분포(bimodal distribution)를 보인다.

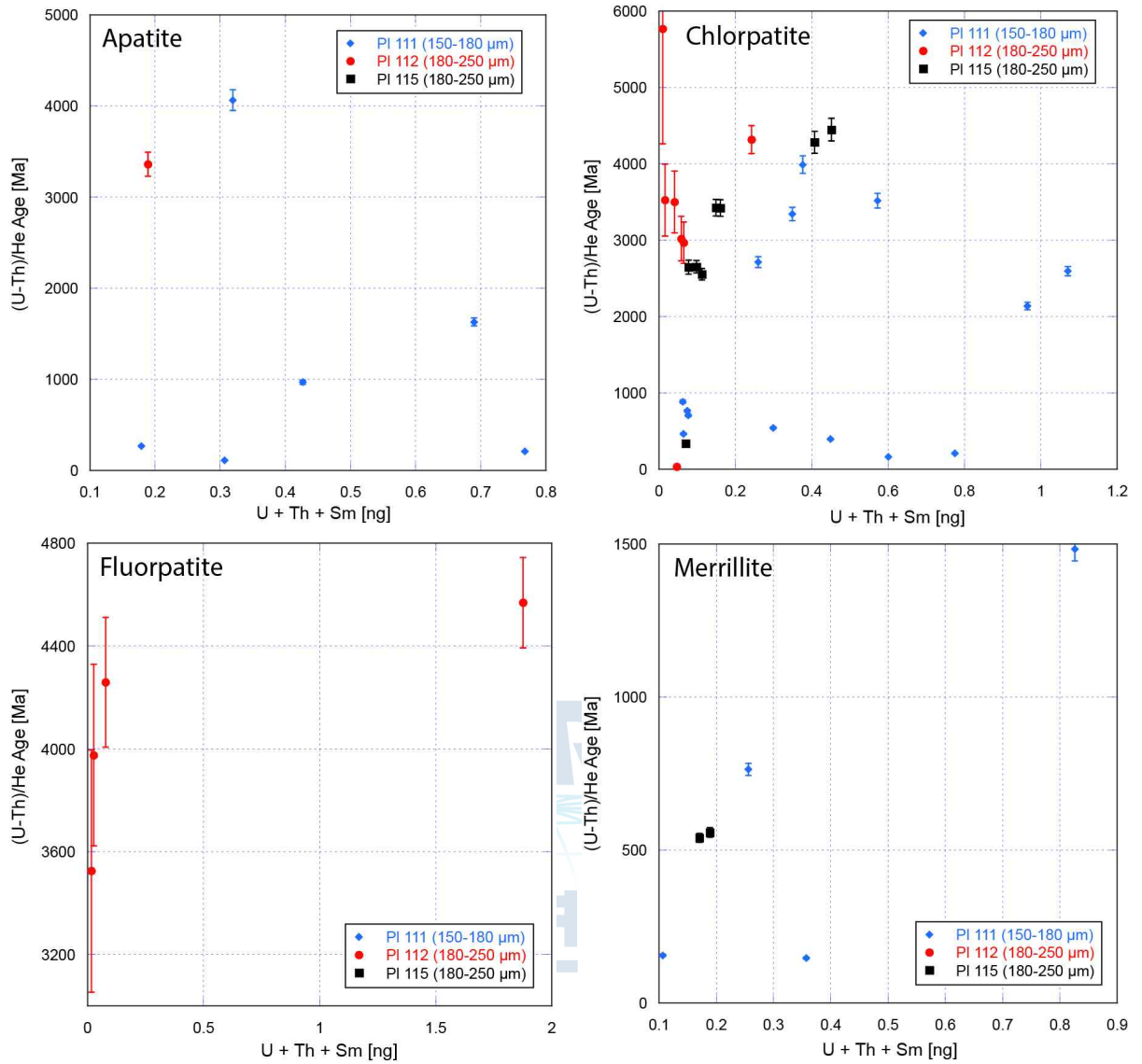


그림 9. TIL07012 운석내 인산염 집계의 단입자 (U-Th)/He 연령을 인산염의 종류에 따라 도시한 그림.

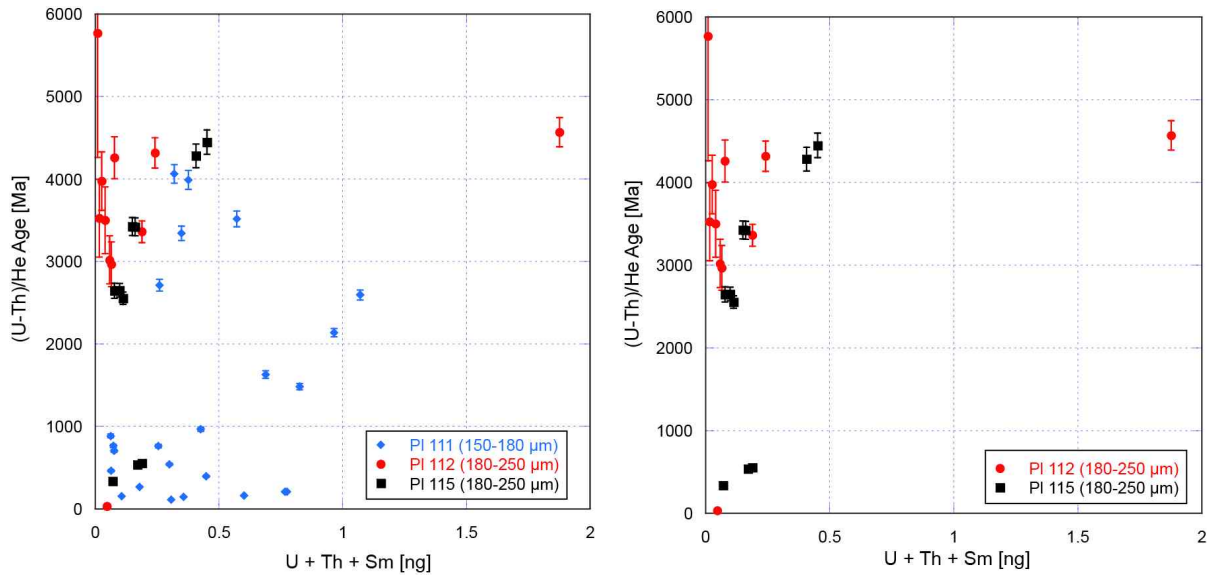


그림 10. TIL07012 운석내 인산염 집계의 단입자 (U-Th)/He 연령을 인산염 집계의 분리에 사용된 체(sieve)의 크기에 따라 도시한 그림. 왼쪽 그림은 모든 TIL07012 시료의 연령을, 오른쪽 그림은 시료의 크기가 큰 (180-250 μm) 시료의 연령만을 보여준다. 큰 시료의 분포가 전체적으로 높은 연령을 산출하는 것을 알 수 있다. 또한, 큰 시료의 경우 U+Th+Sm 양에 따라 연령이 증가하고, 연령의 분산이 감소하는 경향을 보이는데, 이는 의미있는 연령을 추정할 수 있는 전형적인 연령 분포이다.

그림 10 (왼쪽)은 모든 시료에 대한 상관관계를 도시한 그림이다. 그림 10 (오른쪽)은 PI 112, 115만을 도시한 그림이다. 위에 언급한 바와같이 큰 시료인 PI 112, 115만을 보면, U+Th+Sm 양이 비교적 작은 시료는 분산된 연령을, U+Th+Sm 양이 비교적 큰 시료에서는 집중된 연령 분포를 보인다. 만일 U+Th+Sm 양이 시료의 실제 크기를 반영한다고 가정하면, 이러한 결과는 180-250 μm 에 해당하는 인산염 집계 중에서도 인산염 입자의 크기가 큰 시료가 보다 높은 연령을 산출한다고 할 수 있다. 오차가 비이상적으로 큰 한 연령(5.769 ± 1.506 Ga)을 제외하면, 이러한 현상은 보다 두드러진다 (그림 10, 오른쪽). 이와 유사한 현상은 St. Severin 보통 구립 운석 (ordinary chondrite)의 연령-반경 관계에서도 발견되었다 (Min et al., 2013). 단 이전의 연구에서는 U+Th+Sm 값 대신 시료의 반경이 시료의 크기를 추정하는 척도로 쓰였다는 차이가 있다. 이러한 연령 분포를 볼 때, U+Th+Sm 양이 큰 시료의 연령이 보다 신빙성이 있다고 할 수 있다. U+Th+Sm 양이 큰 3개의 시료의 (U-Th)/He 연령의 가중평균 (weighted mean)은 4.447 ± 0.097 (1 σ) Ga이다. 이 값은 전체 연령 평균치인 1.600 ± 0.140 (1 σ) Ga 와 큰 차이가 있을 뿐 아니라, 커널 밀도 도표상에서 관찰되는 두 개의 연령 정상의 값과도 큰 차이를 보인다 (그림 8). 이번 연구를 통해서, 단순한 전체 연령 평균치나 연령 분포도에서 빈도가 높은 연령 보다도, 암석학-지구화학적으로 추론하여 도출된 연령 (4.447 ± 0.097 (1 σ) Ga)이 보다 행성학적 의미를 갖는 값이라는 것을 지시한다. 가장 의미있는 연령이라 생각되는 4.447 ± 0.097 Ga는 이전에 아카폴코 운석으로부터

유추한 연령인 4.538 ± 0.032 Ga (Min et al., 2003)과 유사하거나 약간 젊다. 위에 언급한 단순한 전체 연령 평균치는 고해상도 절대연령 측정 연구에, 연령 분포도에서 빈도가 높은 연령은 쇠철암 시료의 연구에서 흔히 쓰이는데, 이러한 접근방법은 운석 시료 연구에는 적용되지 않으며 운석의 경우 연령과 U+Th+Sm 양 혹은 입자 크기와 상관관계로부터 유추한 연령이 보다 의미가 있음을 확인하였다.

다. 열역사 모델링

연령의 분포를 해석하기 위해 (U-Th)/He 연령과 인산염 광물 반경과의 상관관계를 도시하였다 (그림 11). 그림 11 (왼쪽)은 모든 시료를 도시한 그림이다. 주목할 점은 모든 시료 반경 구간에 대해서, 가장 높은 연령은 큰 (180-250 μm) 시료에서 산출된다는 사실이다. 또한 작은 반경의 시료에서 산출된 연령이 큰 반경의 시료에서 산출된 연령에 비해 더 분산되는 현상이 보이지 않는다. 상관 관계를 보이지 않는 이러한 분포는 작은 (150-180 μm) 시료들이 알파 리코일 현상에 의해 He이 시료로부터 방출되었기 때문으로 추측된다.

그림 11 (오른쪽)은 보다 신빙성이 높다고 생각되는 큰 인산염 집계만을 도시한 그림이다. 이 경우 인산염의 반경이 증가함에 따라 연령 분산의 정도가 대략적으로 줄어드는 것을 알 수 있다. 이 그림에서도, 각 시료 반경 구간에서 비교적 넓은 연령 분포를 보이는데, 각 구간의 젊은 연령은 측정에 사용된 시료의 형태가 완벽한 반구 형태를 갖지 않기 때문에 원래 입자의 주변부에 해당하고, 따라서 원래 입자보다 평균 He의 농도가 낮기 때문이라는 가설을 세울 수 있다 (검은 반구 형태의 모형 참조). 이러한 가설은 더 확인되어야 하겠지만, 분명한 사실은 각 반경구간에서 가장 높은 연령은, 반경이 커질수록 증가한다는 것이다. 이러한 분포를 설명하기 위해, He 확산 모델링을 실시하였다. 동일한 열역사를 겪었을 경우 큰 입자가 보다 효과적으로 He을 보존하기 때문에, 입자의 반경과 (U-Th)/He 연령은 양의 상관관계를 보인다. 그림 6 (오른쪽)의 파선은 반경이 120 μm 인 입자에서 0.15% 와 3.2%의 He 확산 손실(He fractional loss)이 일어났을 경우의 이론적인 연령 분포를 도시한다. 각 반경 구간에서 가장 높은 연령들은 대부분 이 두 파선에 의해 잘 규제된다. 각 반경 구간의 가장 높은 연령이 반구에 해당하는 이론적인 형태에 가깝다는 가정을 할 경우, 이러한 모델링 결과는 실제 인산염 광물이 확산을 통한 He 손실은 0.15 - 3.2% 정도 일어났으리라 추정된다. 이보다 젊은 연령들은 모두 위에서 설명한 입자 주변부에 해당하거나, 알파 리코일에 의한 He 손실을 경험해서, 부정확한 연령을 산출한다고 해석할 수 있다.

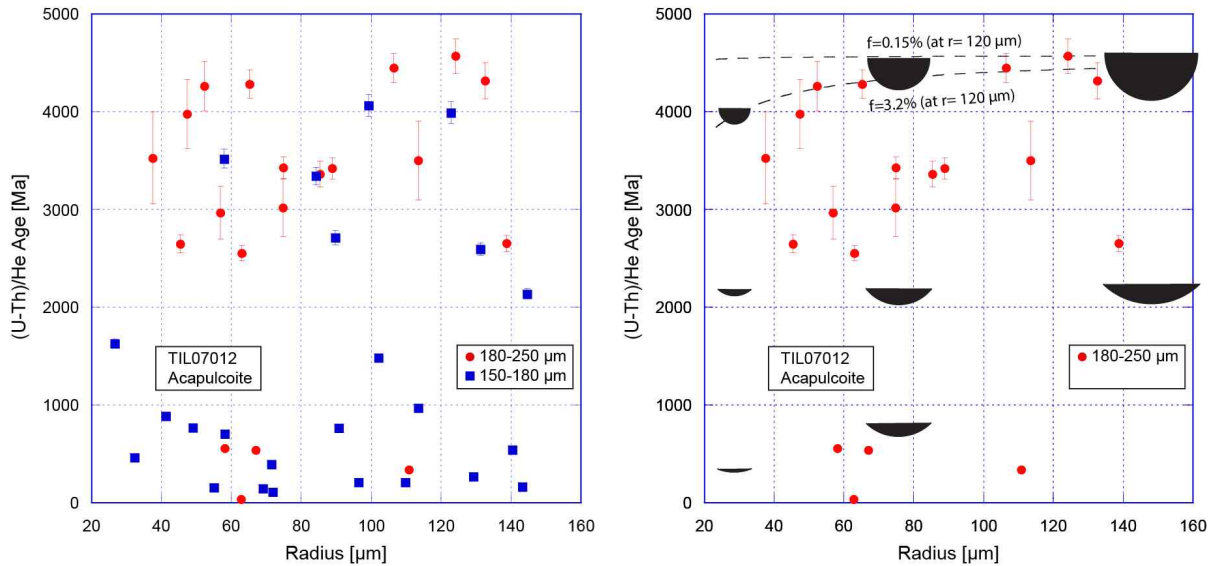


그림 11. TIL07012 연령과 인산염 입자 반경의 상관관계를 도시한 그림. 왼쪽 그림은 모든 시료의 결과를, 오른쪽 그림은 큰 입자(180-250 μm)를 가진 시료의 결과를 보여준다. X축은 주사전자 현미경으로 관찰한 화학 조성도를 이용해 측정된 인산염 입자의 면적과 동일한 면적을 가지는 원의 반경을 의미한다.

그렇다면, 이러한 He 확산 손실은 어떠한 행성학적 현상으로 설명할 수 있을까. 그림 12는 He 확산이 한번의 열적 작용에 의해 일어났다고 가정할 경우 그 열적 작용의 가열시간 (t) - 온도(T)의 상관관계를 도시한 그림이다. 파란색 음영으로 표시된 부분이 이번 연구로 측정된 He 확산 손실치(0.15-6.4%)에 해당하는 부분이다. 이러한 He 확산 손실은 단기간의 고온조건이나, 장기간의 저온 조건에서 일어날 수 있다. 따라서 He 자료만으로는 그 온도-가열 시간 조건을 규제하는데 한계가 있다. 그 조건을 보다 정확히 규제하기 위해서는 Ar 계와 같은 또다른 연령 측정법이 필요하다. 그림 12의 붉은선은 이러한 Ar 확산이 아카폴코아이트의 주요한 Ar 저장 광물인 사장석에서 일어난다고 가정했을 경우의 가열 시간-온도 조건을 보여준다. 정확한 Ar 확산 손실은 동일한 시료인 TIL07012에 대한 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연령측정이 이루어져야 알겠지만, 각각의 Ar 손실양에 따라 다양한 해석이 가능하다.

만일 아카폴코아이트의 K/Ar (혹은 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) 연령이 매우 높아 모암에서의 냉각에 해당하는 연령을 지시한다면, Ar 확산 손실치가 매우 낮게 된다. 실제 다른 아카폴코아이트에서 이러한 연령이 보고된 바 있다 (Renne, 2000). 이러한 경우 그림 12의 He 확산 손실선과 Ar 확산 손실선이 교차하게 된다면 그 교차점은 온도 조건은 상대적으로 높고 ($>300^\circ\text{C}$), 가열시간은 매우 짧은 조건을 지시한다. 이러한 조건은 그림 1에 도시한 여러 열적 작용중에, TIL07012이 지구대기를 통과할 때 겪는 온도-가열시간 조건과 가장 잘 부합한다. 따라서 이 운석의 He계는 지구 대기 진입 이전까지는 태양계 형성 초기에 해당

하는 (U-Th)/He 연령을 가지고 있다가, 지구대기 진입시 약간의 He 손실이 일어났으리라 추정된다. 이는 태양계 형성 초기 TIL07012가 모암이 비교적 빠른 냉각을 겪은 이후, 모암에서 분리되어 우주 궤도상에서 태양 주위를 돌며 지구로 접근하는 동안에는 온도 조건이 매우 낮았음을 의미한다. 운석의 우주공간 궤도변경이 매우 천천히 일어남을 고려할때, 궤도의 근일점 (perihelion)이 태양과의 거리가 일정거리 이상이 되었다는 점을 지시한다. 왜냐하면, 만일 근일점이 태양과 가까워 주기적인 가열이 이루어 졌다면, 총 가열 시간은 최소 수년이상 이르렀을 것으로 예상되고, 이러한 가열은 그림 12의 상관관계를 이용한 열역사 추정에서 매우 벗어나게 된다. 따라서 Ar 손실과 He 손실은 모두 이러한 지구 대기 마찰에 의한 가열로 설명될수 있다.



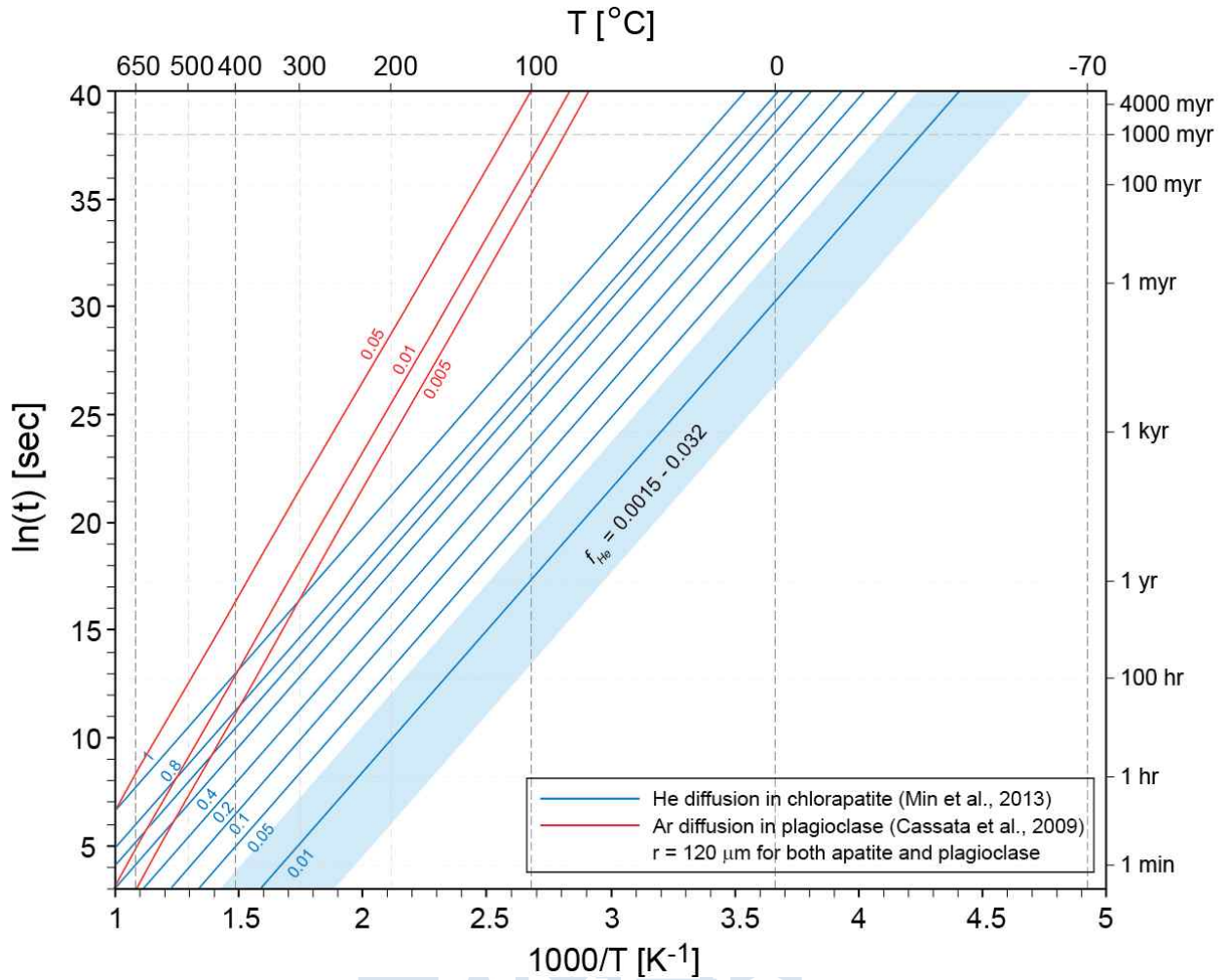


그림 12. 단일한 등가열 작용에 의한 He-Ar 확산손실량을 보여주는 그림. Y축은 가열시간을, X축은 가열온도를 의미한다. He 확산 손실량은 파란색으로 Ar 확산 손실량은 붉은색으로 표시하였다. 이번 연구에서 유추한 He 확산 손실량(~0.15-3.2%)에 해당하는 부분은 파란색 음영으로 표시하였다. Ar 확산 손실량은 동일한 시료에서 측정된바 없으나, 이전의 다른 아카폴코 운석의 경우 그 값이 매우 작다 (Renne, 2000). 만일 TIL07012의 Ar 확산 손실량도 매우 작다면 He-Ar 손실선의 교차점은 매우 짧은 고온의 열적 작용을 지시한다. 만일 Ar 확산 손실량이 비교적 높다면, He-Ar 손실선은 교차하지 않으며, 이는 최소 두번이상의 열적 작용이 일어났음을 지시한다.

만일 이 운석의 K/Ar (혹은 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) 연령이 ~1-5 %나 그 이상의 Ar 확산 손실을 지시한다면, Ar 확산 손실선과 He 확산 손실선이 만나지 않을 수 있으며, 이는 He 및 Ar의 확산이 단일 작용에 의해 일어난 것이 아니라 최소 두번 이상의 열적 작용에 기인하였음을 지시한다. 또한 이러한 두번 이상의 열적 작용이 모두 단기간의 고온에서만 일어났다면 역시 He손실선과 Ar손실선의 교차점이 정의되지 않는다. 따라서 최소한 한번의 열적 작용은 장기간 저온에서 일어났음을 추정할수 있다. 이러한 조건을 충족하는 자연현상은 우주궤도 이동중 태양열에 의한 가열이나 여러번의 충돌에 의한 가열이다. 하지만 아카폴코아이트는

충돌의 흔적이 발견되지 않고, 또한 다른 아카폴코아이트의 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연령이 매우 높은 사실로 미루어 보았을때, 이러한 가능성은 크지 않을것으로 예상된다.

라. 결론

이번 (U-Th)/He 연구의 결과는 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 자료가 첨부되어야 보다 신빙성있는 결론을 내릴수 있겠지만, 만일 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연령이 매우 높아 모암에서의 냉각시기를 지시한다면, 이 운석의 모암은 빠른 냉각을 겪었으며, 모암에서 방출된 후 우주 궤도 이동중 태양에서 상당히 멀어 저온의 상태를 유지했고, 지구대기 진입시 단기간의 고온 가열에 의해 He-Ar을 손실했음을 지시한다. 이보다 가능성은 작지만, 만일 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연령이 1-5 % 이상의 Ar 손실을 지시한다면, 이 운석은 모암에서 방출된후 근일점이 태양에서 상대적으로 가까운 우주궤도를 따라 이동했으며 부분적인 가열을 통해 Ar-He 확산이 일어났음을 지시한다.

3. EET14074

가. 주사전자 현미경 분석 결과

위에서 언급한 TIL07012의 인산염 광물에 대해 적용한 광물 판독 기준으로 EET14074 인산염 광물의 종류를 분류하였다. 37개의 인산염 광물 집계중 6개의 인회석, 11개의 Cl-인회석, 12개의 F-인회석, 8개의 메릴라이트를 확인하였다 (표 2). 대부분의 인산염 광물이 F-인회석이나 Cl-인회석이고, 비교적 소량의 인회석, 메릴라이트가 존재한다. 이는 위에 언급한 TIL07012에 비해 다소 많은 F-인회석을 가지고 있다는 차이를 보인다. 하지만 인회석과 메릴라이트의 양이 작다는 사실은 TIL07012나 아카폴코 운석과 동일하다 (Min et al., 2003). 구체적인 주사전자 현미경 분석결과는 부록2에 첨부되어 있다.

	No. Grains	%	No. Grains Yielded Ages > 4.0 Ga	Ages > 4.0 Ga
Apatite	6	16%	1	4.212 ± 1.089 Ga
Chlorapatite	11	30%	0	
Fluoapatite	12	21%	0	
Merrillite	8	22%	0	
Total	37		1	

표 2. EET14074 시료중 (U-Th)/He 연령측정에 사용된 인산염 광물 집계의 종류와 높은 연령값.

나. (U-Th)/He 연령 측정 결과

EET14074의 연구는 그 크기가 유사한 집계 시료들에 대해 시행되었는데, 그 연령 측정의 신빙성을 높이기 위해 시료군 1 (이름: Anderkin)과 시료군 2 (이름: Sheikh)로 나누어 실시하였다. 이 두 시료군은 서로 다른 연구자에 의해 분석이 이루어 졌으므로, 동일한 결과가 산출된다면 측정의 신빙성이 높다고 할수 있다. EET14074 시료의 (U-Th)/He 연령은 116.8 ± 145.7 (1 σ) Ma 에서 4212 ± 1089 Ma까지 넓은 분포를 보인다. 또한, 표 2에 기재한 바와같이 단 한개의 인회석 집계만이 4.0 Ga 보다 높은 연령을 산출하였는데, 이 연령도 매우 큰 오차를 가지고 있다. 전체적인 연령 분포를 커널 밀도 도표 (Kernel Density Plot)에 도시하여 보면, 그 분포의 정상이 ~2.5 Ga 부분에 해당하고, 가중 평균 연령은 708 Ma (MSWD = 313)이다. 따라서 EET14074 시료는 위의 TIL07012나 아카폴코 운석에 비해 매우 젊은 연령을 산출함을 알수있다.

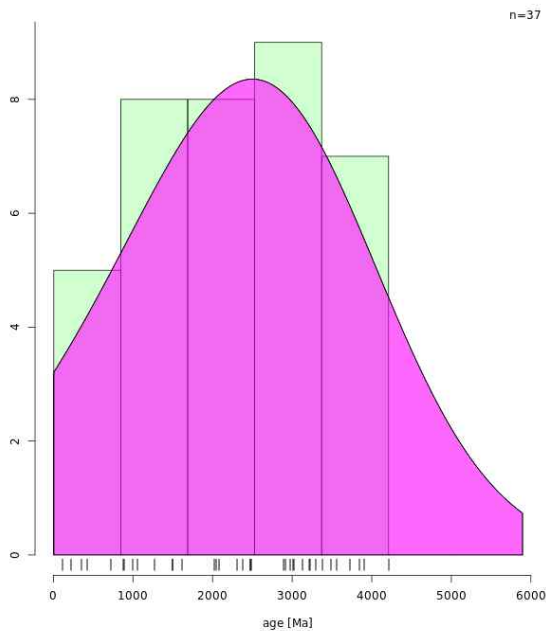


그림 13. EET14074 운석내 인산염 집계의 단일자 (U-Th)/He 연령을 도시한 커널 밀도 도표. 연령이 매우 넓게 분포하며 정규 분포(normal distribution)를 보인다.

각각의 인산염 광물중에 대해 연령과 U+Th+Sm 양 간의 상관관계를 도시하였다 (그림 14). 시료군 1과 2는 뚜렷한 차이를 보이지 않는다. F-인회석, Cl-인회석 그리고 메릴라이트는 U+Th+Sm 양이 증가할수록 보다 높고 집중된 연령분포를 보인다. 이러한 분포는 TIL07012 뿐 아니라 St. Severin, ALHA84001 운석등에서 관찰된 바와 매우 유사하다. 이러한 경우, 높은 U+Th+Sm 양 (혹은 큰 입자 반경)에 해당하는 연령이 보다 신빙성이 높다는 사실이 이전 연구에서 증명되었다. 모든 연령을 도시한 그림 15를 보면 이러한 관계가 더 명확하게 드러나는데, 이 시료의 의미있는 연령은 약 4 Ga 에 가까운 것으로 추

정된다. 이러한 연령은 TIL07012에 비해 상당히 낮은데, 이는 EET14074 운석이 보다 큰 He 확산 손실이 일어났음을 의미한다. 흥미로운 점은 가장 높은 연령인 4212 ± 1089 Ma 이 매우 낮은 U+Th+Sm 양을 가지는 시료에서 산출되었다는 점이다. 하지만 이 연령이 비이상적으로 큰 연령오차를 가지고 있어서, 그 측정 연령의 신빙성에 대한 보다 철저한 검증이 필요하다고 할수있다.

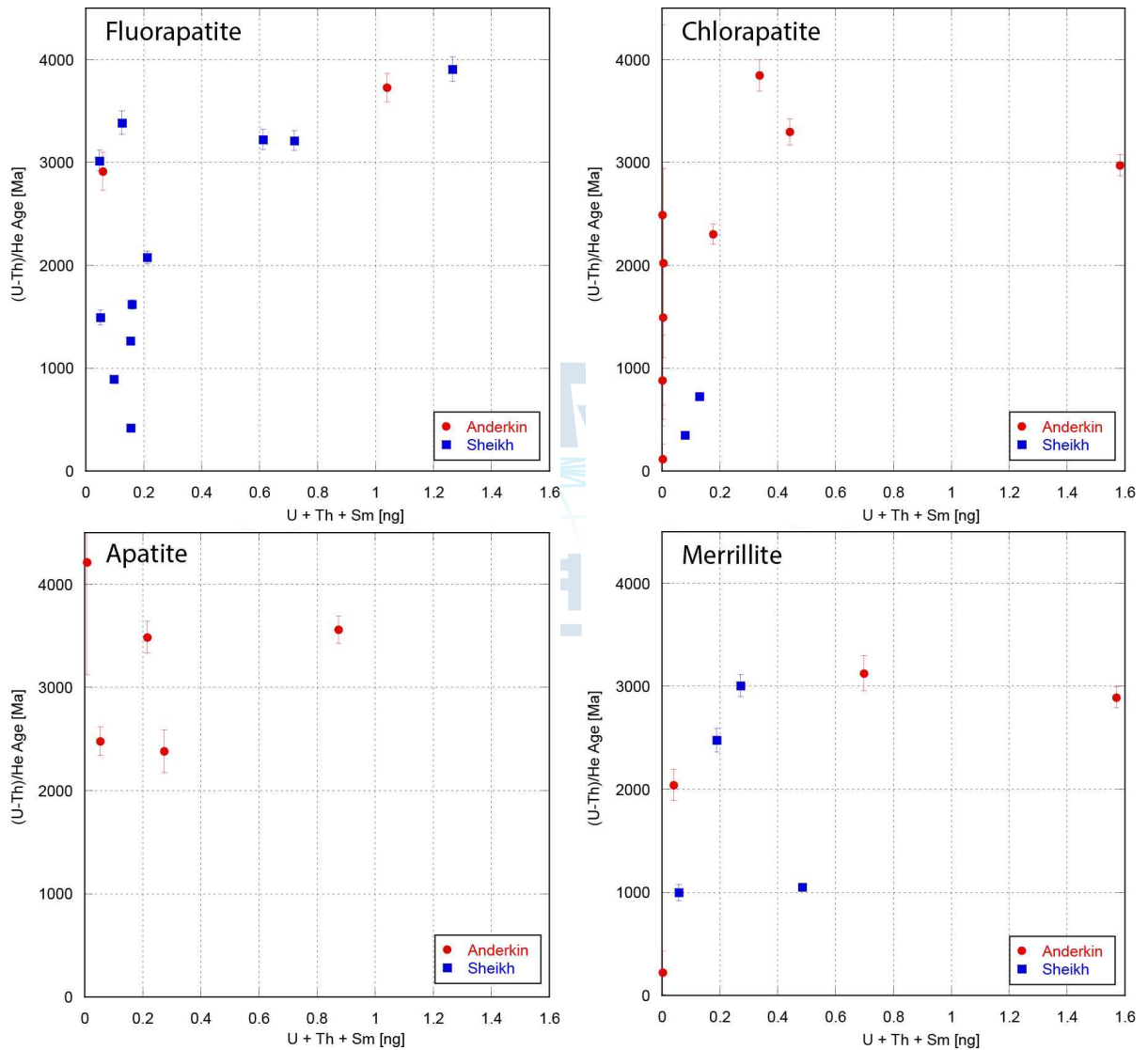


그림 14. EET14074 운석내 인산염 집계의 단입자 (U-Th)/He 연령을 인산염의 종류에 따라 도시한 그림. 시료군 1 (이름: Anderkin)과 시료군 2 (이름: Sheikh)는 서로 다른 연구자에 의해 분석이 이루어졌으며, 그 결과는 차이를 보이지 않는다.

메릴라이트 시료의 연령은 그 평균치와 최고 연령이 다른 세 광물군 시료에 비해 매우 낮다. 이러한 사실은 TIL07012의 결과와 일치하며, 이는 아카폴코아이트의 경우 보다 높

은 연령을 얻기 위해서는 메릴라이트보다 인회석군 시료가 유리하다는 사실을 의미한다. Min et al. (2013)은 Guarena 운석내에 산출하는 메릴라이트와 Cl-인회석에 대한 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 다단계 가열실험을 통해 메릴라이트가 Cl-인회석보다 높은 폐쇄온도를 가지고 있음을 밝혔으며, 비교적 천천히 냉각한 St. Severin LL6 보통 구립 운석의 메릴라이트의 연령이 인회석군 광물 보다 높다는 사실을 규명하였다. 하지만 이번에 연구한 TIL07012 나 EET14074에서는 메릴라이트 연령이 인회석군 보다 낮는데, 이는 아마도 메릴라이트가 인회석군에 비해 작은 확산 도메인을 가지고 있기 때문으로 추정된다. 또한 아카폴코 아이트의 경우 빠른 냉각을 겪었기 때문에 메릴라이트와 인회석군의 냉각 연령이 거의 동일할 것으로 예상되는바, 밝혀진 연령 역전 현상이 비교적 작은 확산 도메인 차이에 의해서도 일어날수 있음을 지시한다.

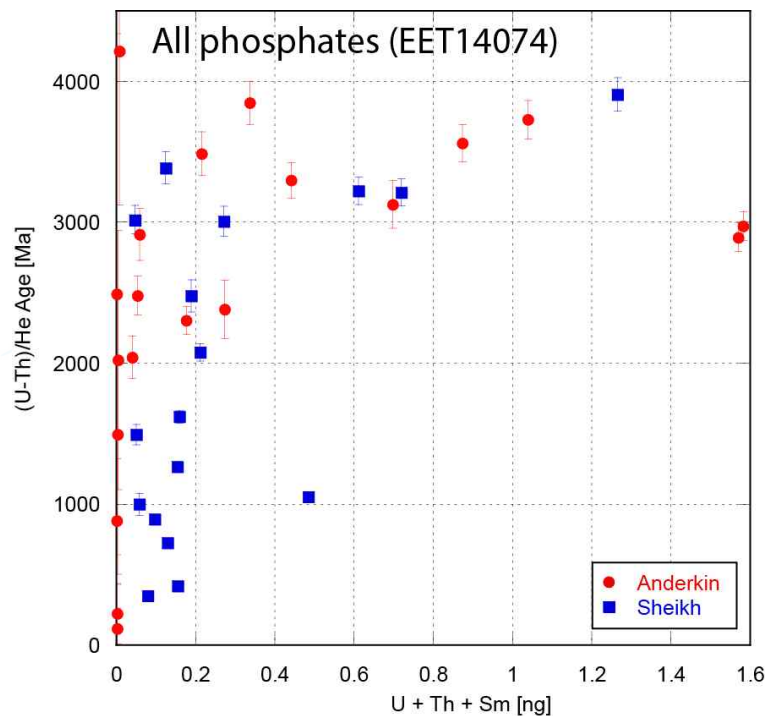


그림 15. EET14074 운석내 인산염 집계의 단입자 (U-Th)/He 연령을 도시한 그림. U+Th+Sm 양이 커질수록 연령이 증가하고, 연령의 분산이 감소하는 경향을 보이는데, 이는 의미있는 연령을 산출할수 있는 전형적인 연령분포이다. 예외적으로 가장 높은 연령이 매우 낮은 U+Th+Sm 양에서 산출하는데, 이 연령은 큰 오차를 가지고 있어 자료의 신빙성이 의심된다.

다. 열역사 모델링

EET14074 연령 분포의 의미있는 해석을 위해 연령과 인회광물 입자 반경과의 상관 관계를 도시하였다 (그림 16). 입자 반경은 주사전자 현미경으로 관찰된 인산염 입자의 면적과 동일한 면적을 가지는 원의 반경을 의미한다. 주사전자 현미경으로는 인산염 집계내

에 부분적으로 드러난 인산염 광물의 2 차원적 표면만 관찰할수 있으므로, 이러한 표면적으로부터 전체 인산염 광물의 3 차원적 크기를 추정할수 있는지에 대해서는 논란이 있다. 하지만 이러한 접근방법은 U+Th+Sm 양으로 부터 인산염 광물의 크기를 추정하는 방법과 함께 흔히 쓰인다. U+Th+Sm 양으로 부터 인산염 광물의 크기를 추정하는 방법 역시 인산염 광물내 U, Th, Sm의 농도가 모든 시료에 대해 동일하다는 가정이 필요하기 때문에 완벽하다고 할수 없다. 따라서 이 두가지 방법을 모두 이용해 인산염 광물의 크기를 추정을 하는 것이 가장 현실적이라 할수 있다.

그림 16에 도시한 바와 같이 입자 반경이 증가함에 따라 측정된 (U-Th)/He 연령도 증가하며, 연령의 분산은 줄어드는 경향을 보인다. 이러한 경향은 위에 언급한 연령과 U+Th+Sm 양의 상관 관계와 매우 유사하다. 따라서, 입자 반경과 U+Th+Sm 양이 인산염 입자의 상대적인 크기를 유추하는데 유용하게 쓰일수 있다. 각 인산염 입자 반경 구간에서의 넓은 연령 분포가 관찰되는데, 낮은 연령을 산출한 시료는 원래 입자의 주변부에 해당하고 (검은 반구 형태의 모형 참조), 따라서 원래 입자보다 평균 He의 농도가 낮기 때문이라고 유추할수 있다. 한개의 신빙성이 의심되는 예외적인 연령을 제외하면 (4212 ± 1089 Ma), 각 반경구간에서 가장 높은 연령은, 반경이 커질수록 대체로 증가하는 경향을 보인다. 이러한 분포는 TIL07012의 연령분포와 매우 유사하다. 동일한 방법을 적용해서 He 손실양(He fractional loss)을 계산해 보면 약 14.8%에 해당한다. 이러한 손실 곡선은 100-120 μm 입자 크기 구간의 가장 높은 연령을 통과한다. 이보다 작은 입자 크기 구간의 최고 연령은, 이러한 He손실 곡선보다 낮은 값을 가지는데, 이는 아마도 측정에 사용된 인산염 광물 시료가 원래 입자의 중앙부까지 도달하지 못했기 때문으로 생각된다. 즉, 만일 원래 입자가 완벽한 구의 형태를 가지고 있었다고 가정하고, 연령측정에 사용된 시료가 반구에 해당하면 그 연령이 He 손실 곡선과 일치하게 된다. 만일, 연령측정에 사용된 인산염 광물 시료가 반구보다 작다면, 그 연령이 He 손실 곡선보다 낮게 된다. 또한 TIL07012의 자료해석에 설명된 바와 같이 알파 리코일도 낮은 연령을 산출하는 원인이 될수있다. 어느 경우던 간에, 각 입자 크기 구간에서가장 높은 연령이 행성학적 의미를 갖는다고 해석 할수 있다.

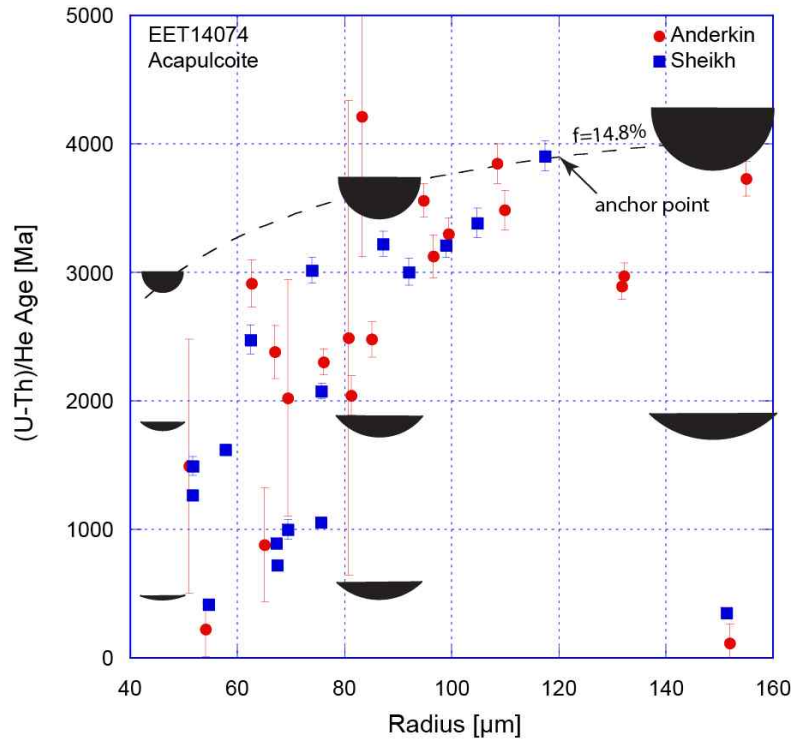


그림 16. EET14074 연령과 인산염 입자 반경의 상관관계를 도시한 그림. 두 연구자 (Anderkin, Sheikh)에 의해 분석된 자료는 동일한 경향을 보인다. 대체로 입자 반경이 커짐에 따라 연령이 증가한다. 파선은 각 입자 구간에서 가장 높은 연령을 설명하기 위해 등가열 He 확산으로부터 계산한 이론적인 연령-입자반경 상관관계 곡선이다. 각 입자 반경 구간에서 많은 낮은 연령들은 알파 리코일 현상이나 입자 주변부의 낮은 He 농도로 설명할 수 있다. X축 (인산염 입자 반경)은 주사전자 현미경으로 관찰한 화학 조성도를 이용해 측정된 인산염 입자의 면적과 동일한 면적을 가지는 원의 반경을 의미한다.

라. 결론

모암에서의 빠른 냉각 후, 이러한 He 손실을 유발할 수 있는 열적 작용에는 모암에서 방출될 시 충격에 의한 가열, 우주궤도 이동 중 또 다른 충돌에 의한 가열, 우주궤도 이동 중 태양열에 의한 가열, 지구 대기 통과 시의 가열 등을 생각할 수 있다 (그림 1). 이 시료의 경우 He 손실량이 높기 때문에 가열 시간-가열 온도 관계도에서 그 He 손실선이 Ar 손실선과의 교차할 가능성이 TIL07012에 비해 매우 높다. 이때 그 교차점은 단기간의 고온 가열을 의미하며, 이러한 조건을 충족하는 자연현상은 지구 대기 통과 시의 마찰열에 의한 가열이다. 따라서 EET14074 운석 역시 모암에서 방출된 이후 태양에서 비교적 먼 우주궤도를 따라 이동한 후, 지구 대기 통과 시 부분적인 He-Ar 손실이 일어났을 것으로 추정된다. 보다 자세한 규제를 위해서는 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 자료와 함께 해석하는 연구가 필요할 것이다.

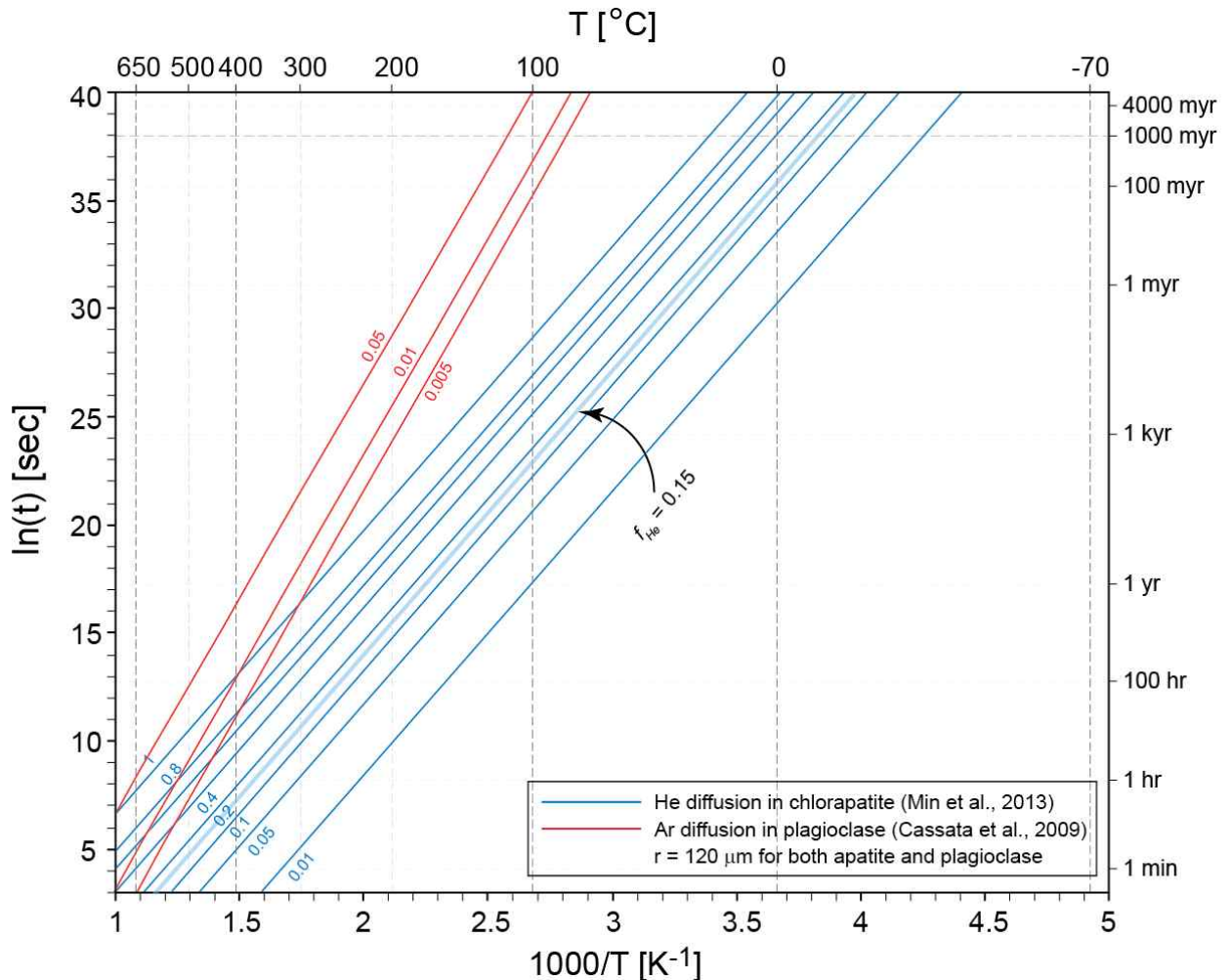


그림 17. 단일한 등가열 작용에 의한 He-Ar 확산 손실량을 보여주는 그림. Y축은 가열시간을, X축은 가열온도를 의미한다. He 확산 손실량은 파란색으로 Ar 확산 손실량은 붉은색으로 표시하였다. 이번 연구에서 유추한 He 확산 손실량(~15%)에 해당하는 부분은 파란색 음영으로 표시하였다. Ar 확산 손실량은 동일한 시료에서 측정된바 없으나, 이전의 다른 아카폴코 운석의 경우 그 값이 매우 작다 (Renne, 2000). 만일 EET07014의 Ar 확산 손실량도 매우 작다면 He-Ar 손실선의 교차점은 매우 짧은 고온의 열적작용을 지시한다. 이러한 열적 작용은 지구 대기 통과시의 마찰열에 의한 가열이다.

마. 연구의 성과 및 중요성

이번 연구를 통해 아카폴코아이트 내 인산염 광물 집계의 단입자 (U-Th)/He 연령을 측정하였고, 그 시료의 암석학적 특성을 주사전자 현미경으로 관찰하였다. 측정된 매우 넓은 연령의 분포는 알파입자의 불균등한 손실이나 He 확산에 유래한다고 해석하였다. 이러한 해석은 한 운석시료에 대해 비교적 많은 연령이 측정되었을때 의미있는 연령치를 구할수 있음을 증명하였다. 각 입자 크기 구간에서 가장 높은 연령이 행성학적으로 의미

가 있으며, 이러한 가장 높은 연령-입자 크기의 상관 관계로부터 He 확산 손실량을 추정하였으며, 이러한 값이 어떻게 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연령과 함께 행성학적 현상을 밝히는데 쓰일수 있는지 그 예를 제시하였다. 그간 연구실에서 측정된 다른 운석의 (U-Th)/He 연령이 단지 분산이 심하다는 이유로 흔히 무시되었는데, 이번 연구는 이러한 연령의 분산도 많은 연령이 측정된다면 의미있는 결론을 도출할수 있다는 근거를 제시하였다. 이번 연구에서는 두개의 아카폴코아이트가 모암에서 방출된 이후 비교적 저온에서 우주 궤도를 따라 이동하다가, 지구 대기 통과시 마찰열에 의한 가열로 He-Ar 손실이 일어났음을 제안하였다. ALH84001 화성운석에서도 태양열에 의한 가열효과는 미미하다는 동일한 결론이 도출된바 있다 (Min and Reiners, 2007). 따라서 운석의 (U-Th)/He 계가 태양열에 의해 교란될수 있다는 검증되지 않은 가설은 더욱 그 가능성이 희박하다고 추정된다.



제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

이번 연구의 목표는 우선 운석 시료에 대해 의미있는 단입자 (U-Th)/He 연령을 구하는 것이고, 이러한 연령의 분포를 행성학적 과정으로 설명하는 것이었다.

운석의 단입자 (U-Th)/He 연령 측정은 다음의 두가지 어려운 점이 있다. 첫째는 과연 그 측정된 연령이 실제 연령 (true age)이나 하는 점이다. 즉, 만일 이러한 시료의 in-situ 분석이 가능하다면 (현재의 기술로는 불가능함), 과연 동일한 연령을 산출할 것이가에 대한 의문이다. 이러한 문제는 운석내 분포하는 인산염의 산상과 밀접한 관련이있다. 위에 언급한 바와 같이, 운석시료의 경우 인산염이 매우 불규칙적으로 산출하고, 사용가능한 운석시료의 양이 매우 제한적이기 때문에, 인산염을 자연산상으로 분리하는 것은 불가능하다. 이러한 시료의 경우 인산염 집계가 원래 인산염의 일부분만을 포함하고게 되고, 따라서 그 측정된 연령이 전체 인산염 입자의 연령과 다를수 있다. 또한, 인산염 집계는 인산염 이외의 광물과 혼재하기 때문에 알파입자의 손실이 집계마다 다를수 있다.

두번째 문제점은, 만일 측정된 연령이 그 시료의 실제 연령이라면 그 의미를 해석함에 있어 확산 도메인의 크기를 어떻게 규정할 것인가 하는 점이다. 위에 언급한 바와 같이 열역사 모델링에 확산 도메인의 크기가 매우 중요하기 때문이다. 특히 화성지각에서 강한 충돌을 경험한 화성운석의 경우 내부에 수많은 균열면이 형성되게 되고 이러한 결정학상의 불규칙한 면은 He이 확산할수 있는 경로가 된다. 이러한 복잡한 시료의 확산 도메인을 규정하는 일은 어려운 작업이다.

이번 연구를 통해, 이러한 두가지 문제점을 극복하기 위한 기술적인 방안과 측정자료의 가능한 해석 방법을 제시하였다. 이번 연구는 이후 운석의 연구 뿐만 아니라 (U-Th)/He연령측정 및 전반적인 해석에 도움을 주리라 평가한다.

제 5 장 참고문헌

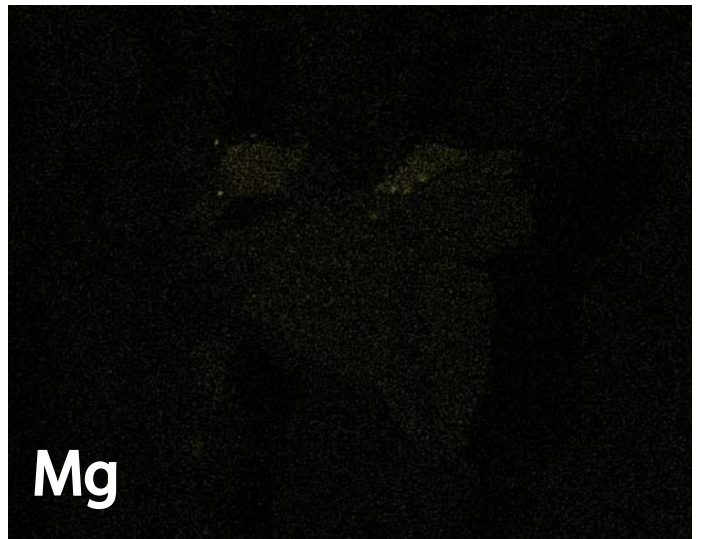
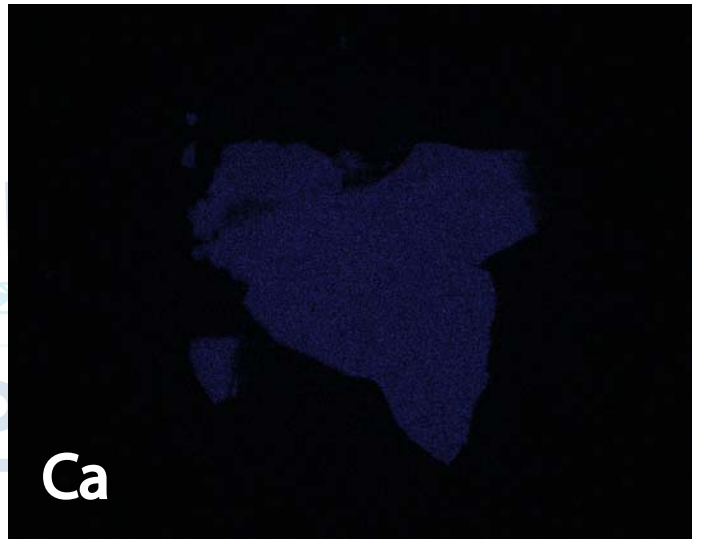
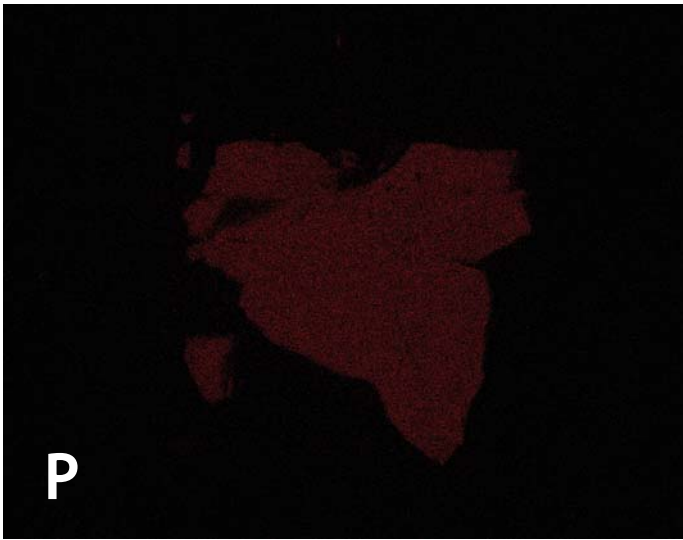
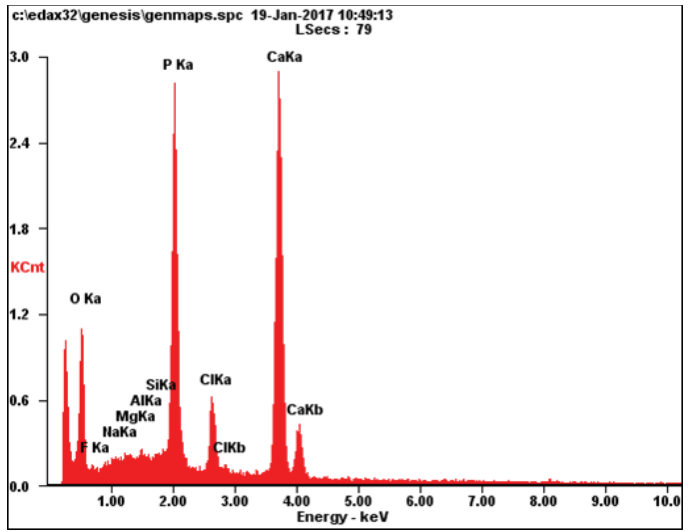
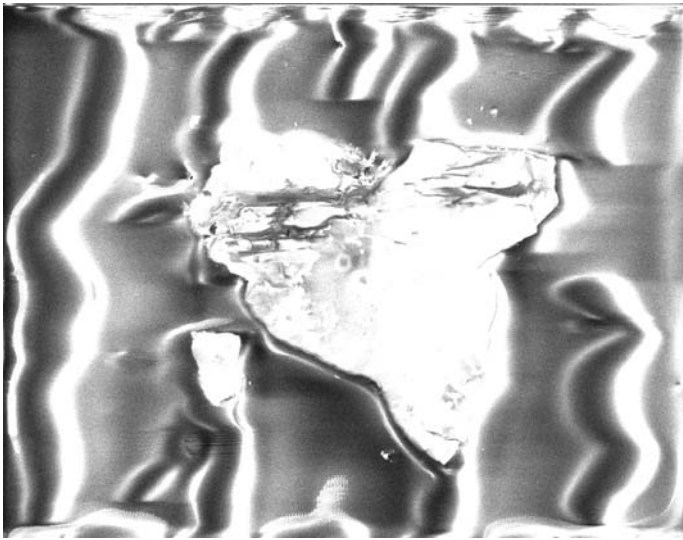
- Artemieva, N. and Ivanov, B. A., 2004. Launch of Martian meteorites in oblique impacts. *Icarus* 171, 84-101.
- Ash, R. D., Knott, S. F., and Turner, G., 1996. A 4-Gyr shock age for a Martian meteorite and implications for the cratering history of Mars. *Nature* 380, 57-59.
- Boehnke, P. and Harrison, T. M., 2016. Illusory Late Heavy Bombardments. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113, 10802-10806.
- Bogard, D. D., 1995. Impact ages of meteorites: A synthesis. *Meteoritics* 30, 244-268.
- Bogard, D. D., Nyquist, L. E., and Johnson, P. J., 1984. Noble gas contents of shergottites and implications for the Martian origin of SNC meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 48, 1723-1739.
- Chapman, C. R., Cohen, B. A., and Grinspoon, D. H., 2007. What are the real constraints on the existence and magnitude of the late heavy bombardment? *Icarus* 189, 233-245.
- Choi, B.-G., Park, C. G., Ahn, I., and Lee, J. I., 2009. Classification and petrological and geochemical characteristics of Antarctic meteorites found by 1st, 2nd and 3rd KOREAMET. *Journal of the Geological Society of Korea* 45, 593-605.
- Foucher, F., Westall, F., Brandstätter, F., Demets, R., Parnell, J., Cockell, C. S., Edwards, H. G. M., Bény, J.-M., and Brack, A., 2010. Testing the survival of microfossils in artificial martian sedimentary meteorites during entry into Earth's atmosphere: The STONE 6 experiment. *Icarus* 207, 616-630.
- Fritz, J., Artemieva, N., and Greshake, A., 2005. Ejection of Martian meteorites. *Meteoritics and Planetary Science* 40, 1393-1411.
- Gladman, B., 1997. Destination: Earth. *Martian Meteorite Delivery*. *Icarus* 130, 228-246.
- Kring, D. A. and Cohen, B. A., 2002. Cataclysmic bombardment throughout the inner solar system 3.9-4.0 Ga. *Journal of Geophysical Research* 107, 4-1-4-6.
- Melcher, C. L., 1979. Kirin meteorite: Temperature gradient produced during atmospheric passage. *Meteoritics* 14, 309-316.
- Min, K., Farah, A. E., Lee, S. R., and Lee, J. I., 2017. (U-Th)/He ages of phosphates from Zagami and ALHA77005 Martian meteorites: Implications to shock temperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 196, 160-178.
- Min, K., Farley, K. A., Renne, P. R., and Marti, K., 2003. Single grain (U-Th)/He ages from phosphates in Acapulco meteorite and implications for thermal history

- Earth and Planetary Science Letters 209, 323–336.
- Min, K. and Reiners, P. W., 2007. High-temperature Mars-to-Earth transfer of meteorite ALH84001. *Earth and Planetary Science Letters* 260, 72–85.
- Min, K., Reiners, P. W., and Shuster, D. L., 2013. (U-Th)/He ages of phosphates from St. Séverin LL6 chondrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 100, 282–296.
- Morbidelli, A. and Gladman, B., 1998. Orbital and temporal distributions of meteorites originating in the asteroid belt. *Meteoritics and Planetary Science* 33, 999–1016.
- Nyquist, L. E., Bogard, D. D., Shih, C.-Y., Greshake, A., Stöffler, D., and Eugster, O., 2001. Ages and geologic histories of Martian meteorites *Space Science Review* 96, 105–164.
- Pellas, P. and Storzer, D., 1981. ^{244}Pu fission track thermometry and its application to stony meteorites. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A* 374, 253–270.
- Renne, P. R., 2000. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of plagioclase from Acapulco meteorite and the problem of systematic errors in cosmochronology. *Earth and Planetary Science Letters* 175, 13–26.
- Schultz, L. and Franke, L., 2004. Helium, neon, and argon in meteorites: A data collection. *Meteoritics and Planetary Science* 39, 1889–1890.
- Schwenzer, S. P., Fritz, J., Stöffler, D., Trieloff, M., Amini, M., Greshake, A., Herrmann, S., Herwig, K., Jochum, K. P., Mohapatra, R. K., Stoll, B., and Ott, U., 2008. Helium loss from Martian meteorites mainly induced by shock metamorphism: Evidence from new data and a literature compilation. *Meteoritics and Planetary Science* 43, 1841–1859.
- Shuster, D. L. and Weiss, B. P., 2005. Martian surface paleotemperatures from thermochronology of meteorites. *Science* 309, 594–597.
- Stöffler, D., Bischoff, A., Buchwald, U., and Rubin, A. E., 1988. Shock effects in meteorites. In: Kerridge, J. F. and Mathews, M. S. Eds.), *Meteoritics and the early solar system*. University of Arizona Press, Tucson.
- Trieloff, M., Jessberger, E. K., Herrwerth, I., Hopp, J., Fiéni, C., Ghélis, M., Bourot-Denise, M., and Pellas, P., 2003. Structure and thermal history of the H-chondrite parent asteroid revealed by thermochronometry. *Nature* 422, 502–506.
- Turner, G., Huneke, J. C., Podosek, F. A., and Wasserburg, G. J., 1971. ^{40}Ar - ^{39}Ar ages and cosmic ray exposure ages of Apollo 14 samples. *Earth and Planetary Science Letters* 12, 19–35.

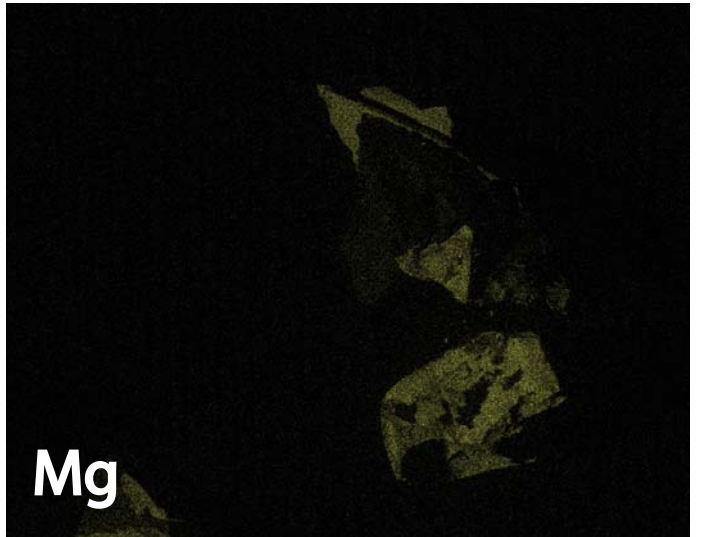
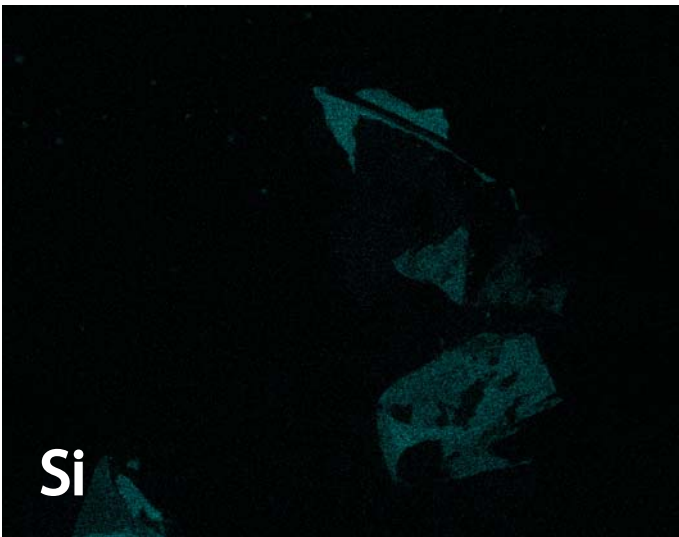
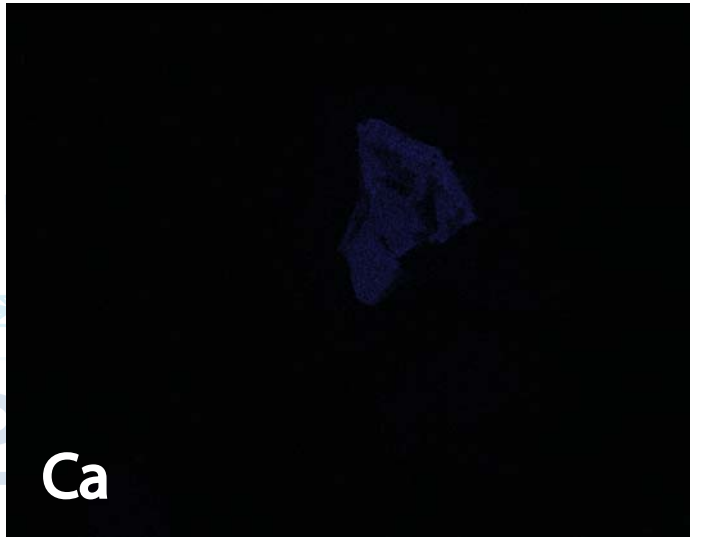
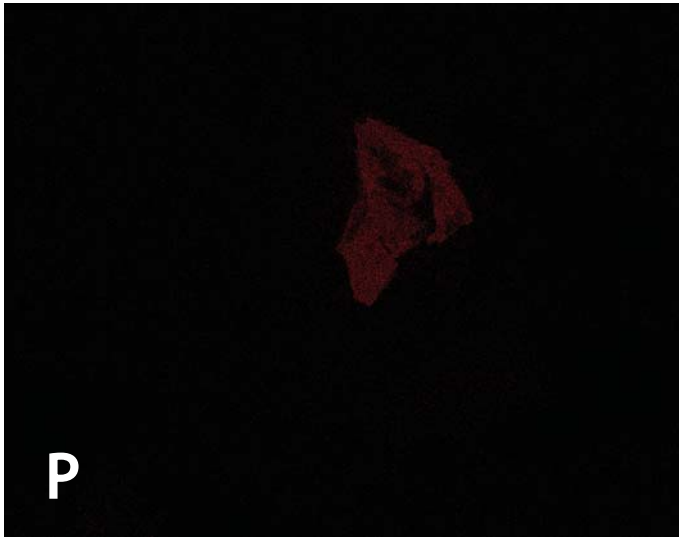
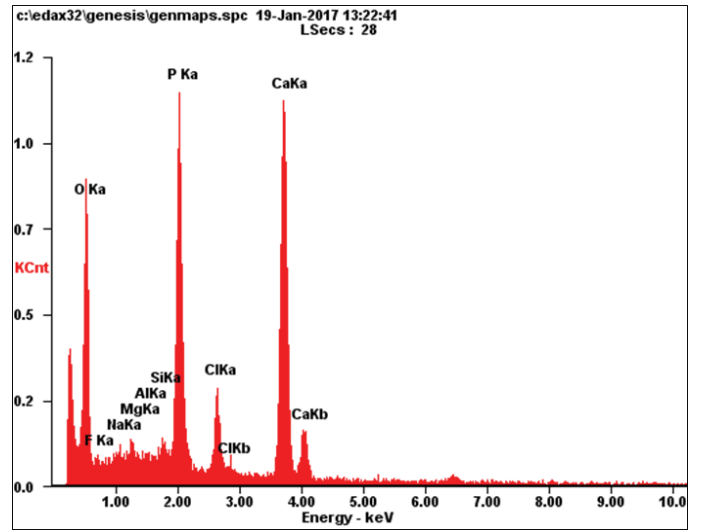
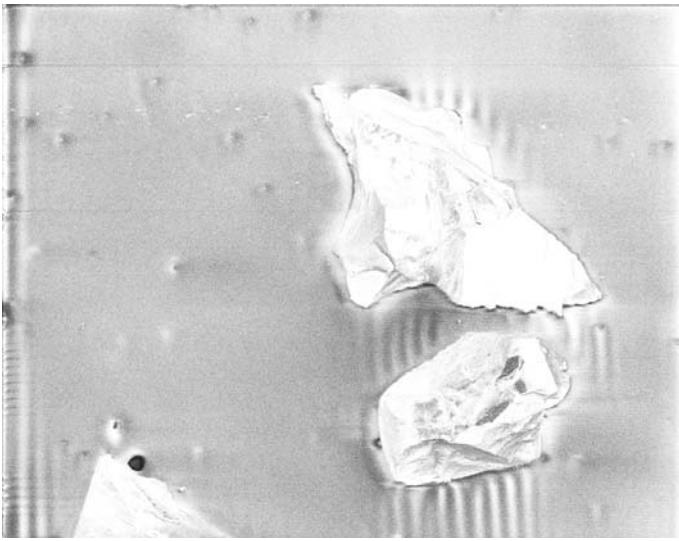
- Vermeesch, P., 2012. On the visualisation of detrital age distributions. *Chemical Geology* 312-313, 190-194.
- Wasson, J. T. and Wang, S., 1991. The histories of ordinary chondrite parent bodies: U, Th-He age distributions. *Meteoritics* 26, 161-167.
- Weisberg, M. K., Smith, C., Herd, C., Haack, H., Yamaguchi, A., Aoudjehane, H. C., Welzenbach, L., and Grossman, J. N., 2010. The Meteoritical Bulletin, No. 98, September 2010. *Meteoritics & Planetary Science* 45, 1530-1551.



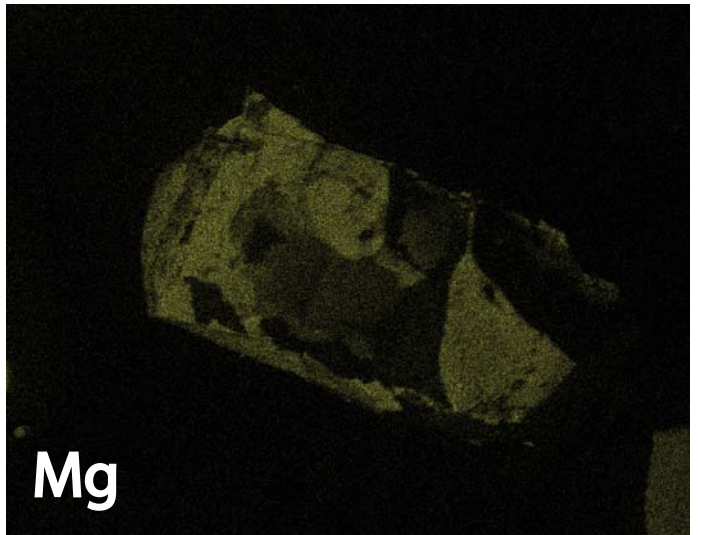
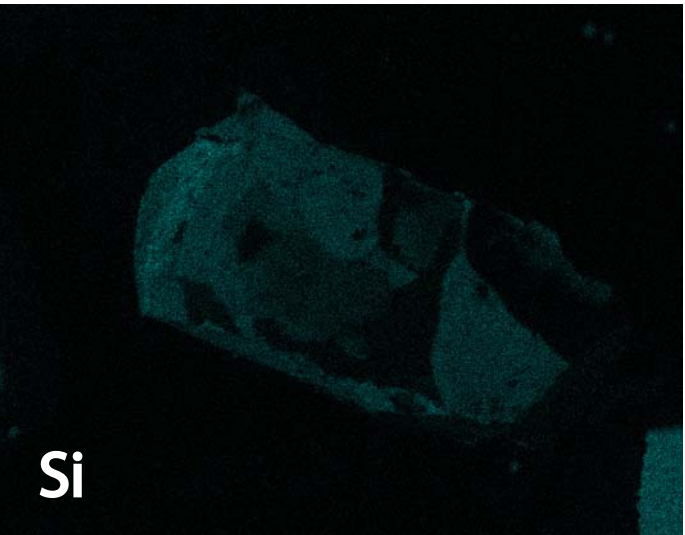
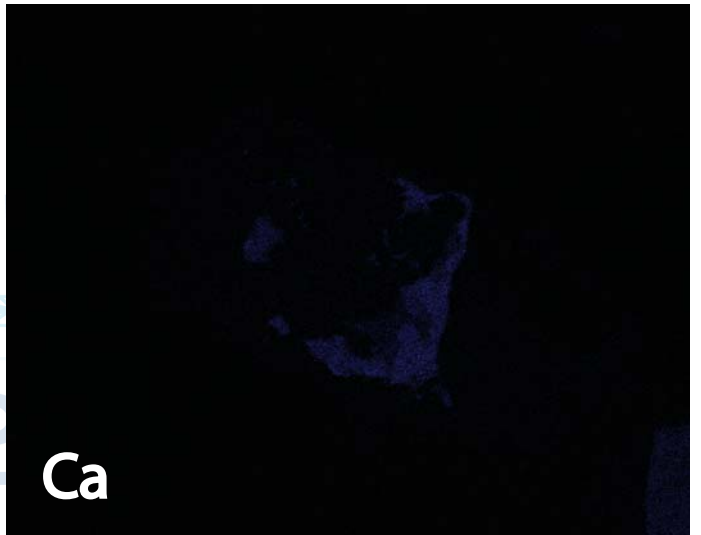
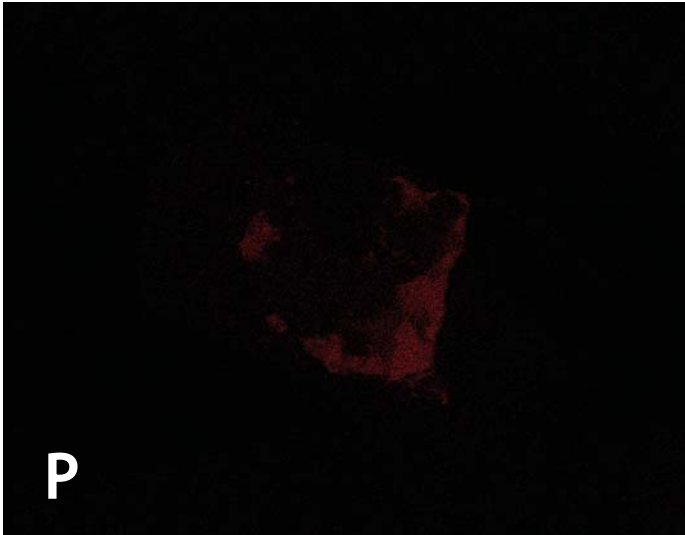
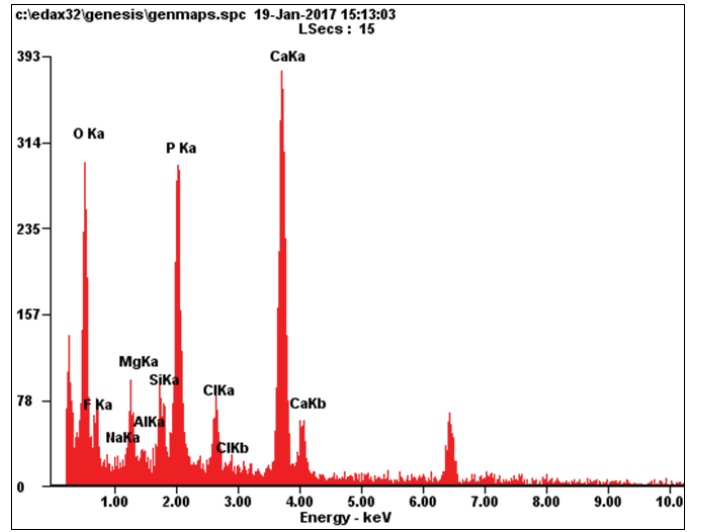
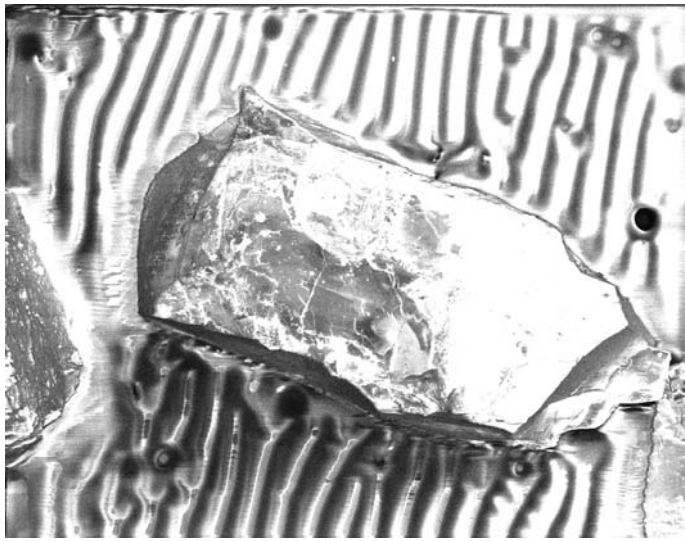
TIL07012 U1-5-1



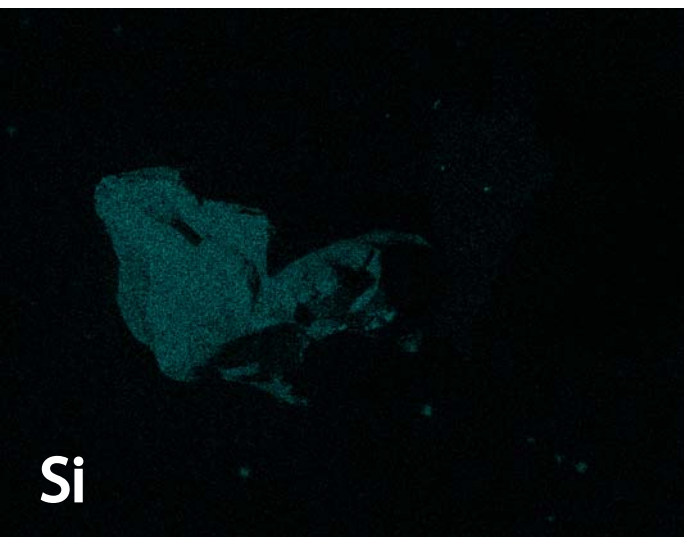
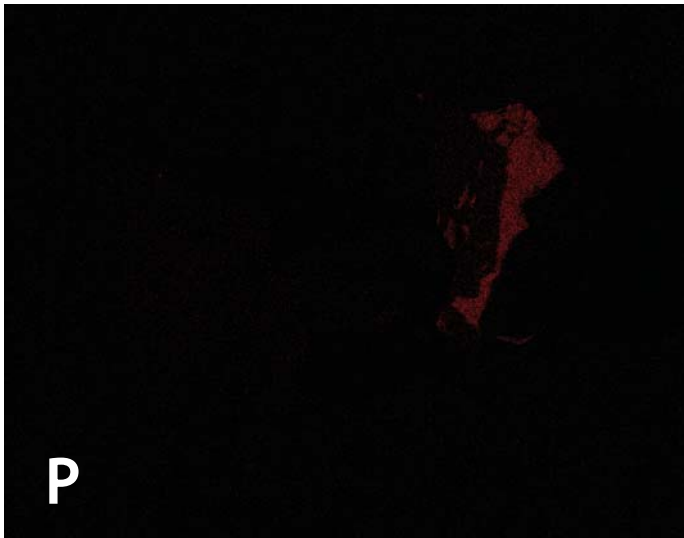
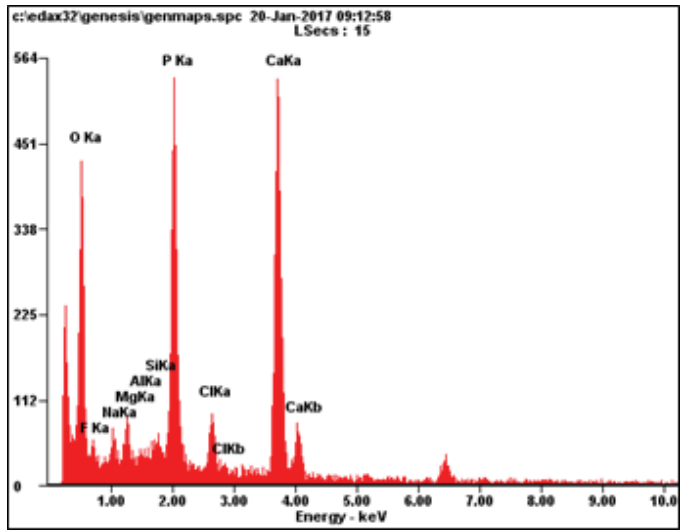
TIL07012 U2-2-1



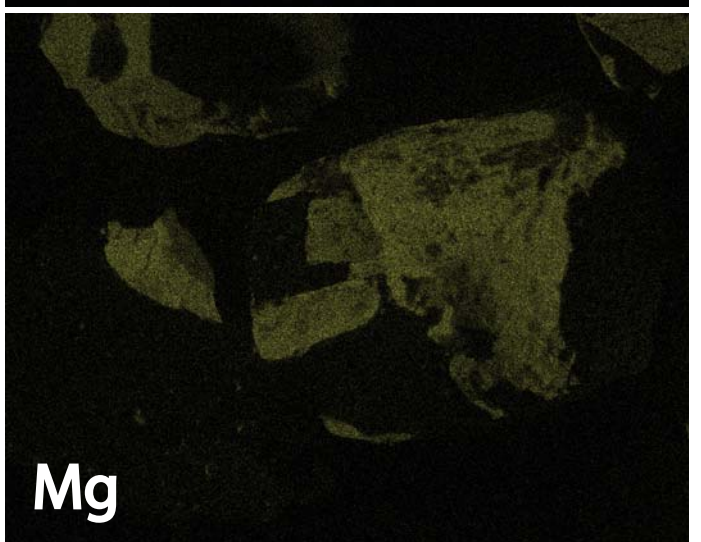
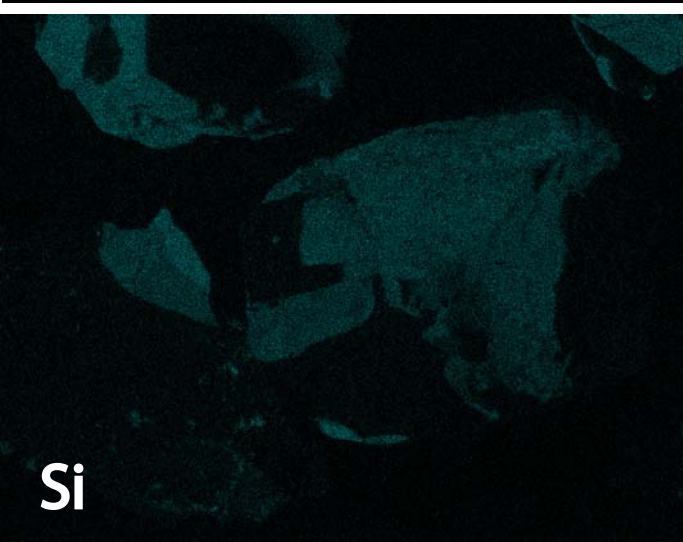
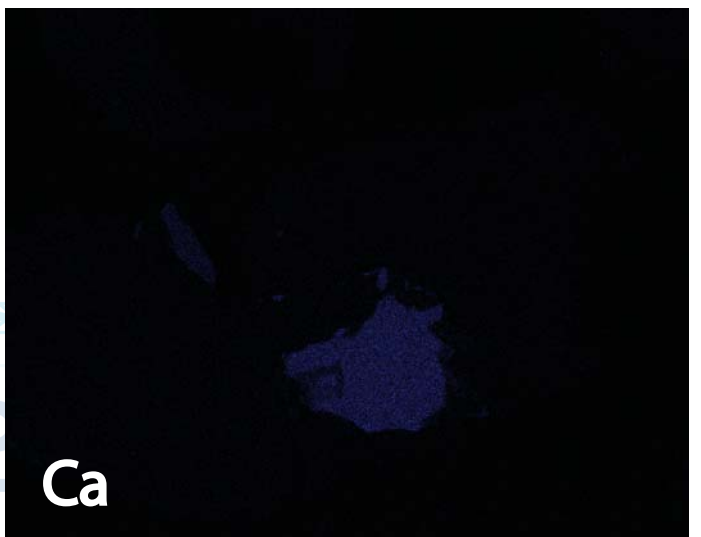
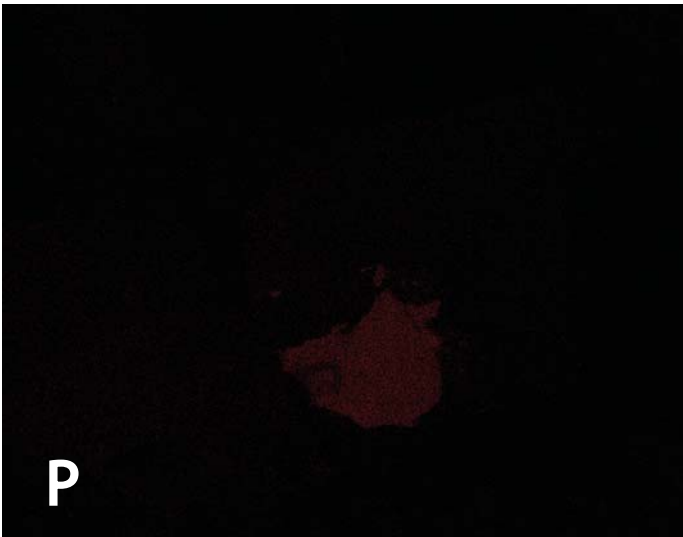
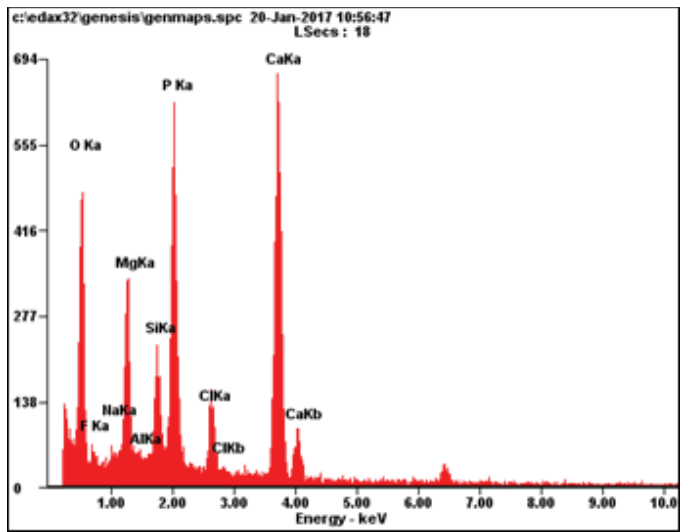
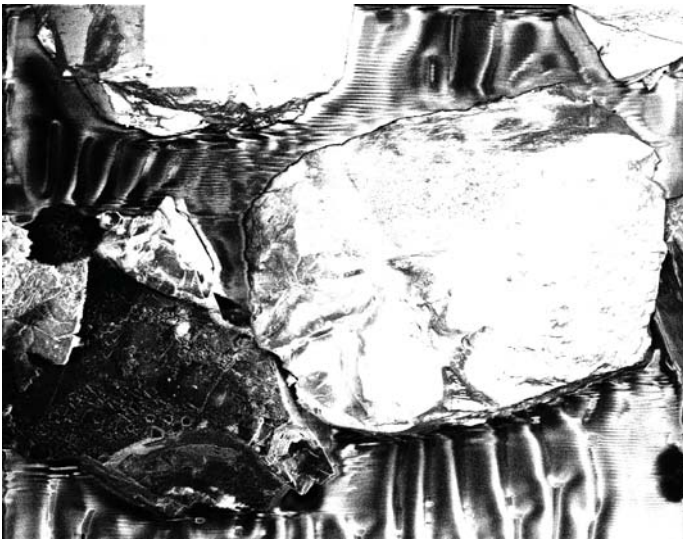
TIL07012 U2-4-1



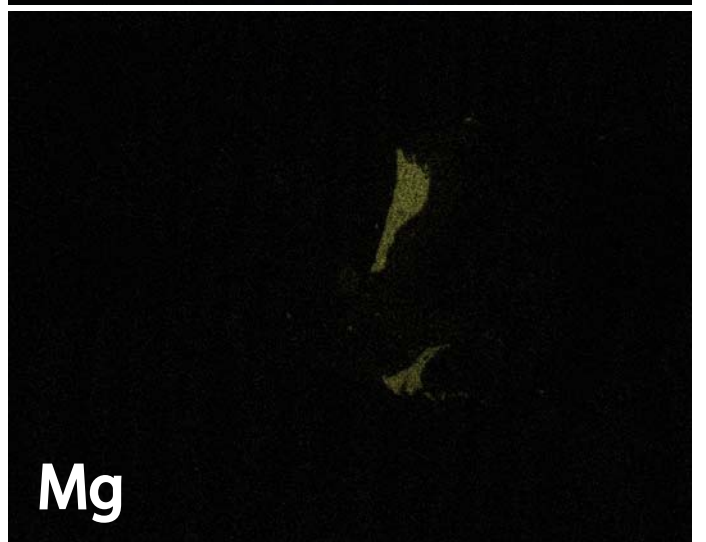
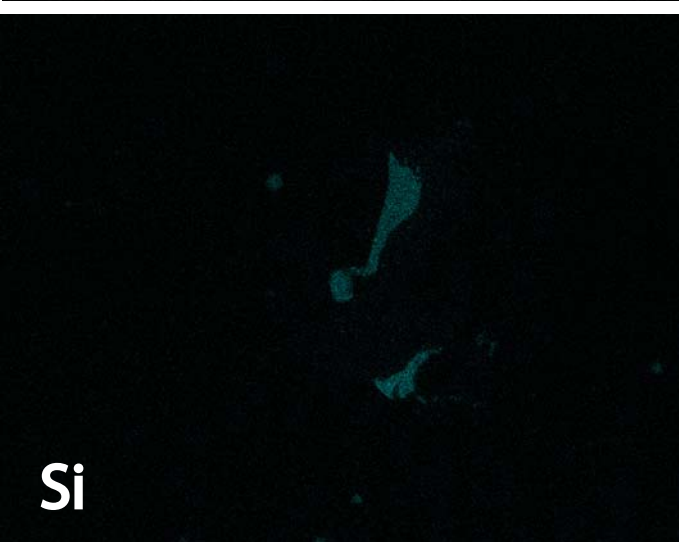
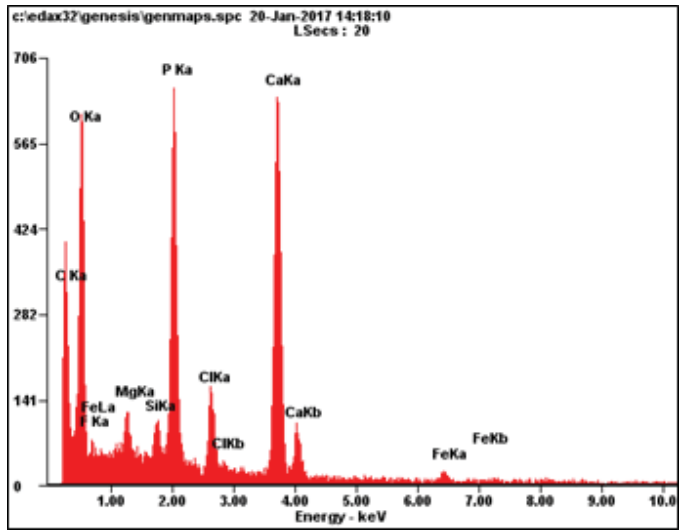
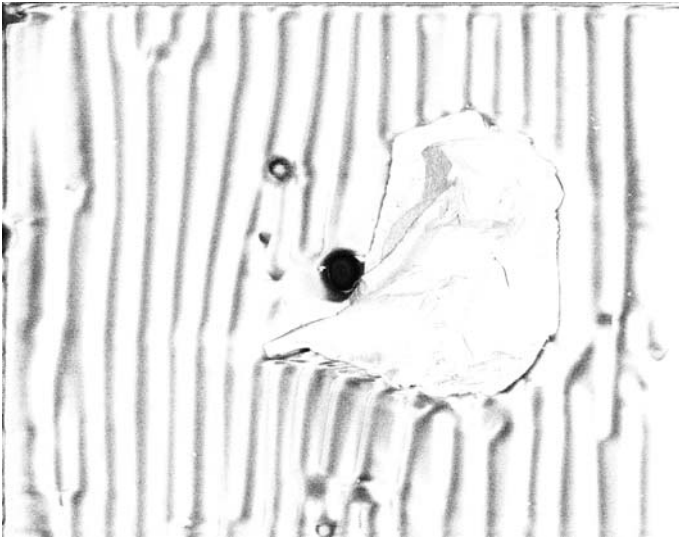
TIL07012 U2-8-1



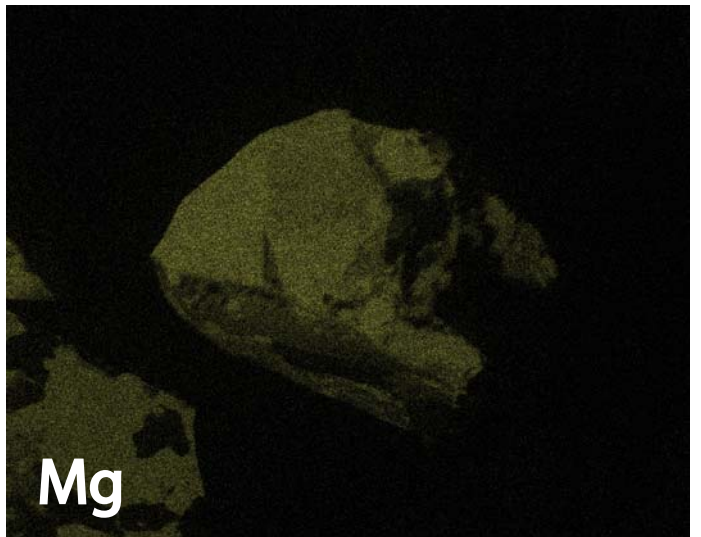
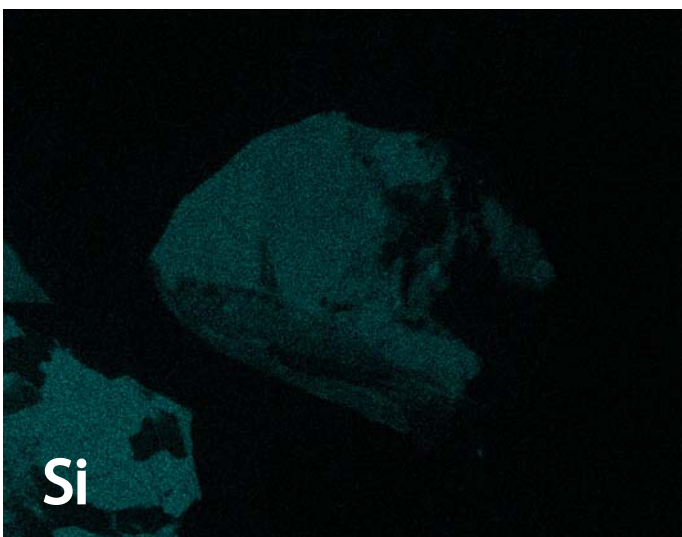
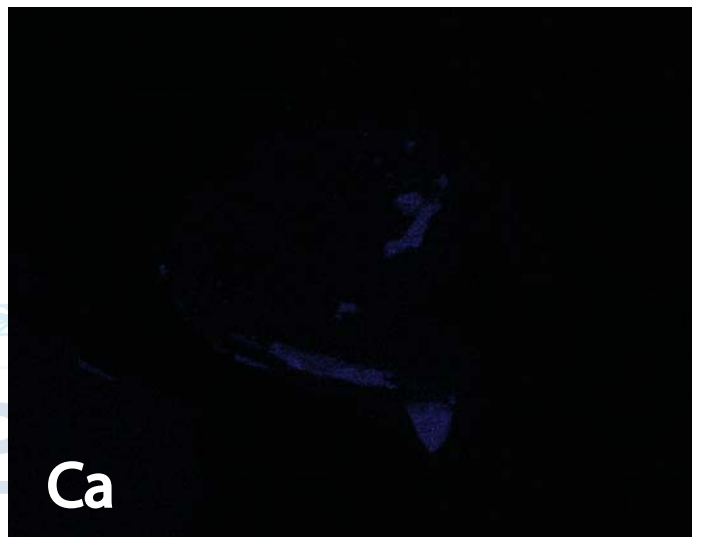
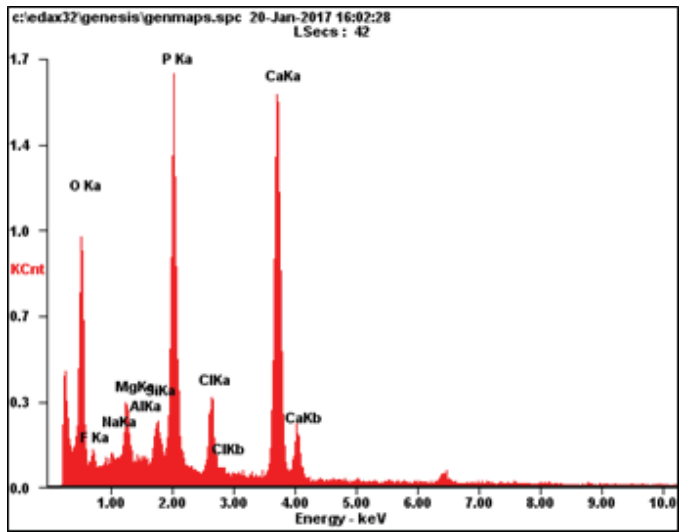
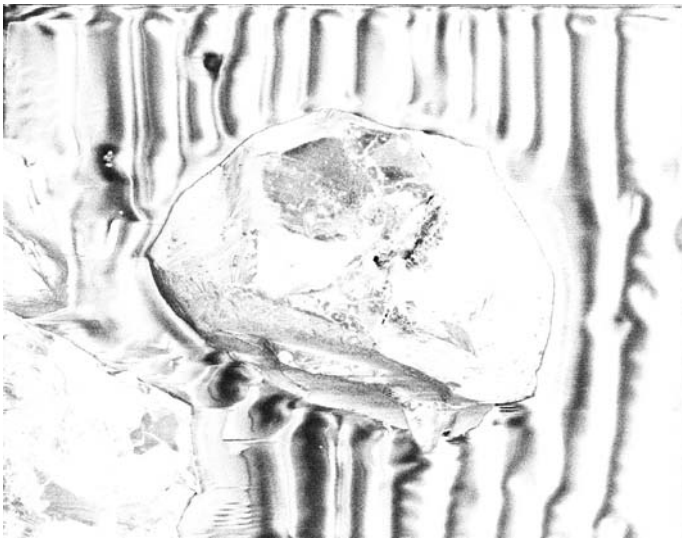
TIL07012 U2-9-1



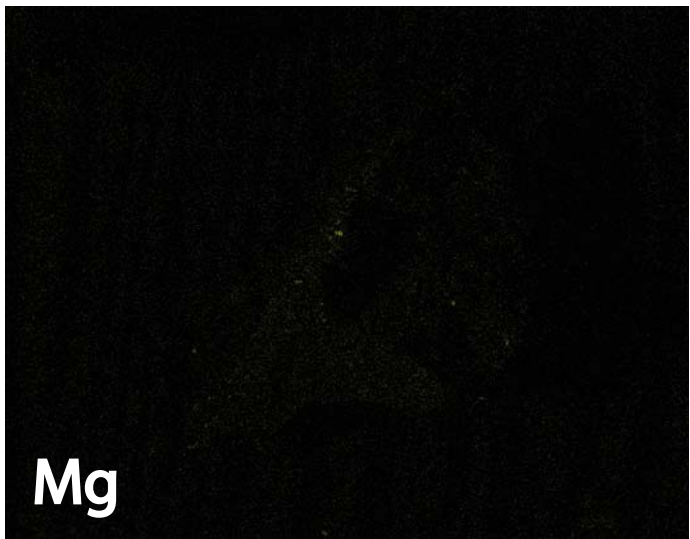
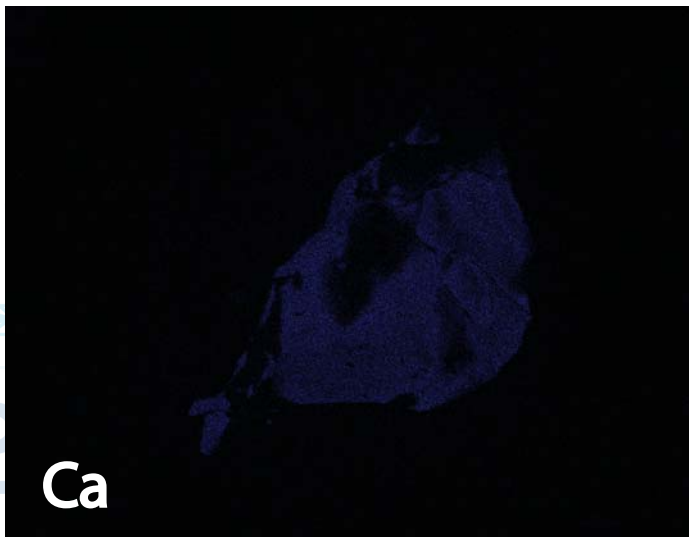
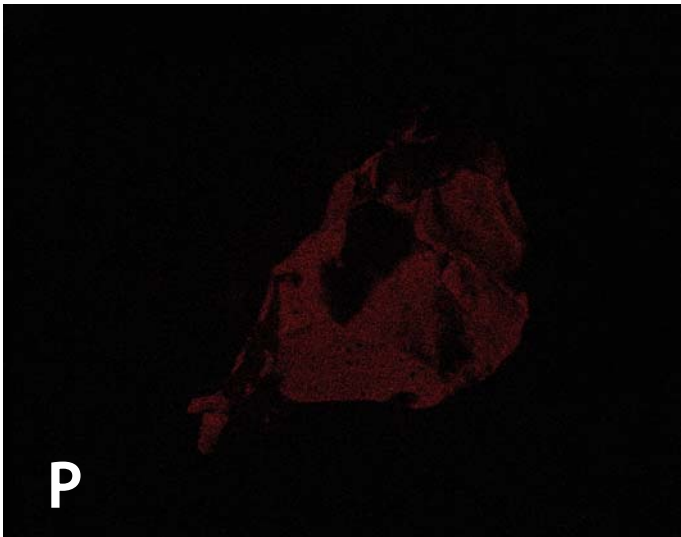
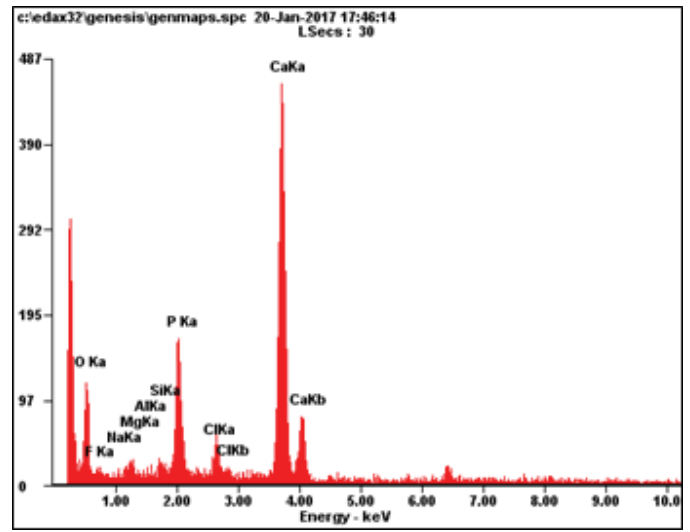
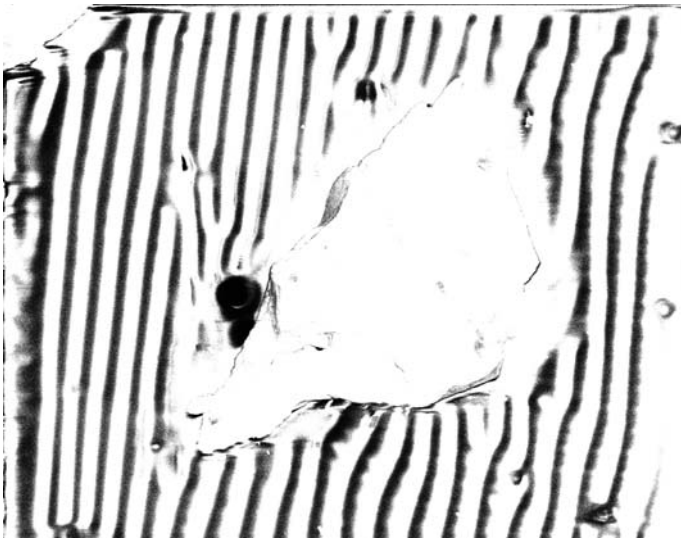
TIL07012 U2-12-1



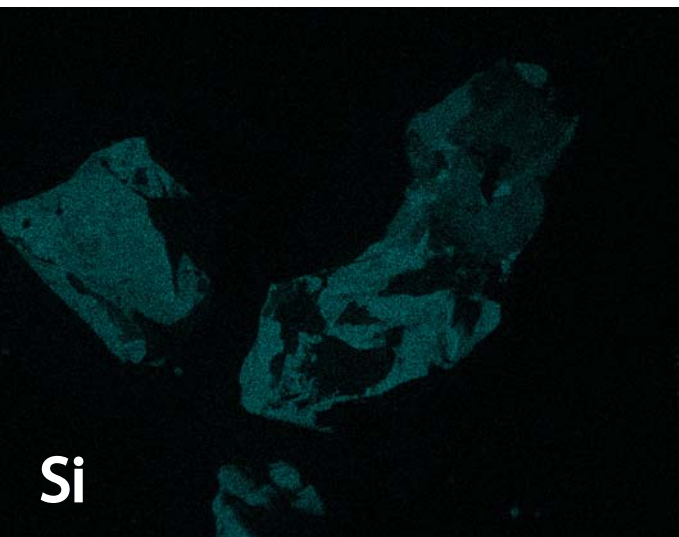
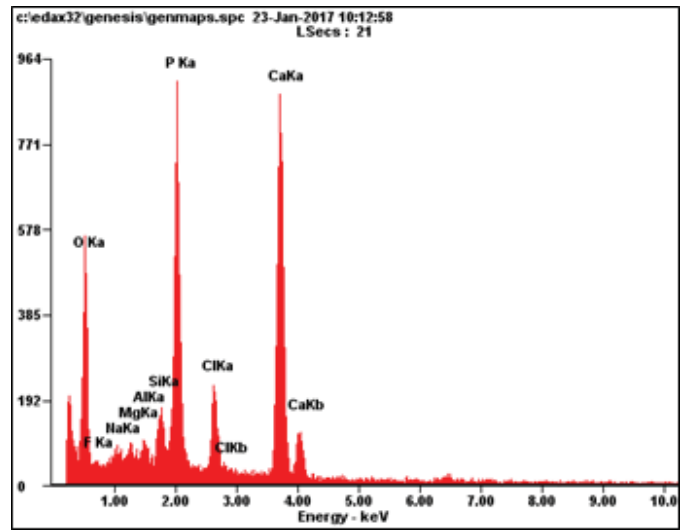
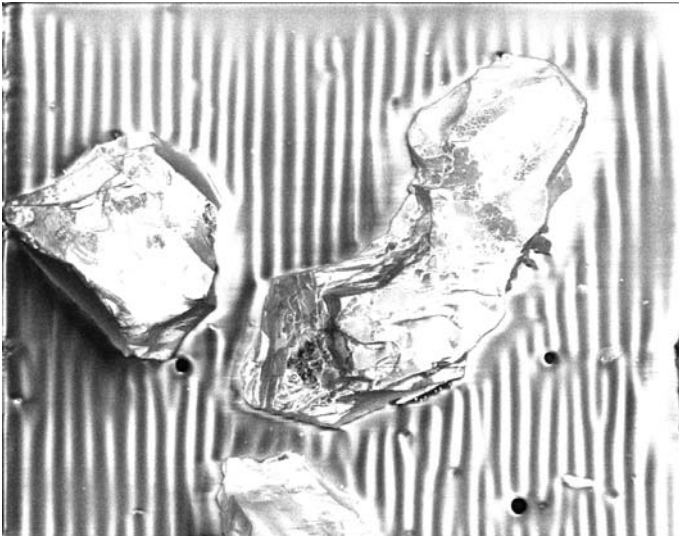
TIL07012 U2-12-2



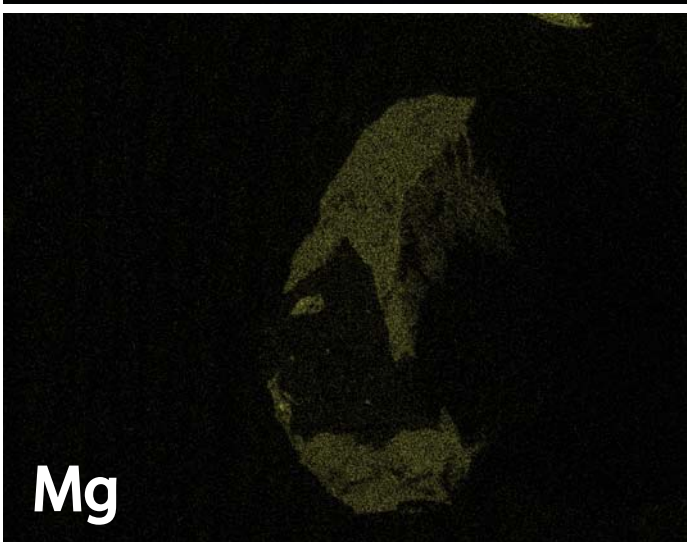
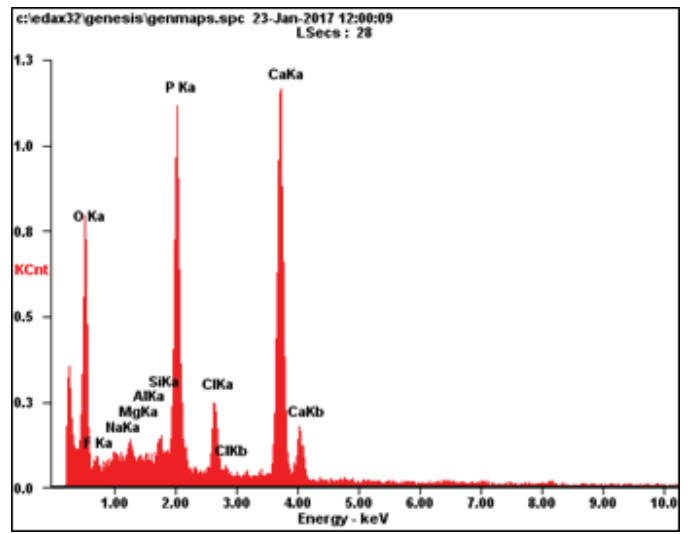
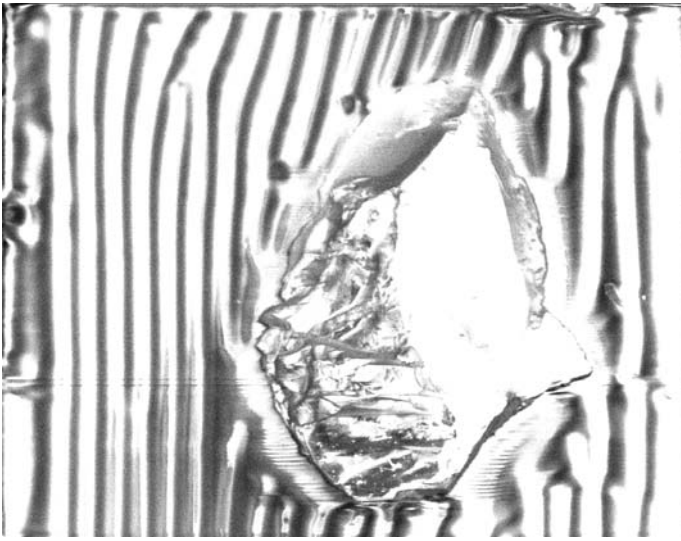
TIL07012 U2-15-1



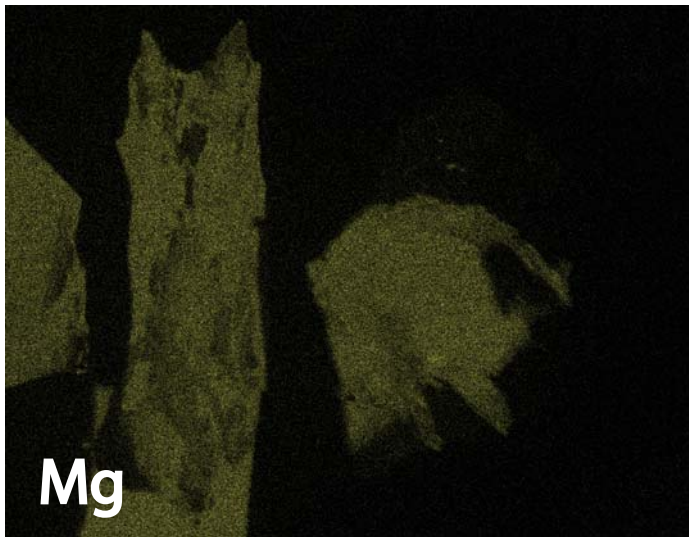
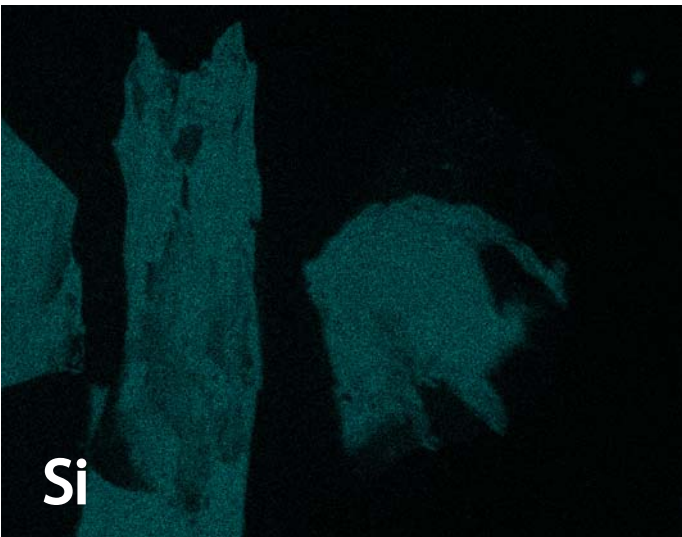
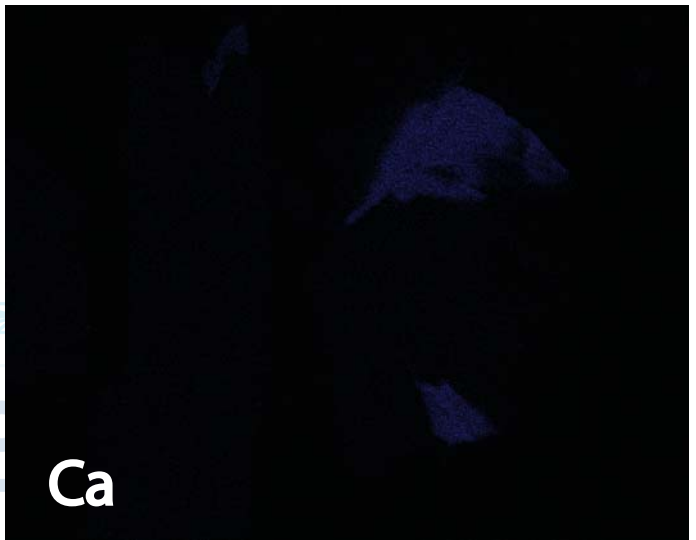
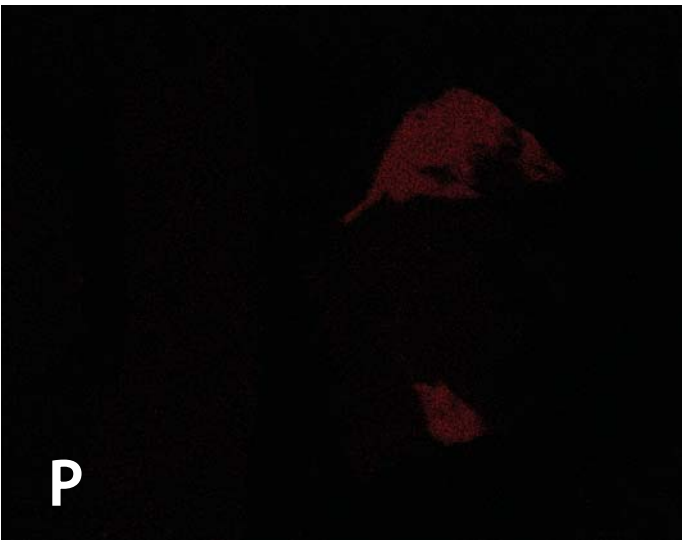
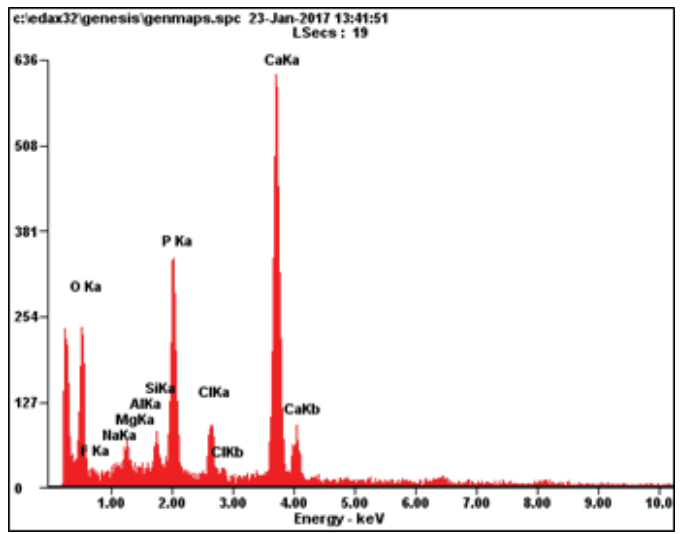
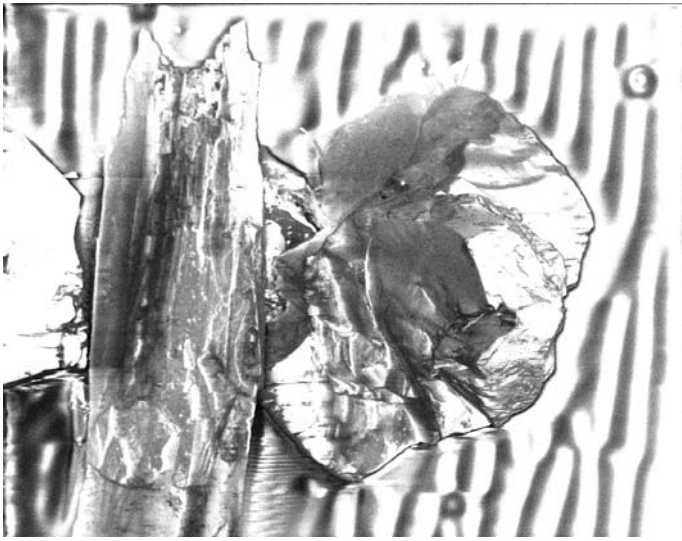
TIL07012 U3-5-1



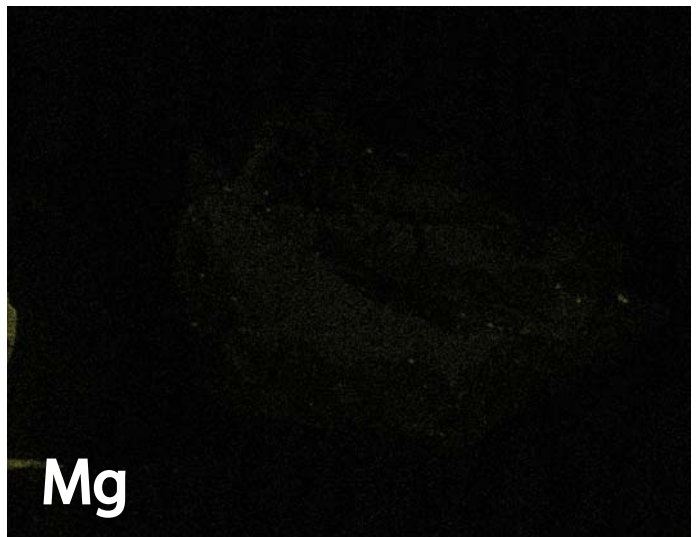
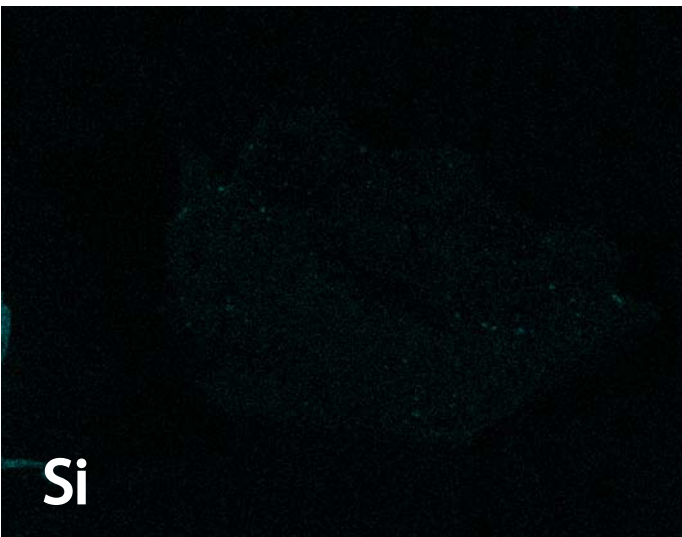
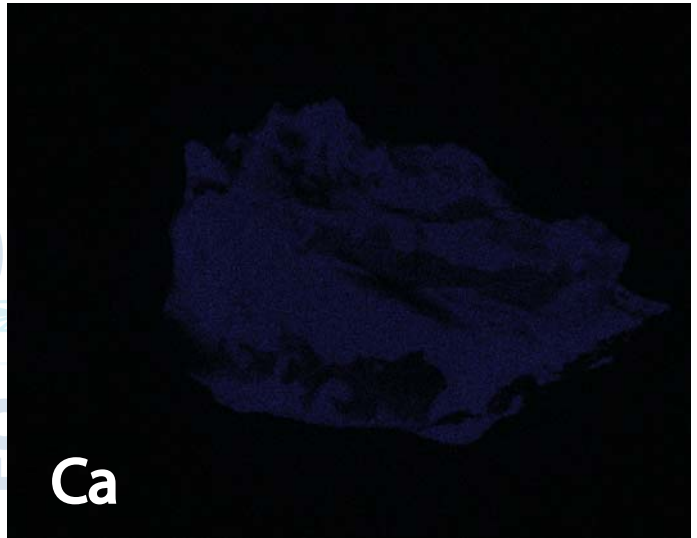
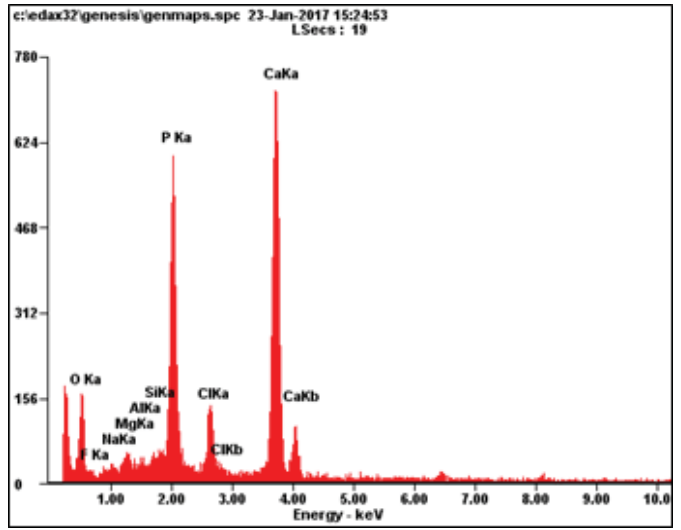
TIL07012 U3-6-1



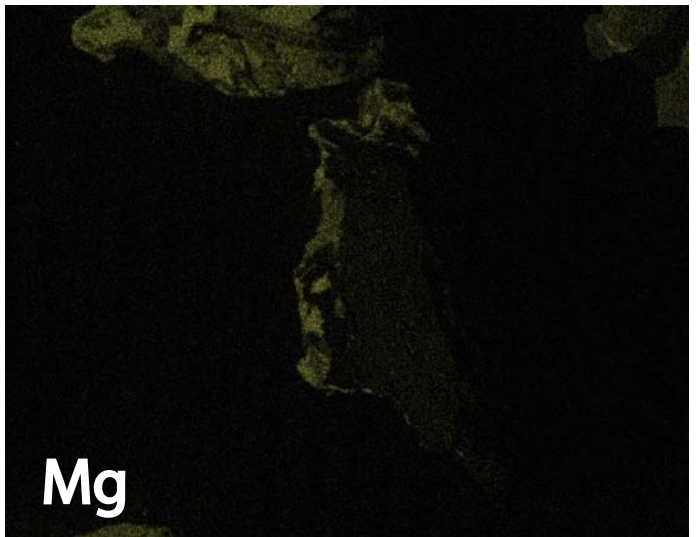
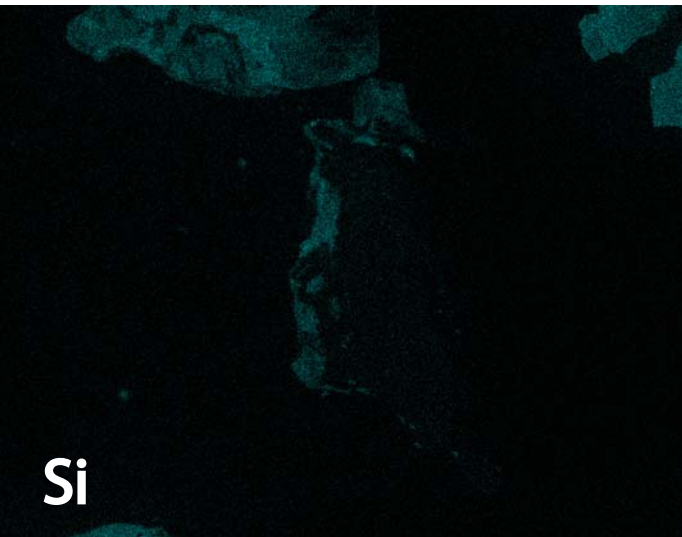
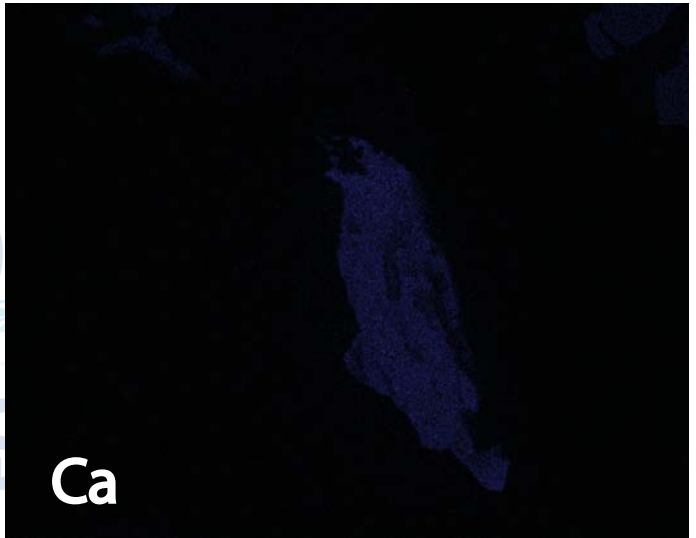
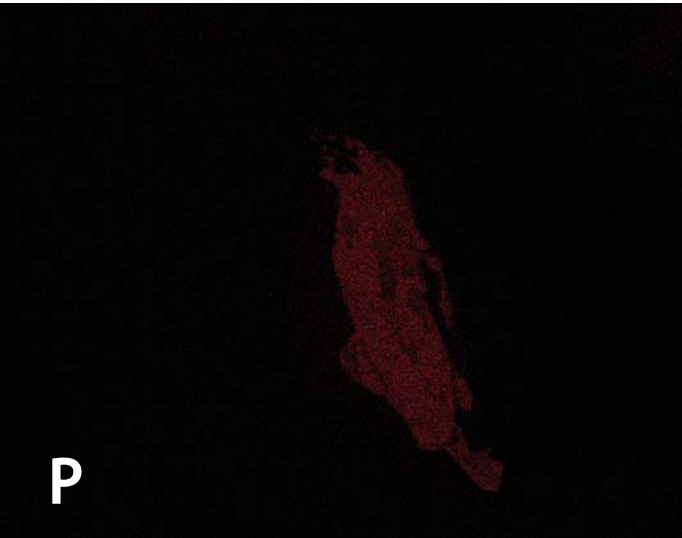
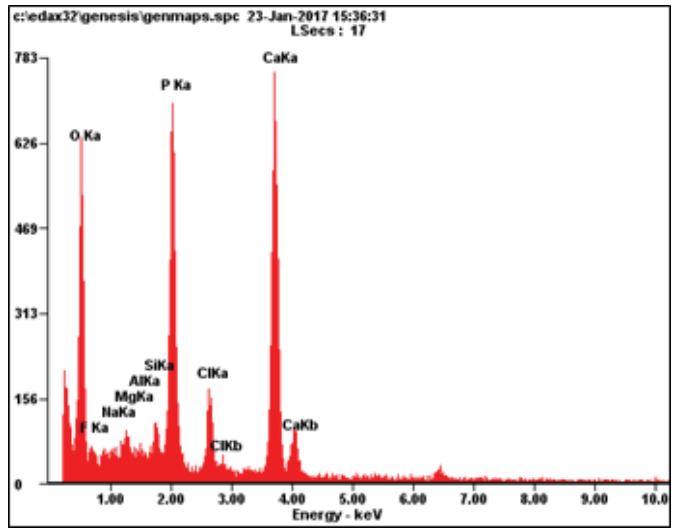
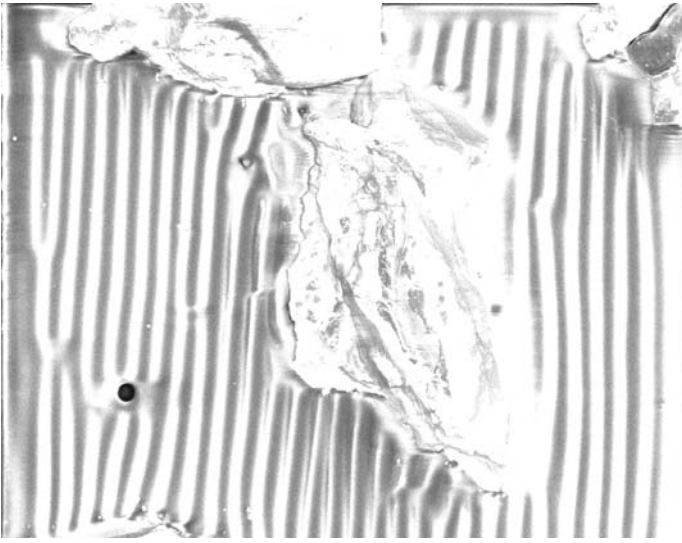
TIL07012 U3-9-1



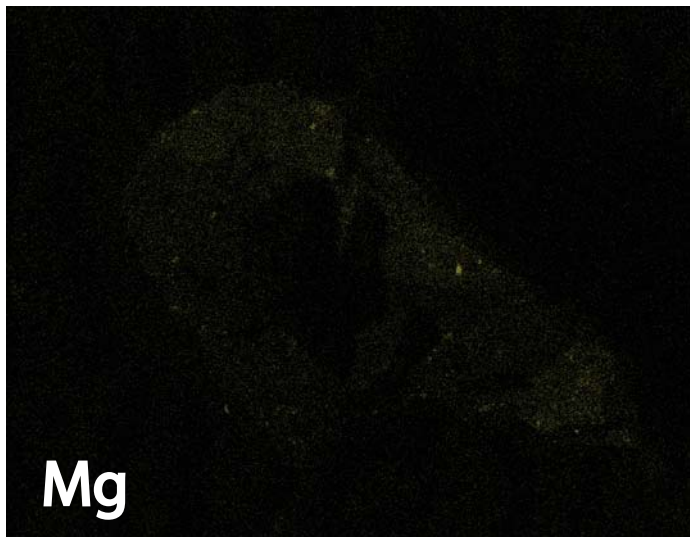
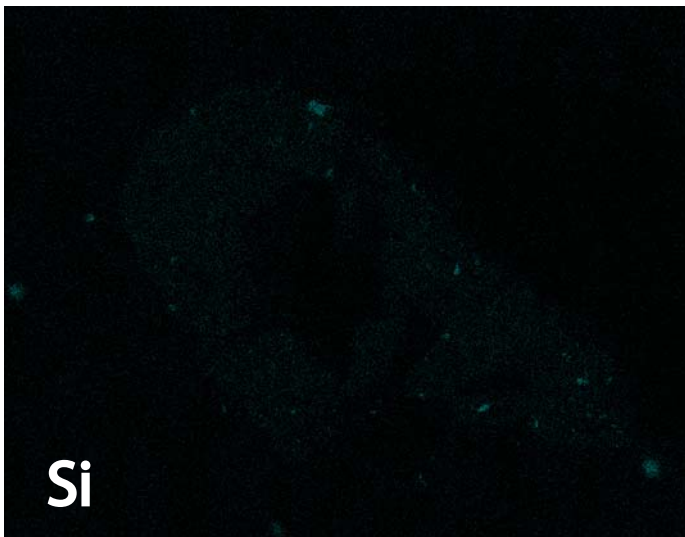
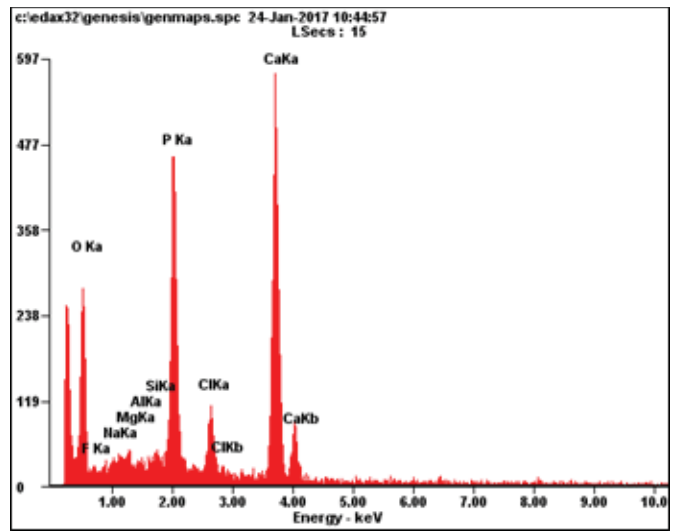
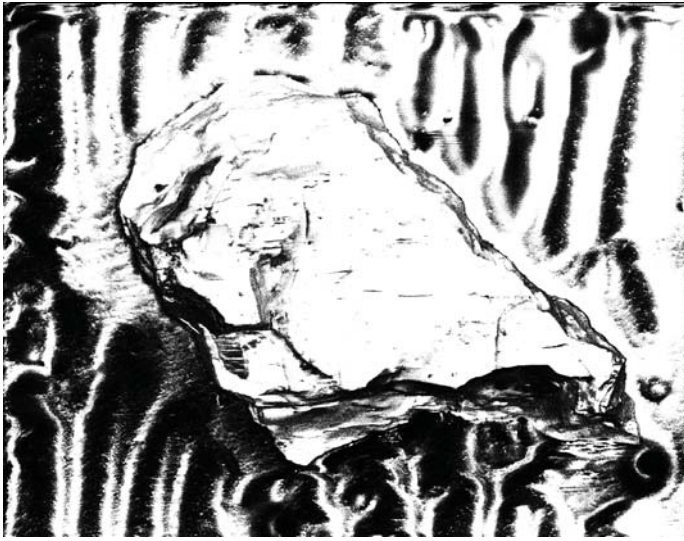
TIL07012 U3-11-1



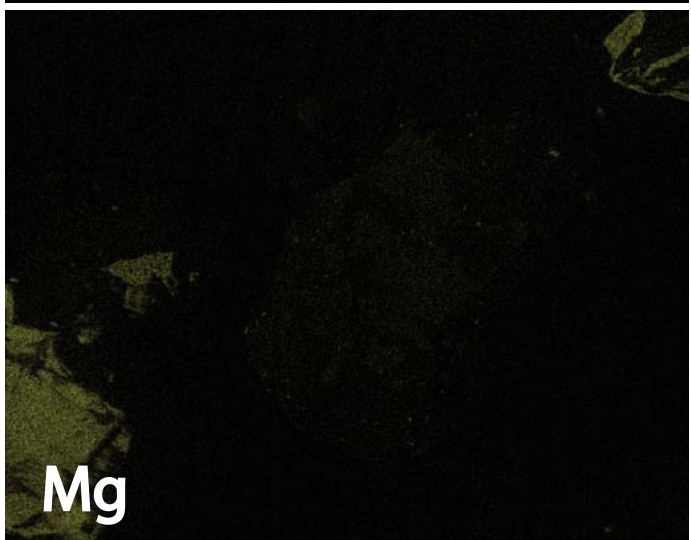
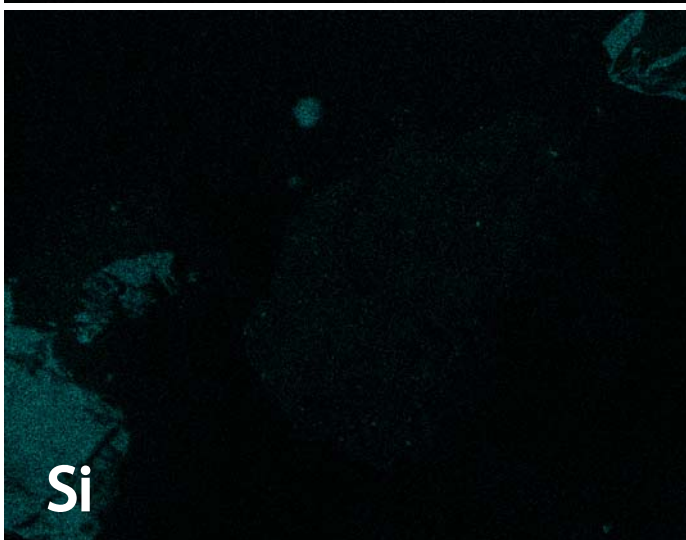
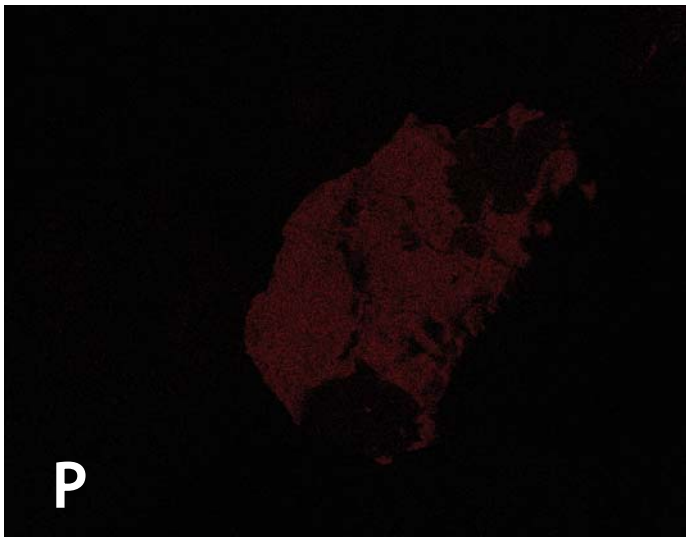
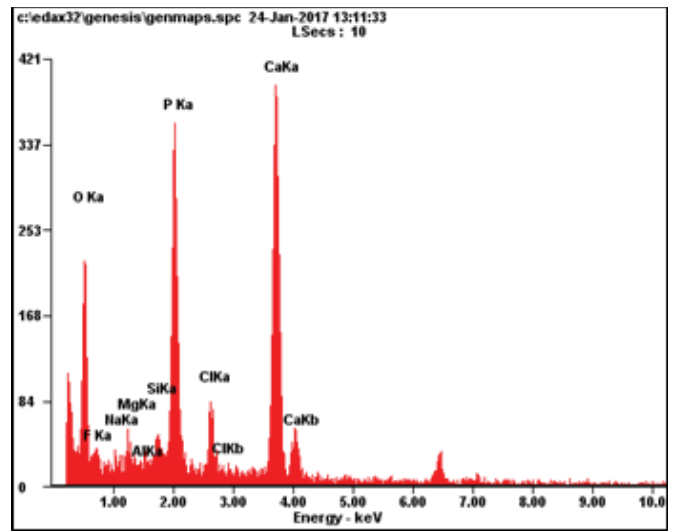
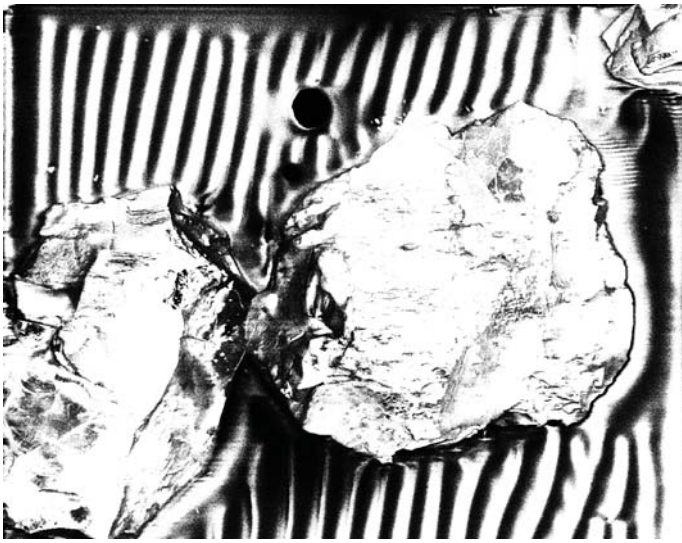
TIL07012 U3-12-1



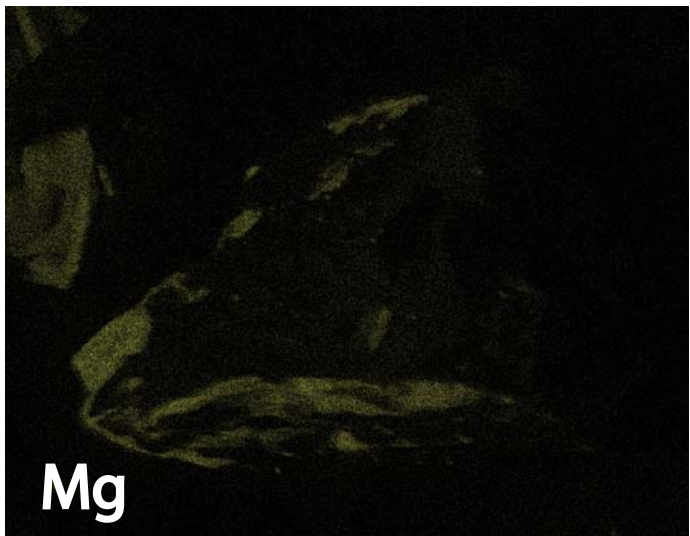
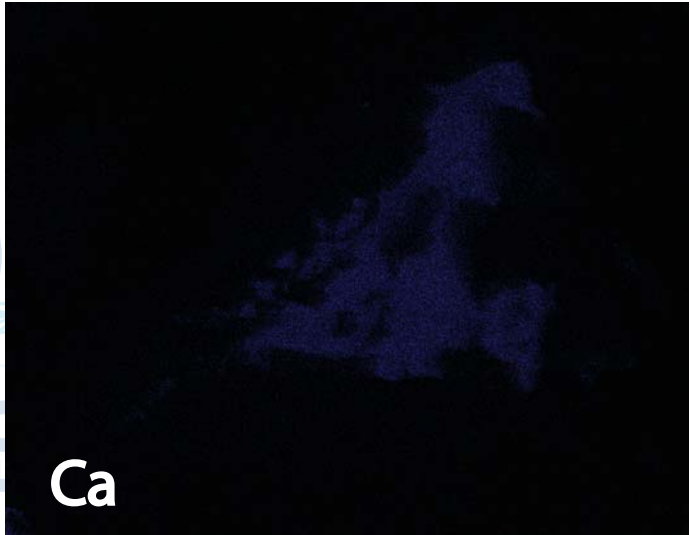
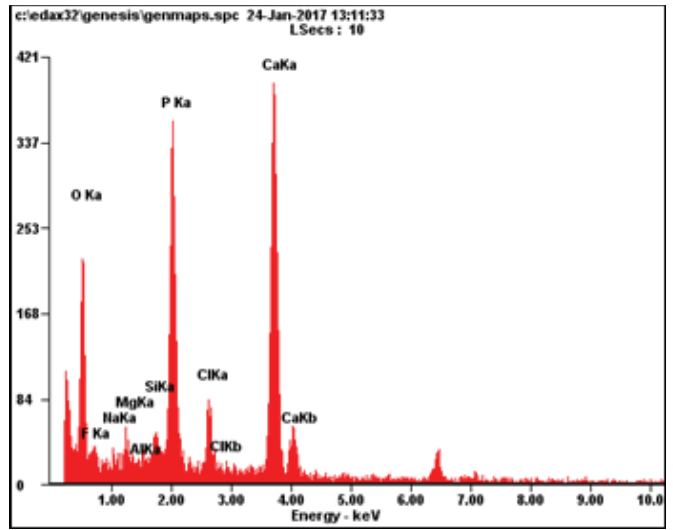
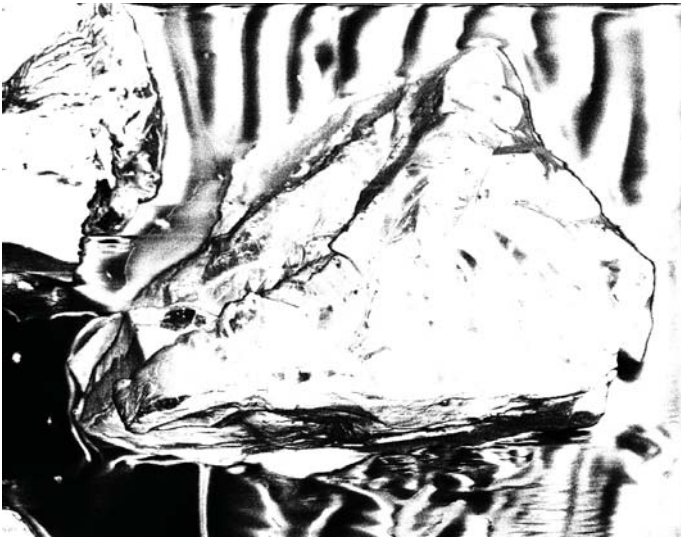
TIL07012 U4-2-1



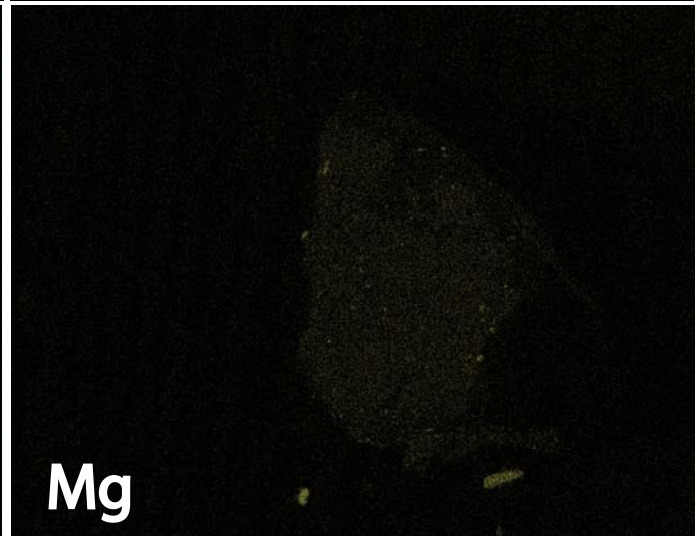
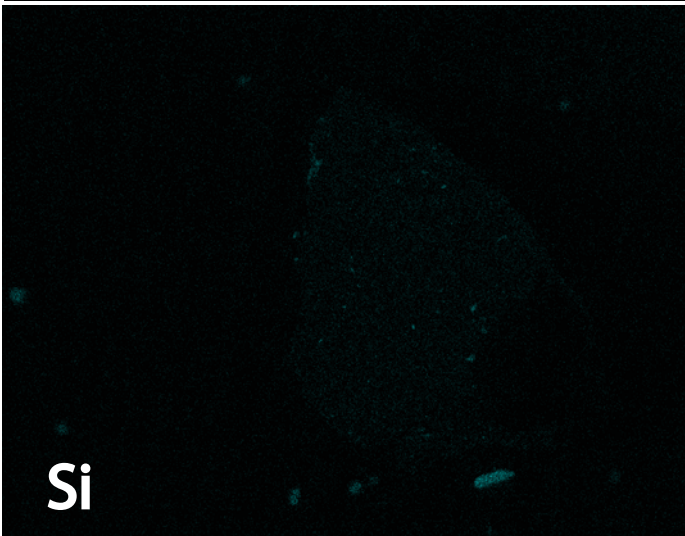
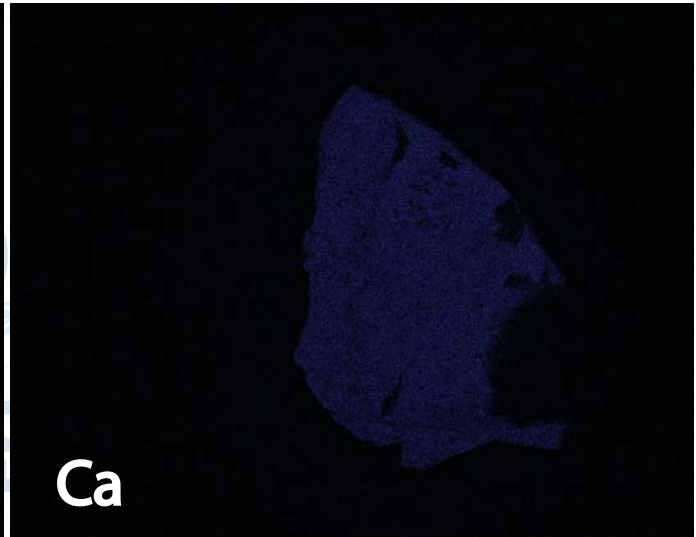
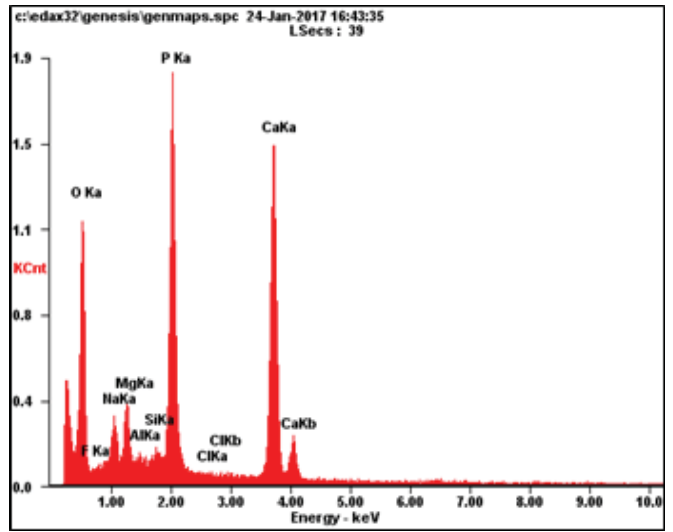
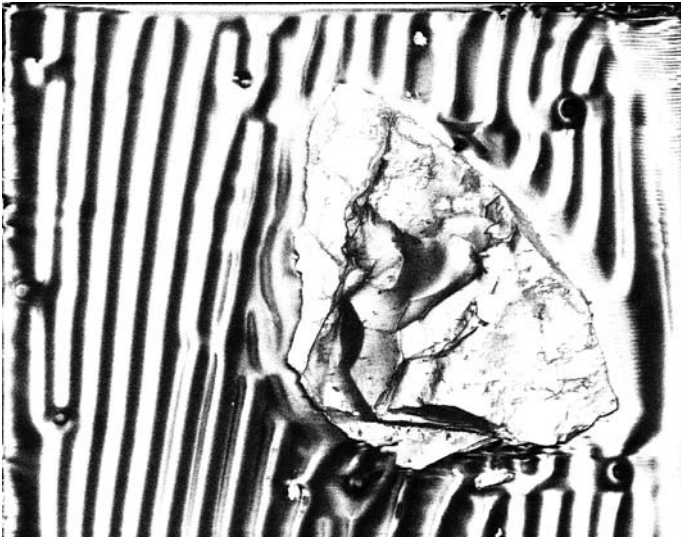
TIL07012 U4-4-1



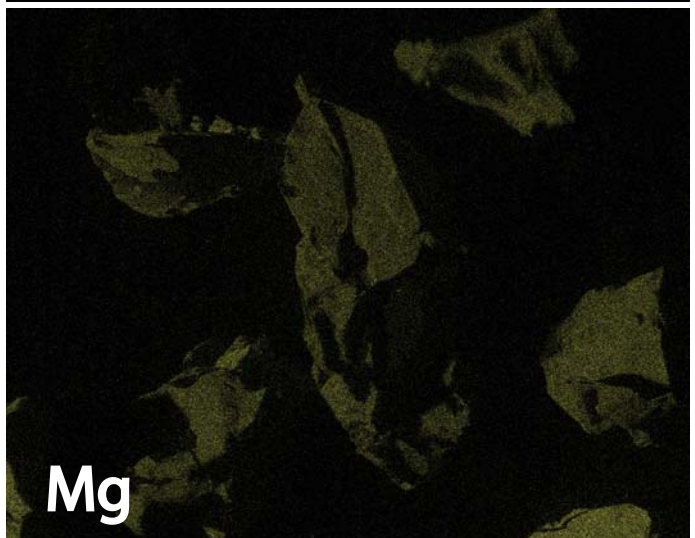
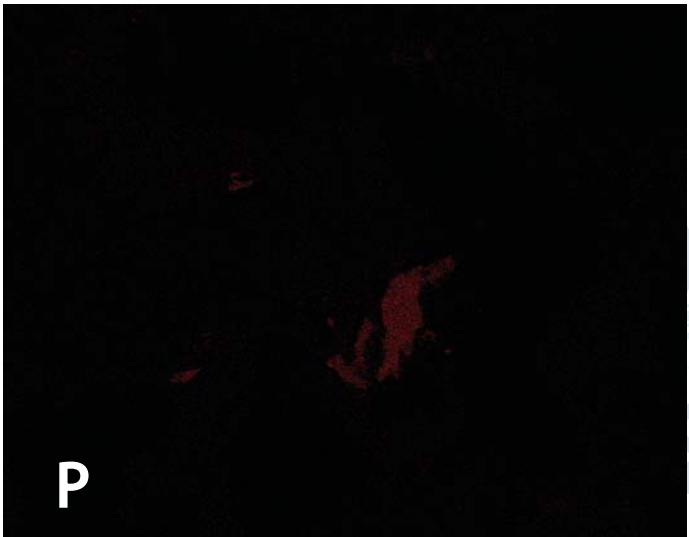
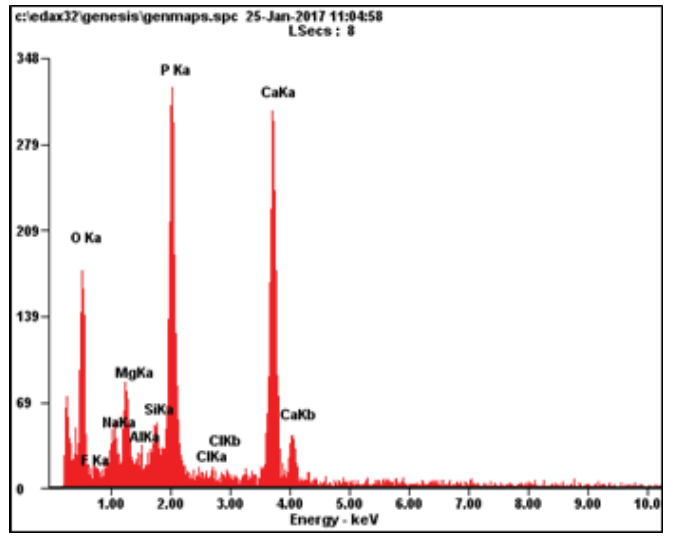
TIL07012 U4-4-2



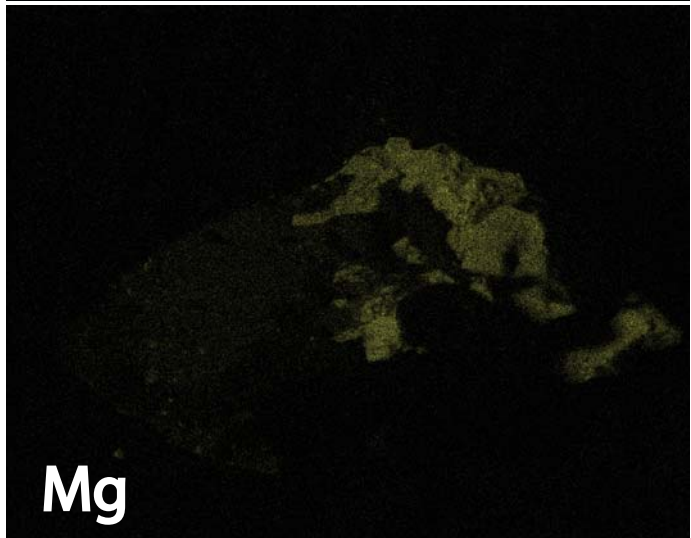
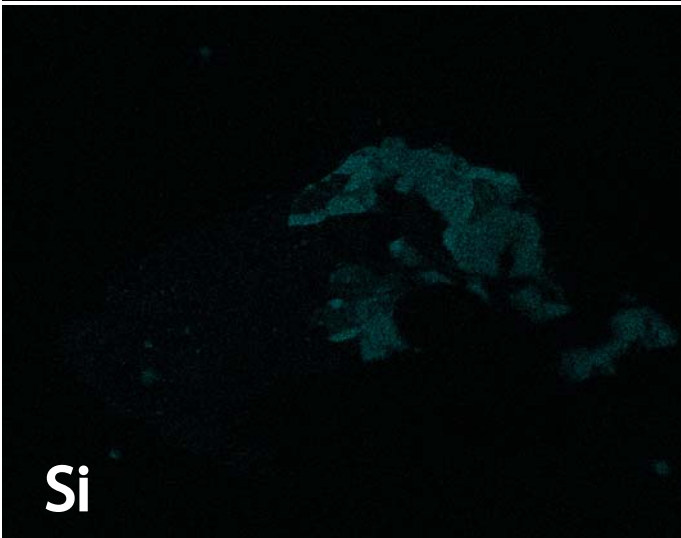
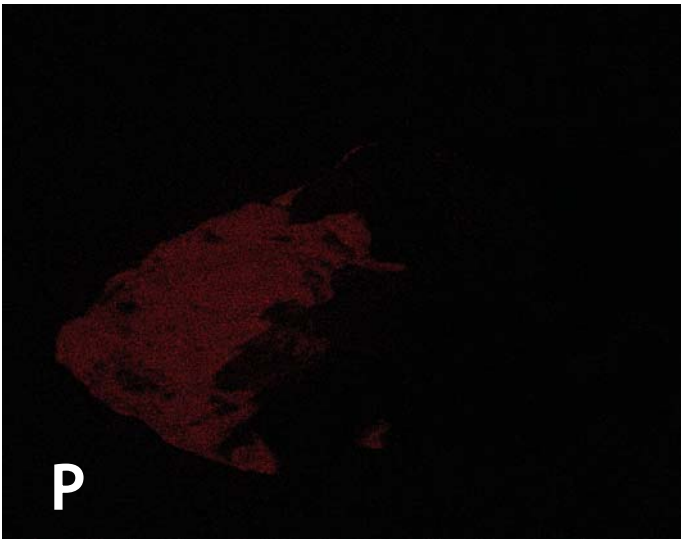
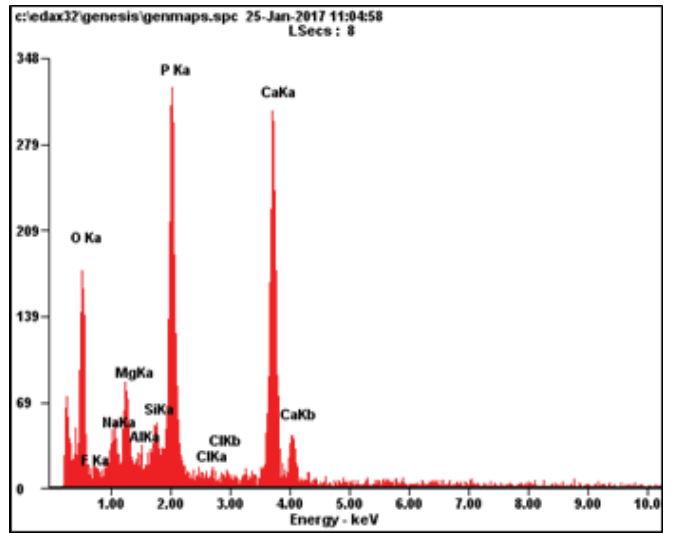
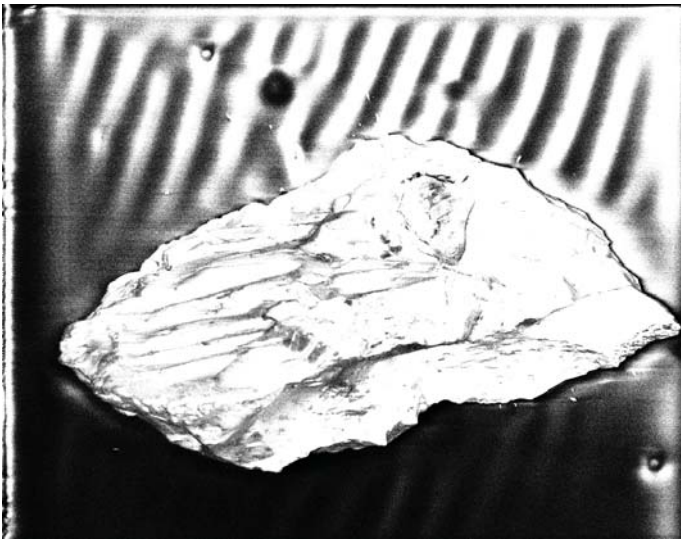
TIL07012 U4-5-1



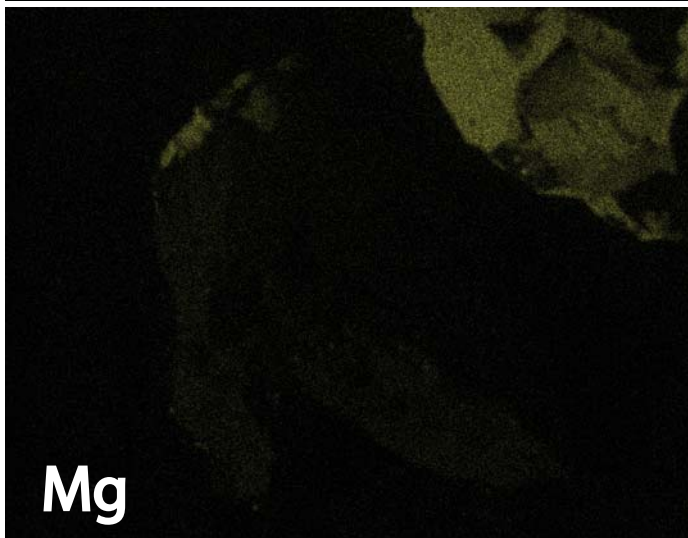
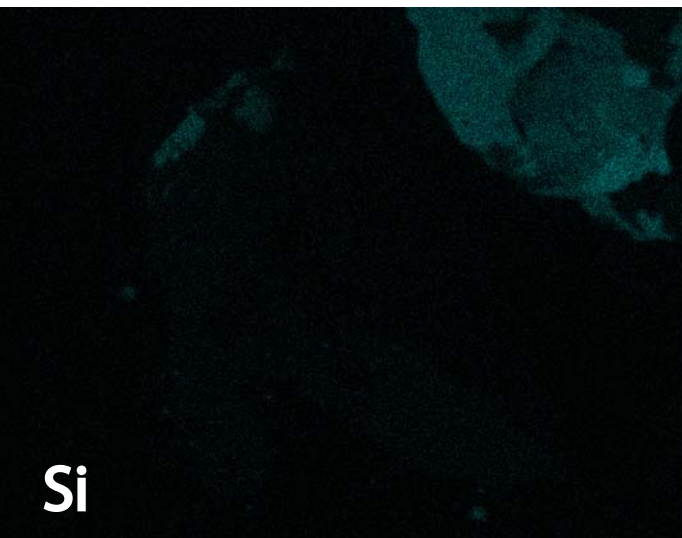
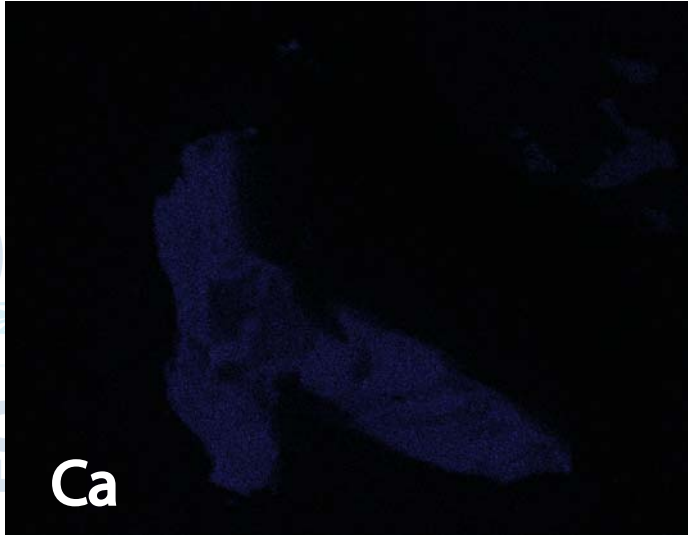
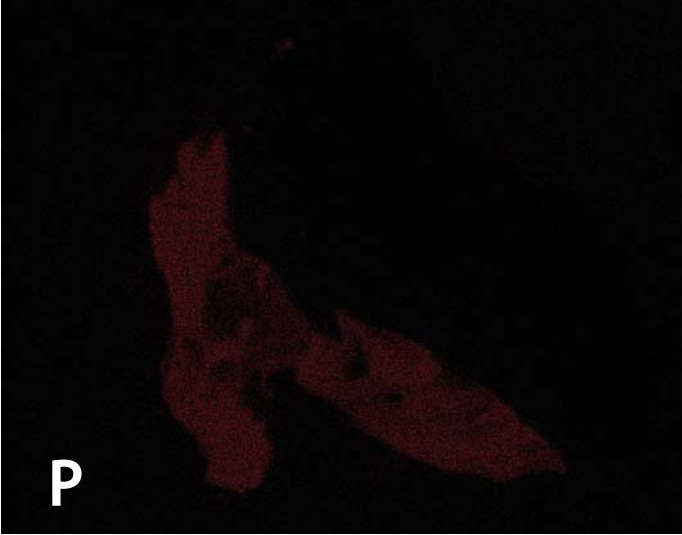
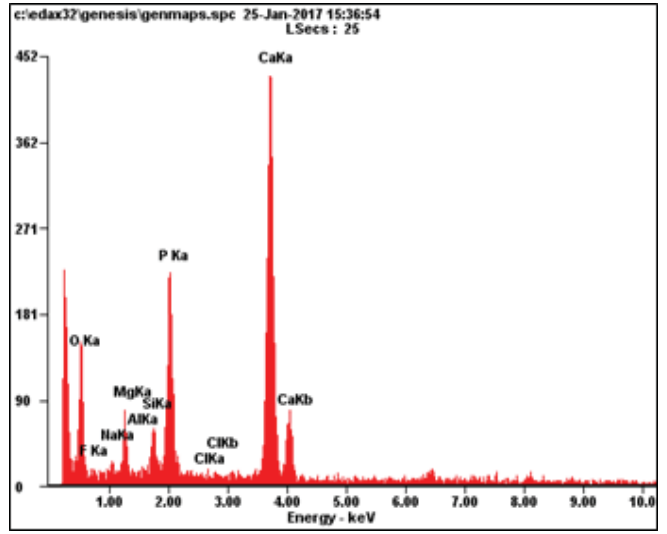
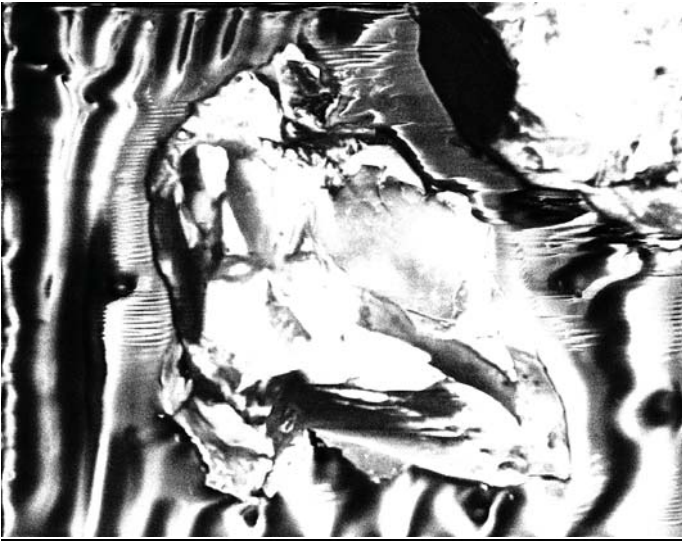
TIL07012 U4-8-1



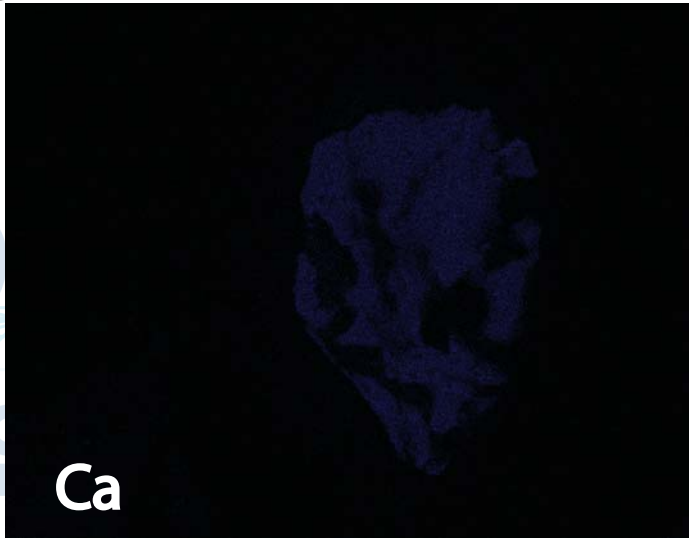
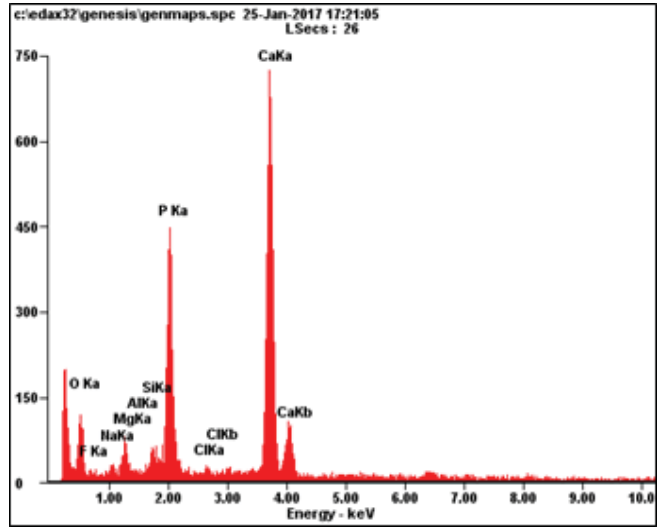
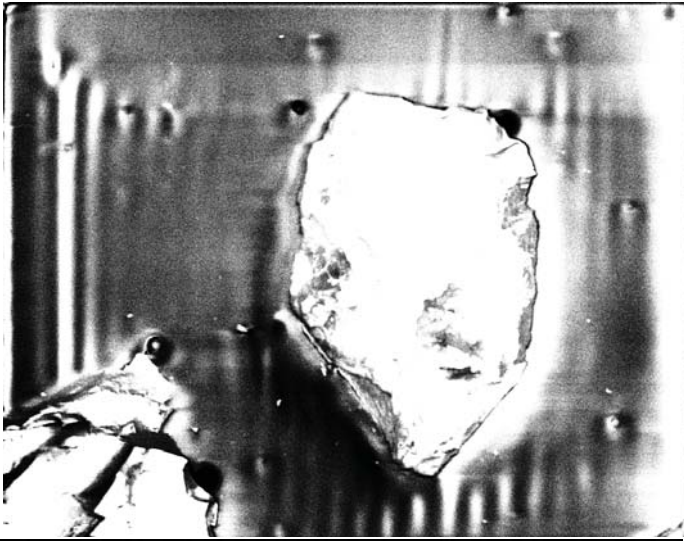
TIL07012 U4-9-1



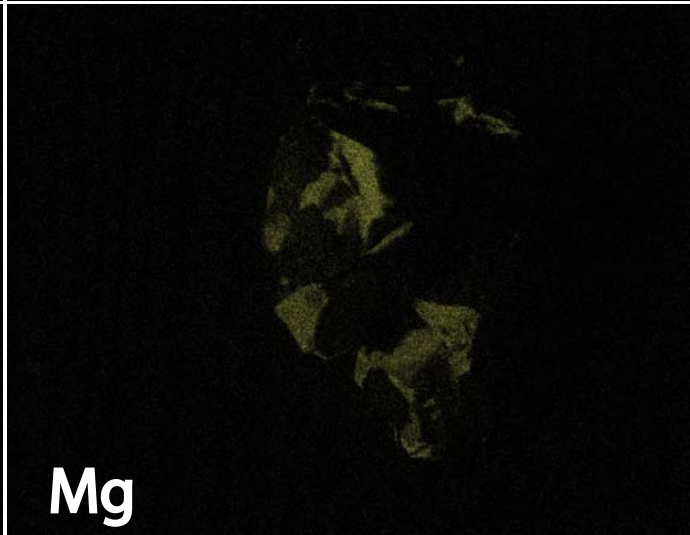
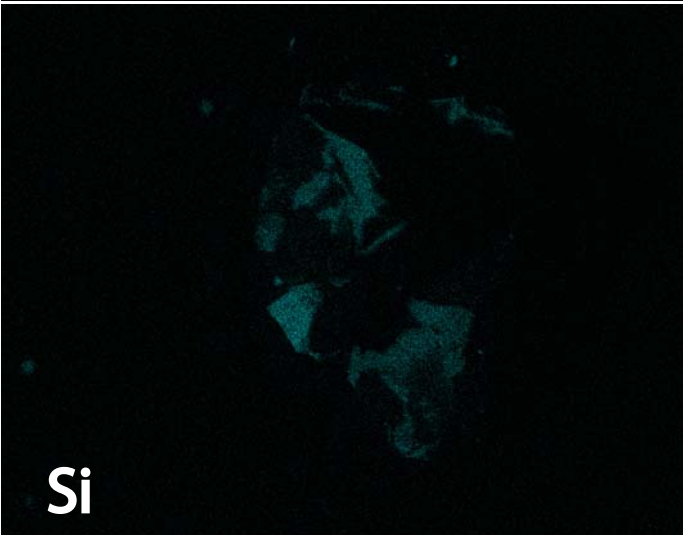
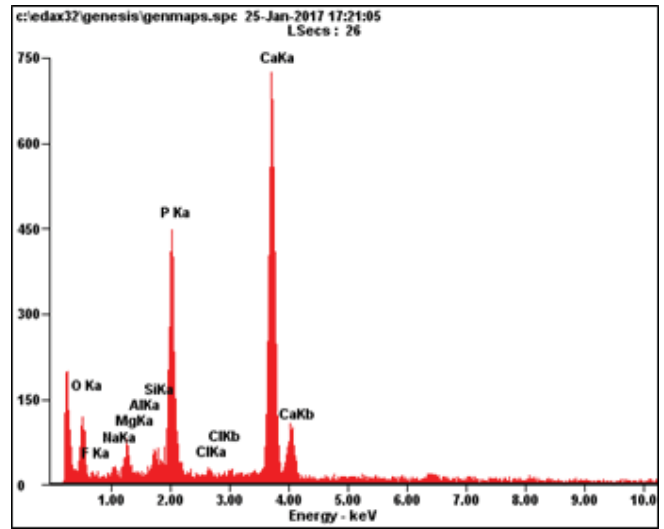
TIL07012 U4-10-1



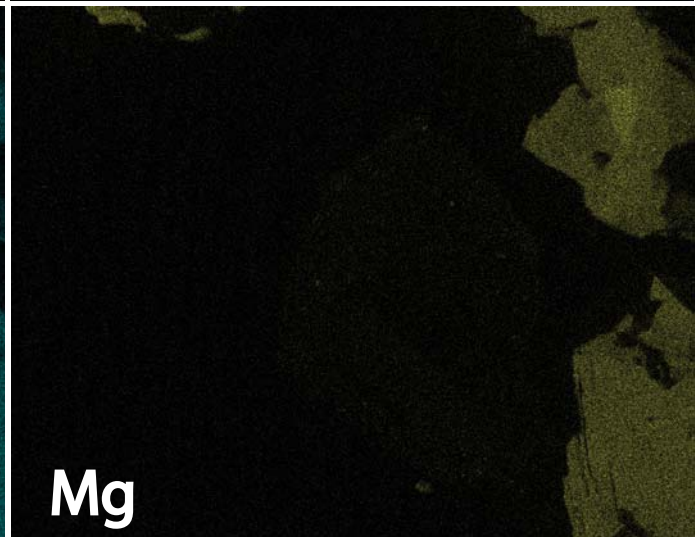
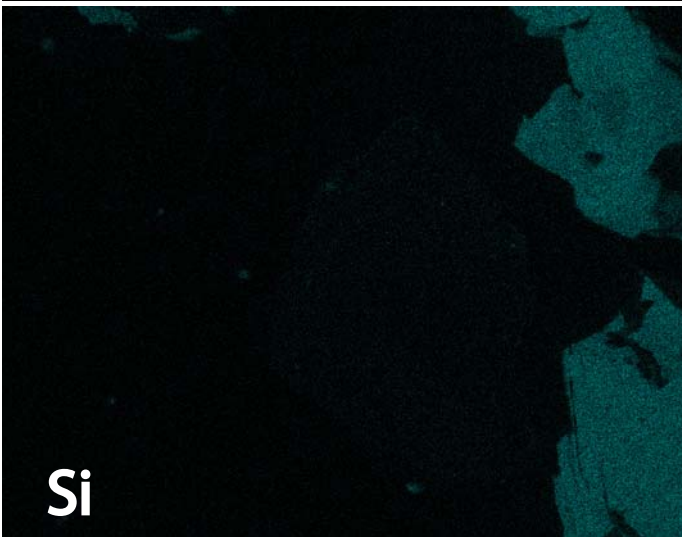
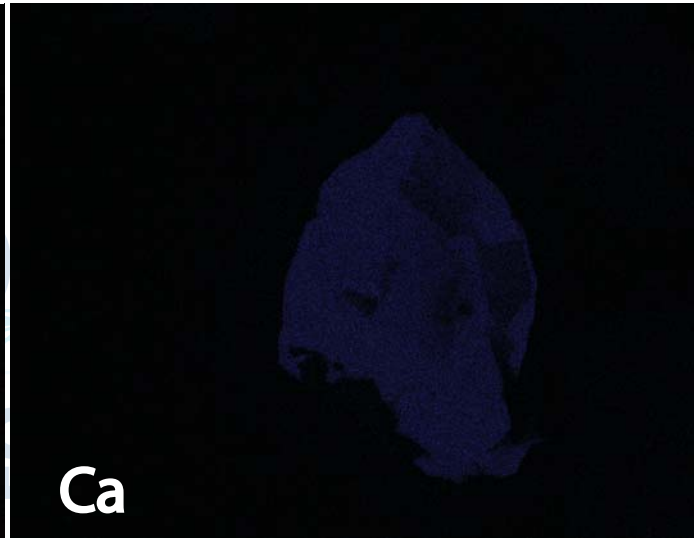
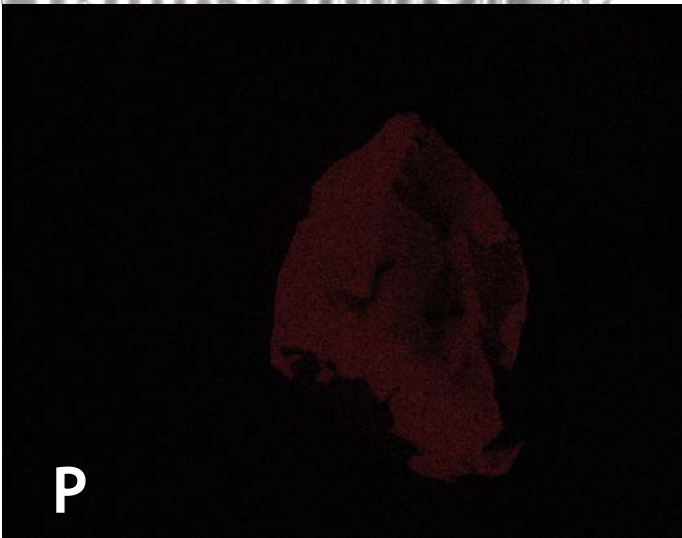
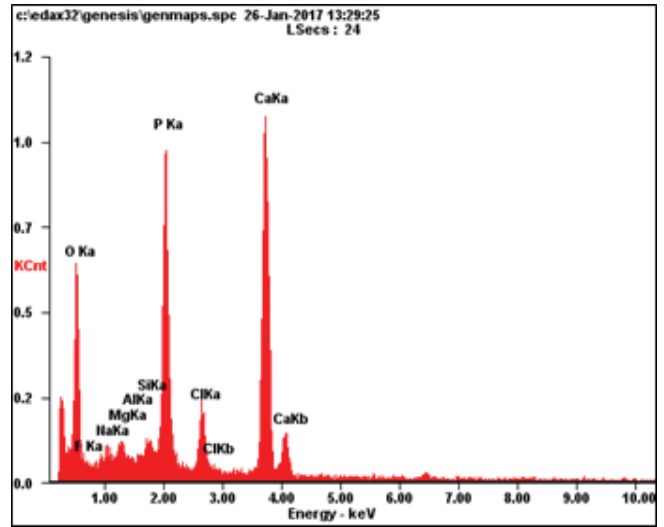
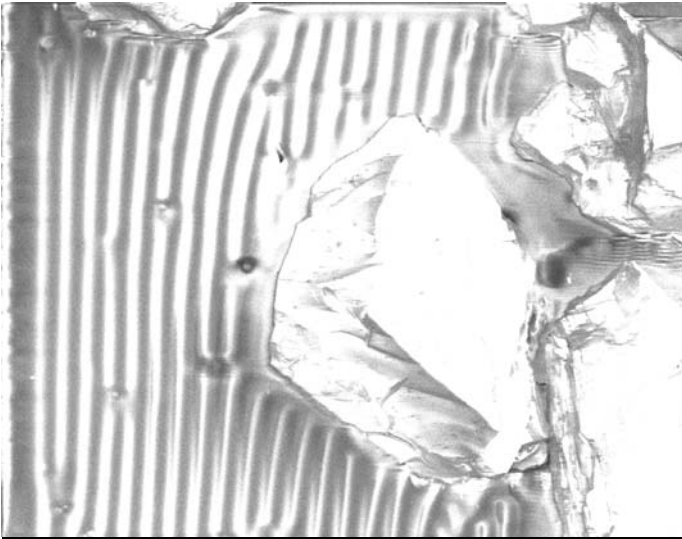
TIL07012 U4-12-1



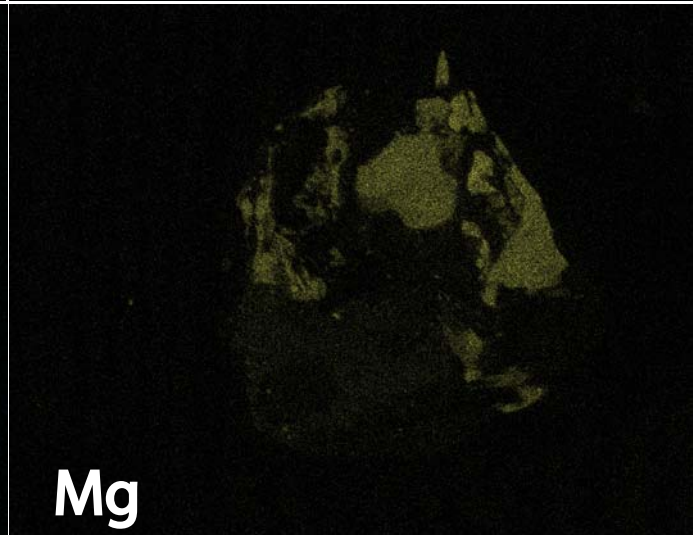
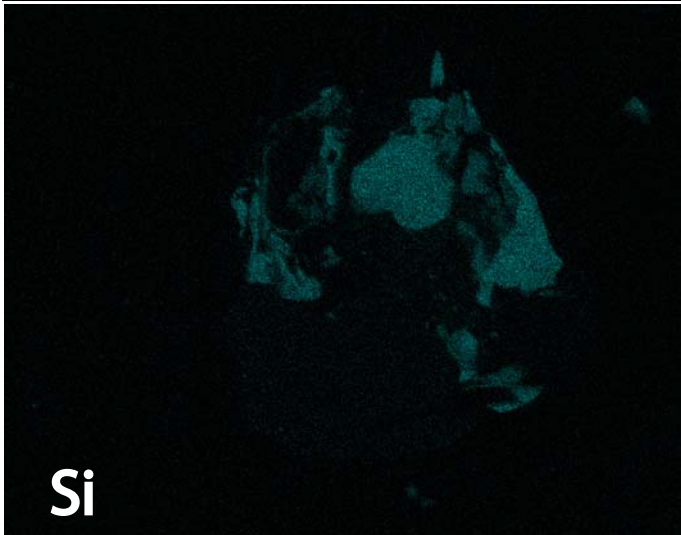
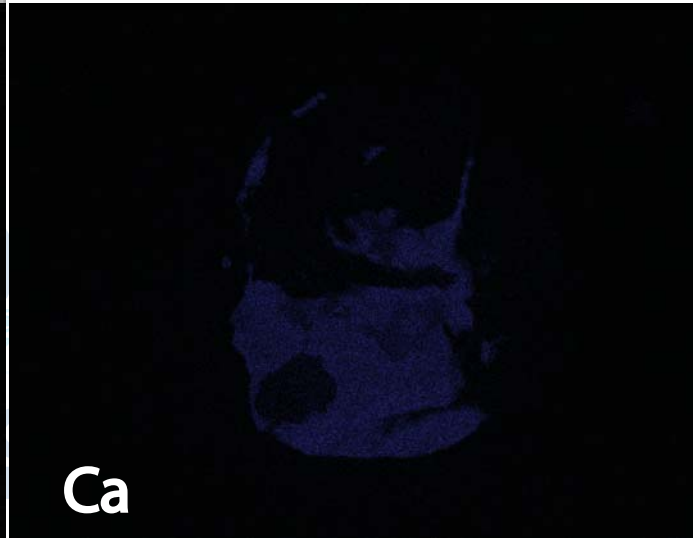
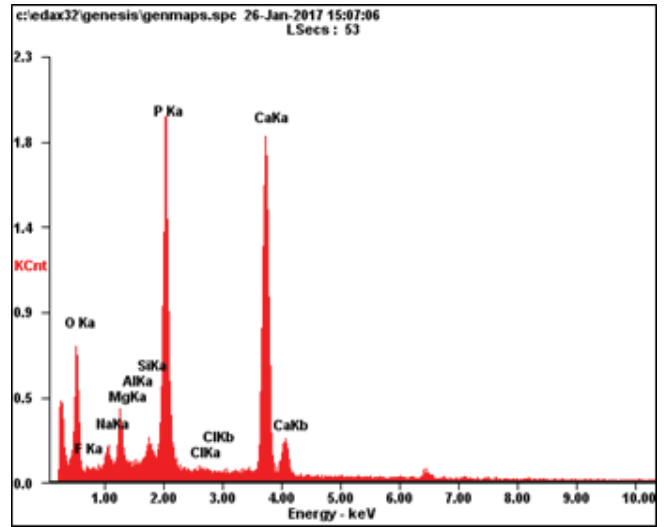
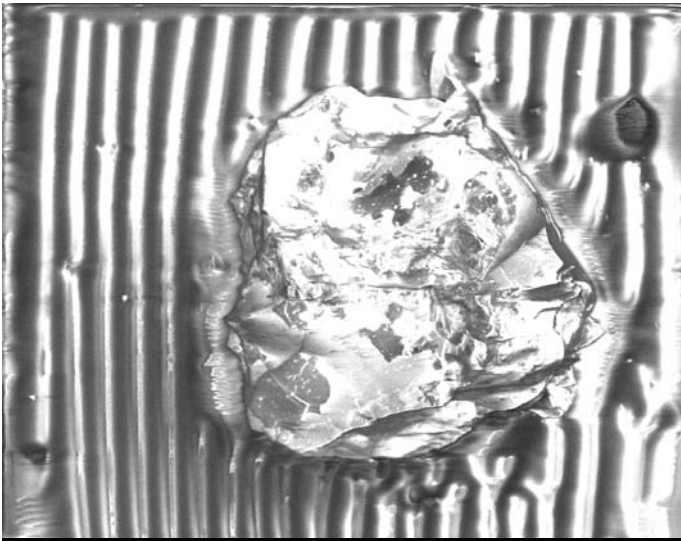
TIL07012 L1-5-1



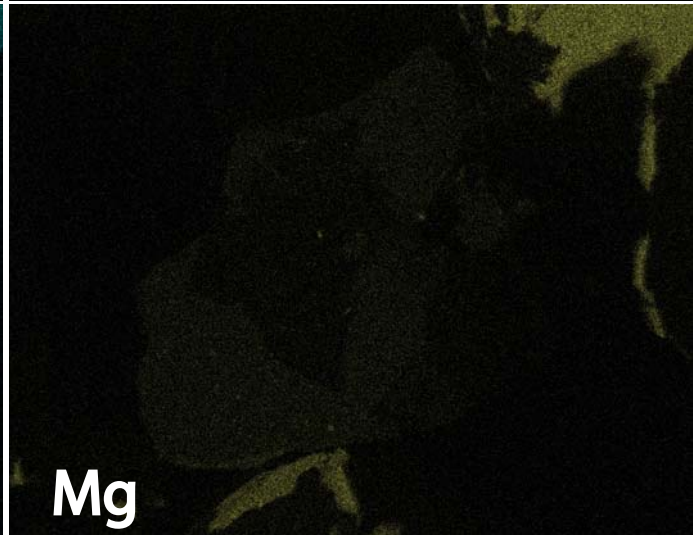
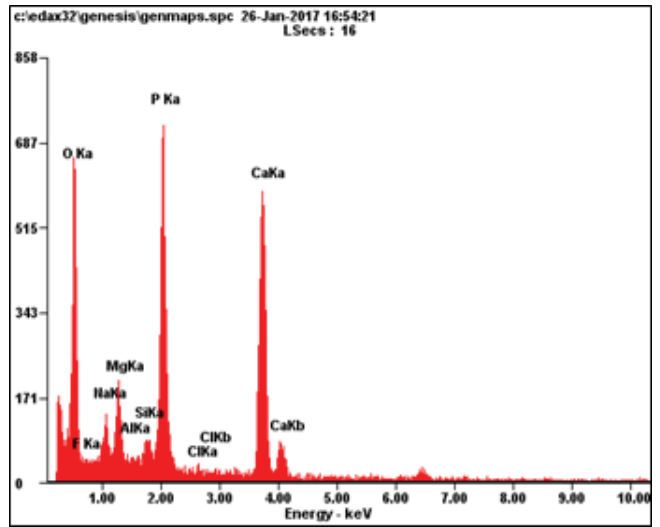
TIL07012 L2-9-1



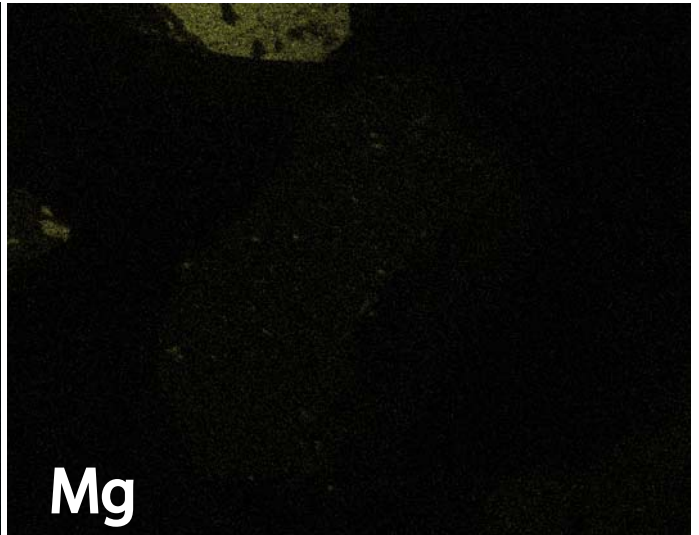
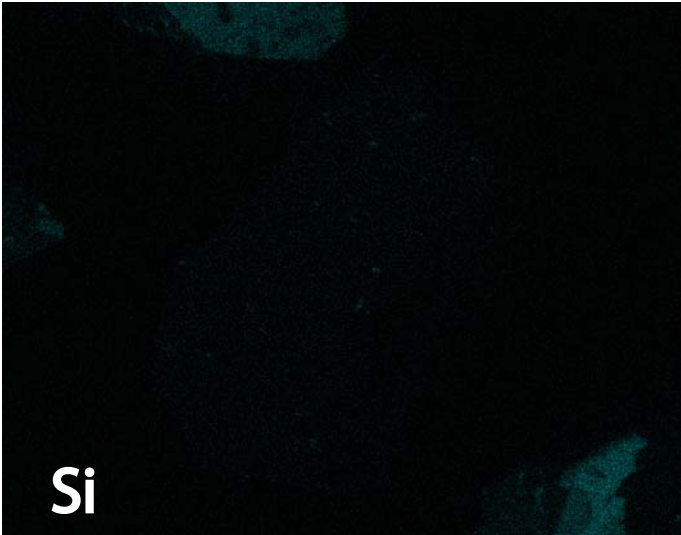
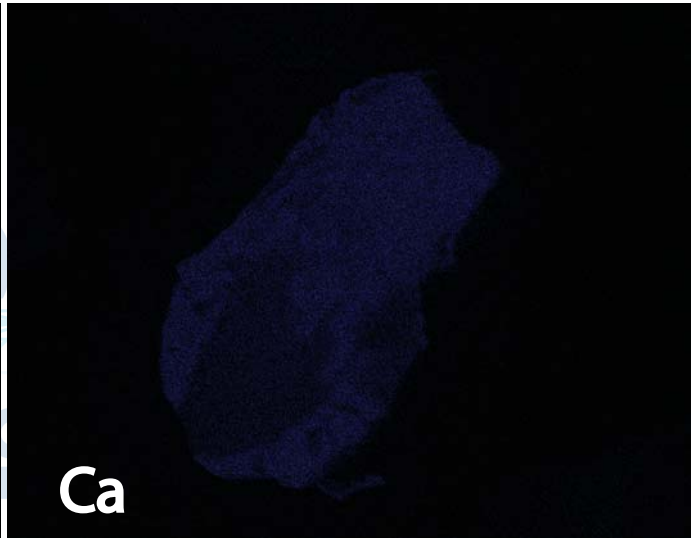
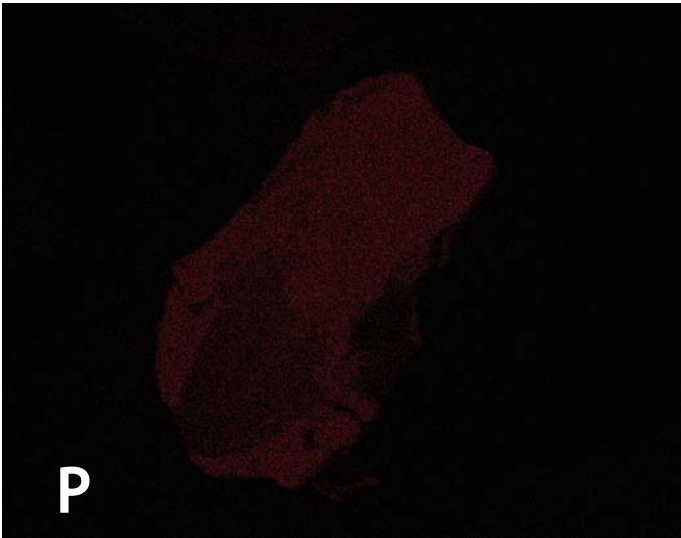
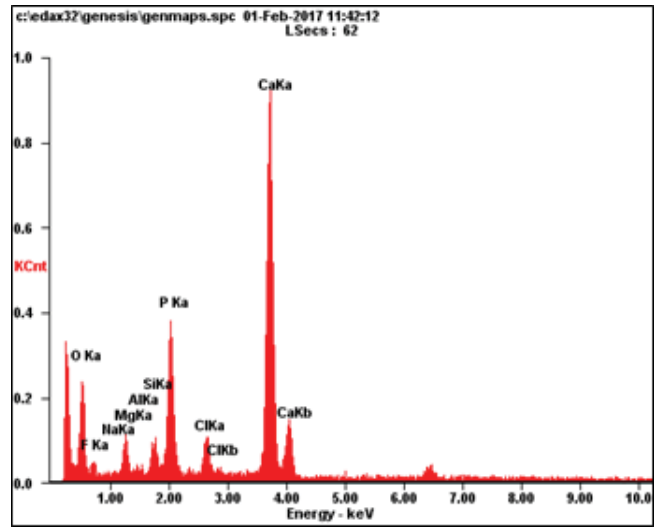
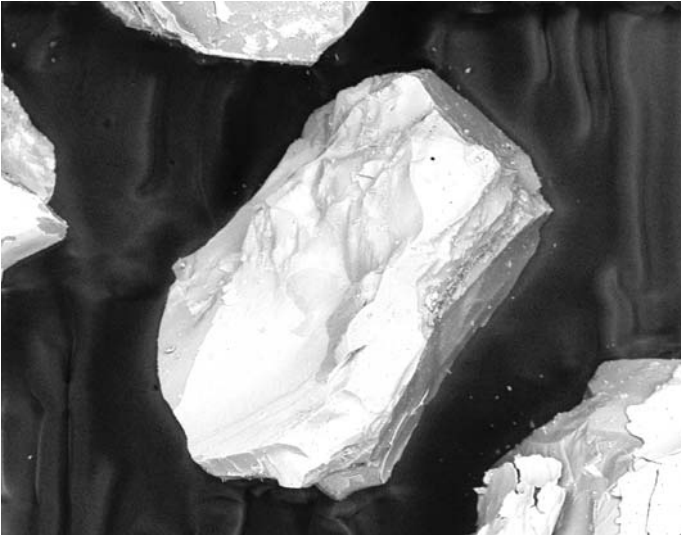
TIL07012 L2-9-2



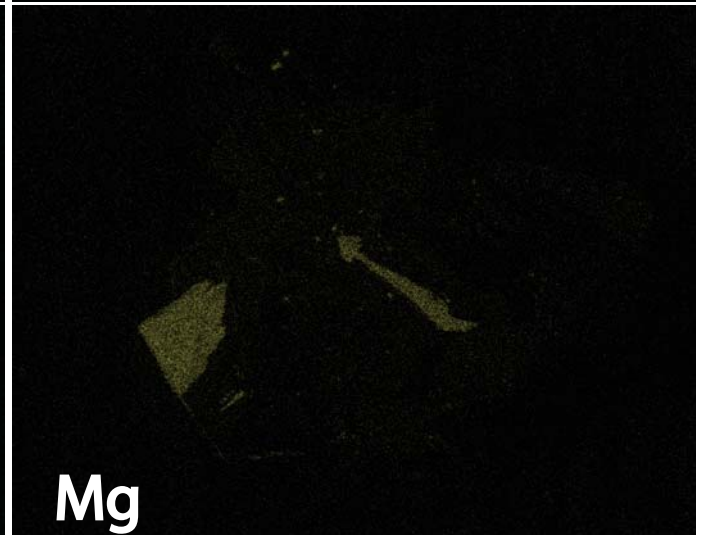
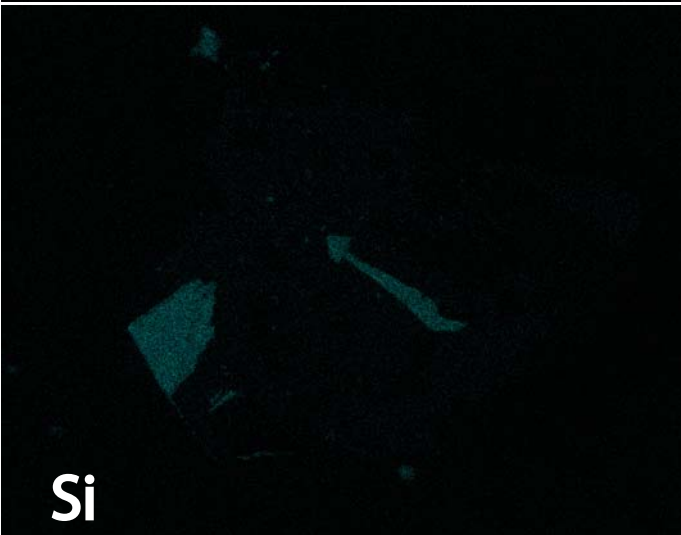
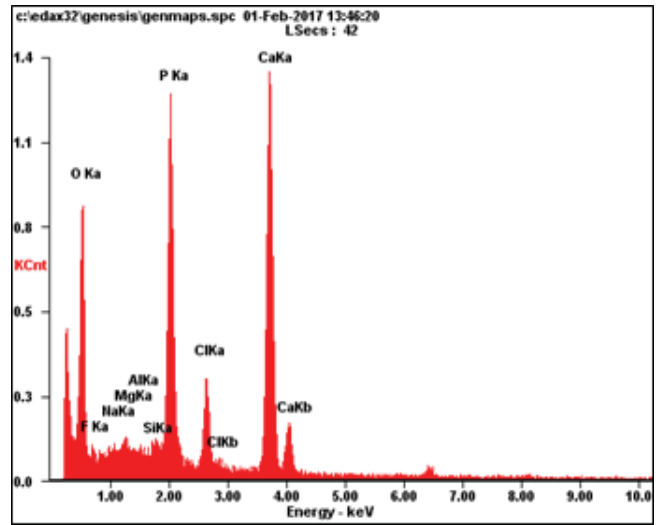
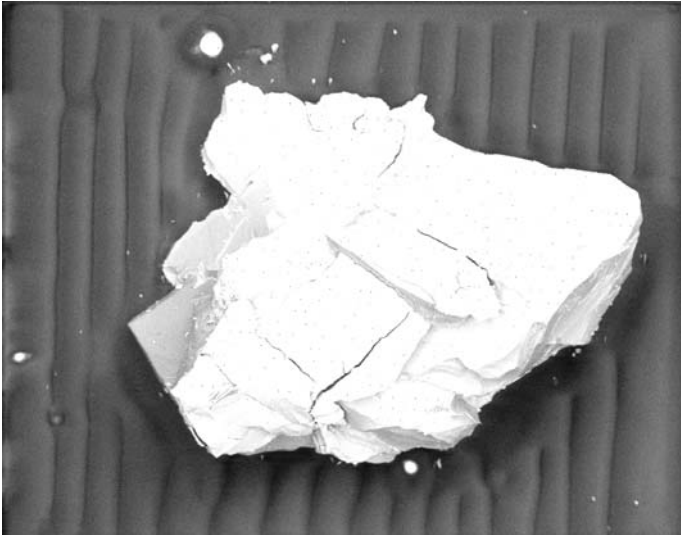
TIL07012 L2-10-1



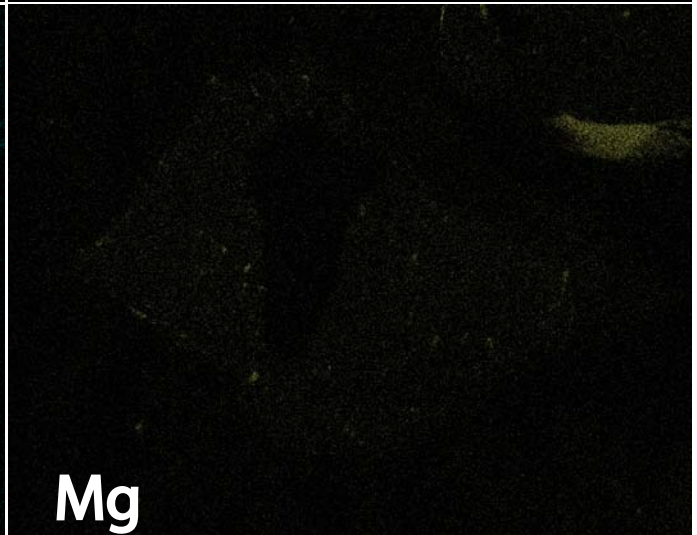
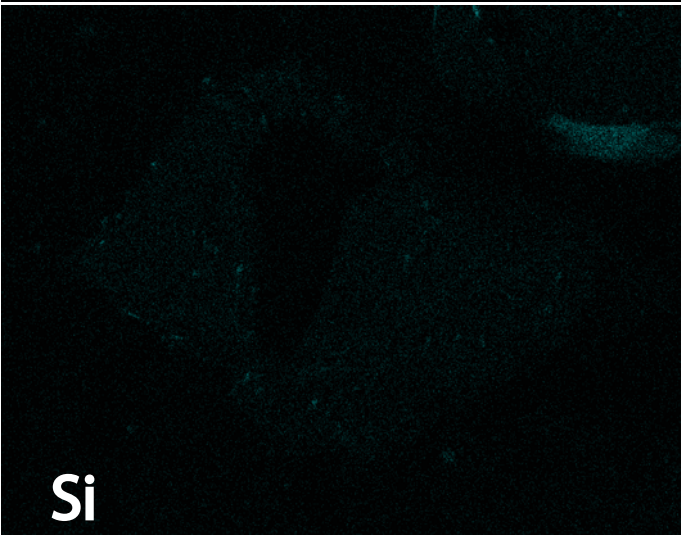
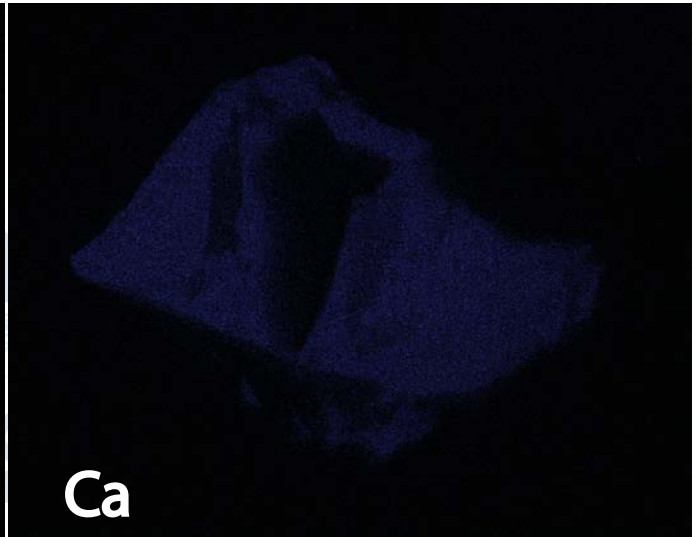
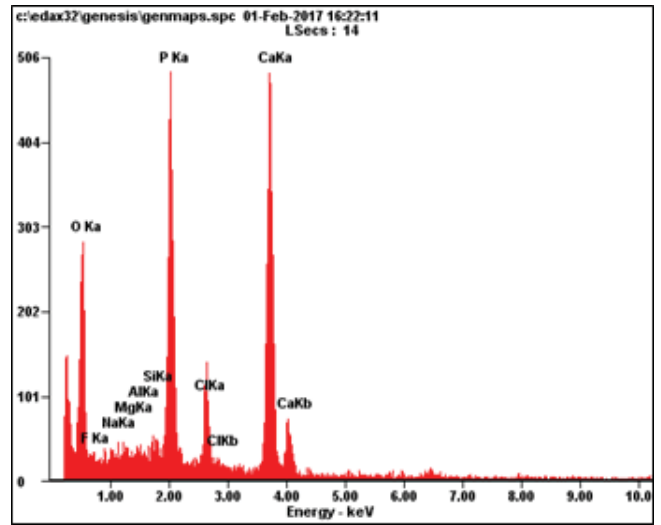
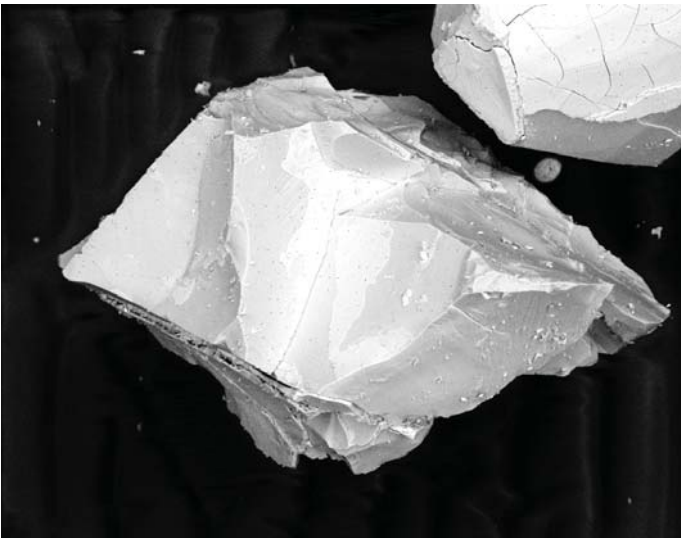
TIL07012 L3-3-1



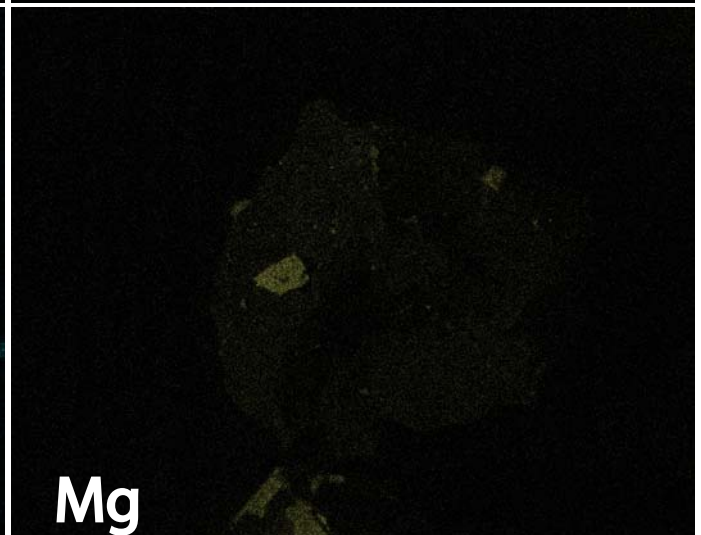
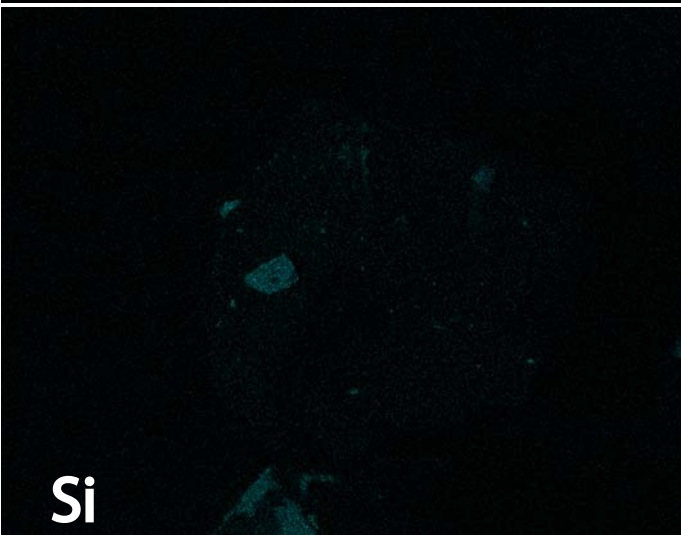
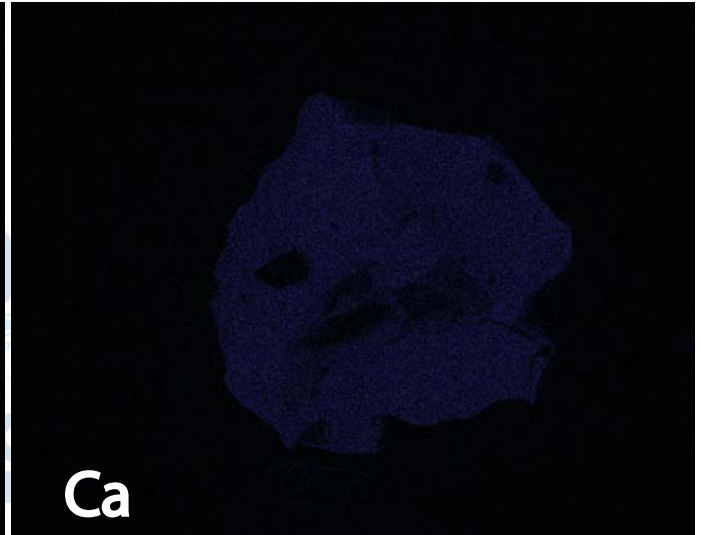
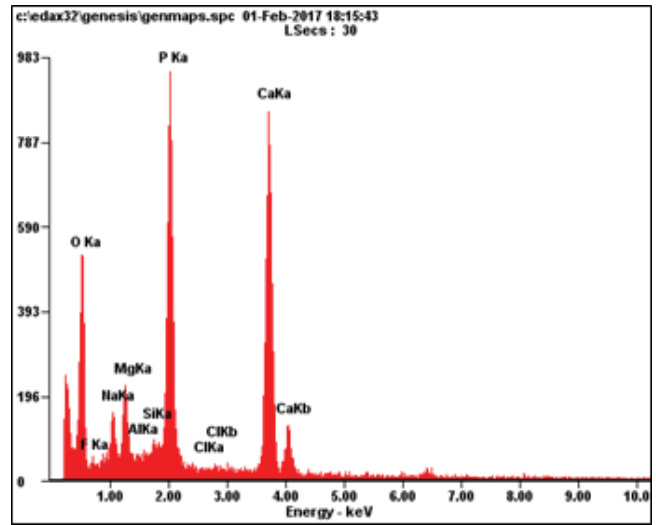
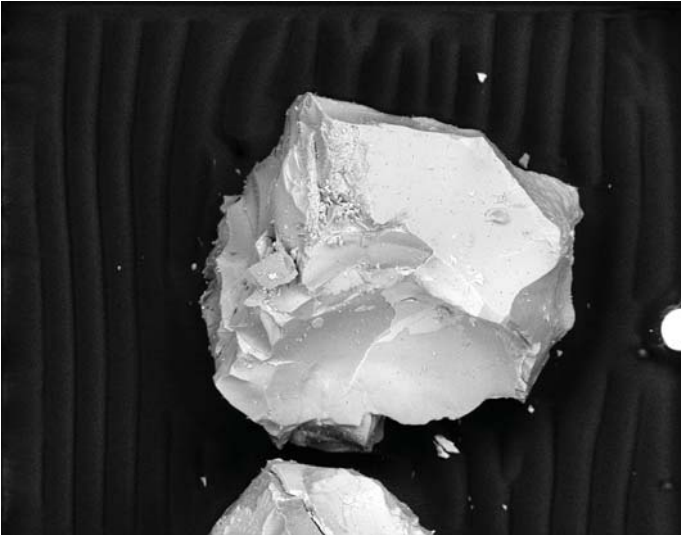
TIL07012 L3-5-1



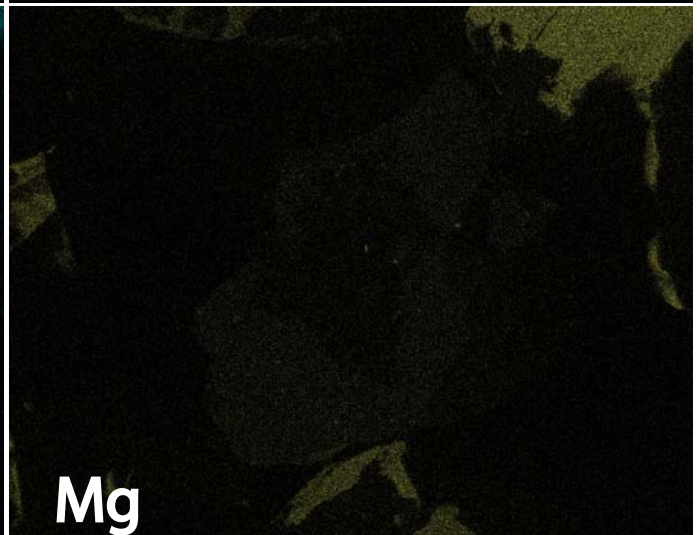
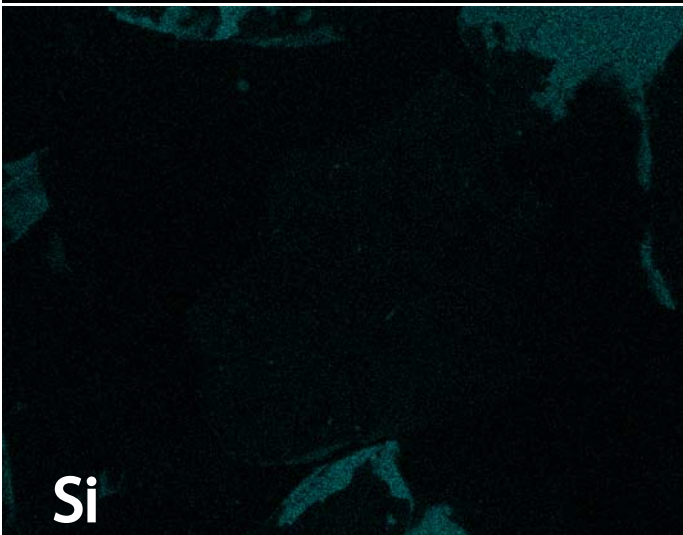
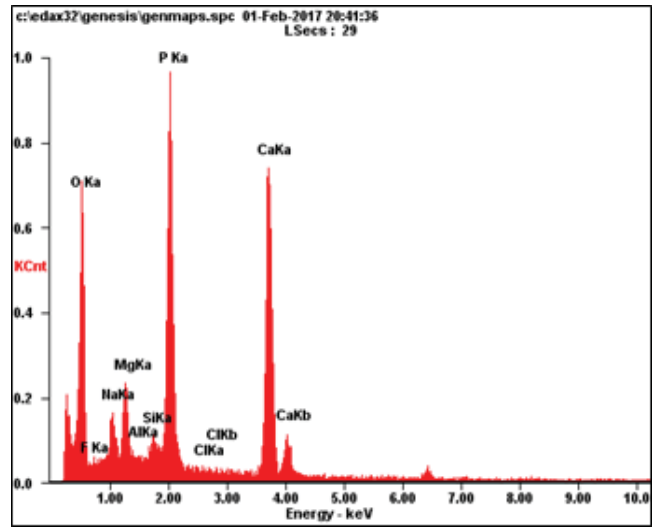
TIL07012 L3-7-1



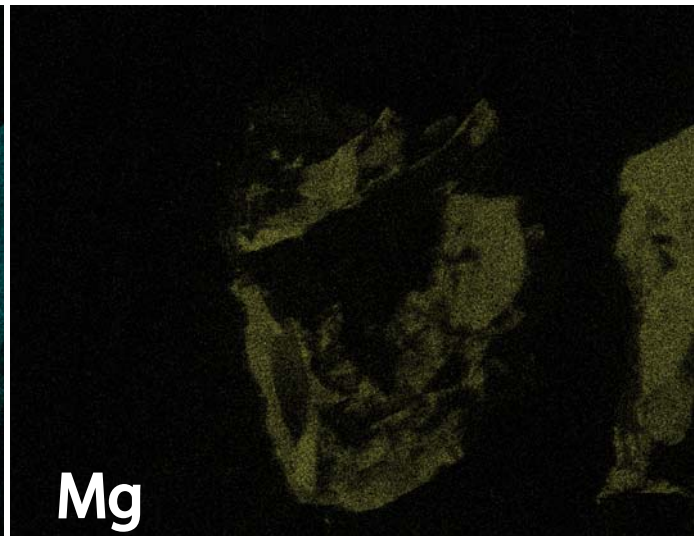
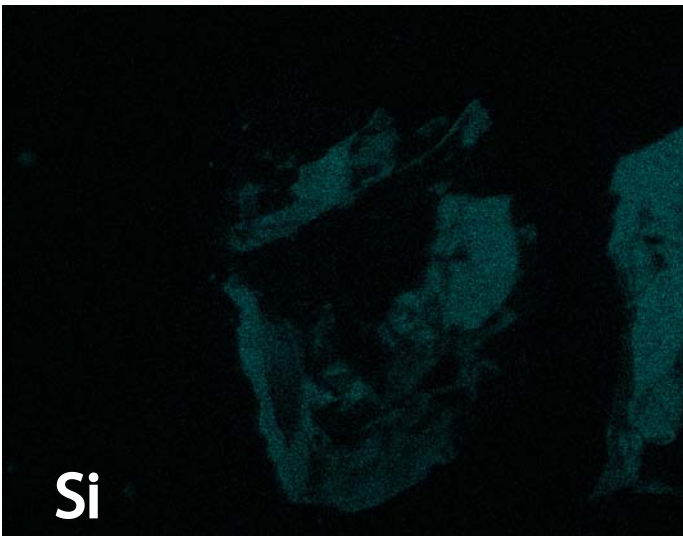
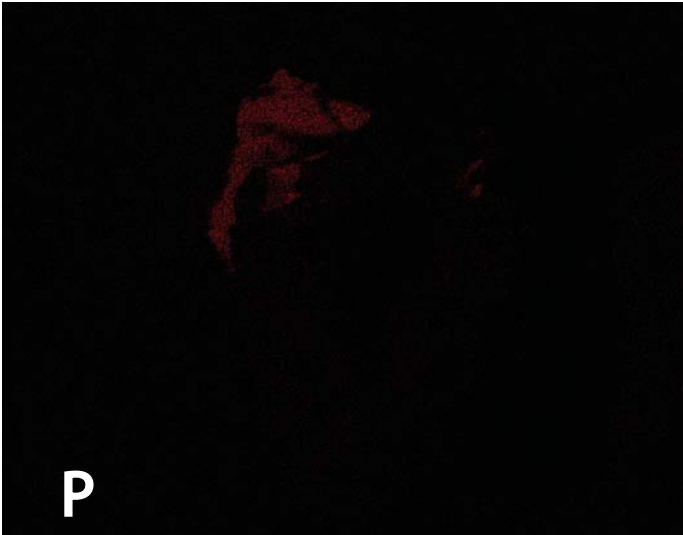
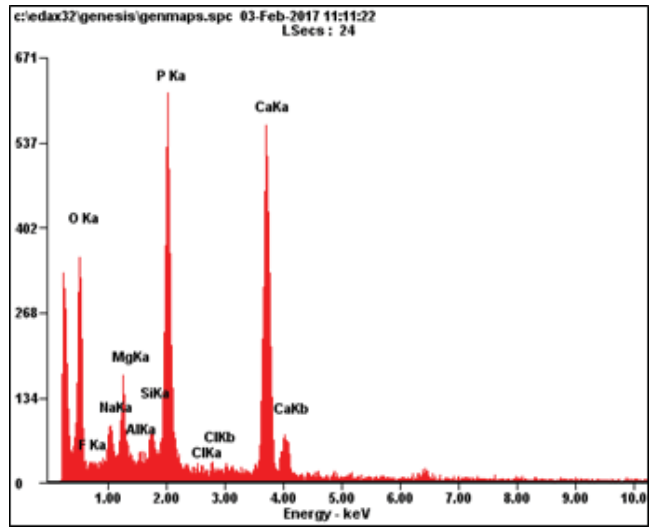
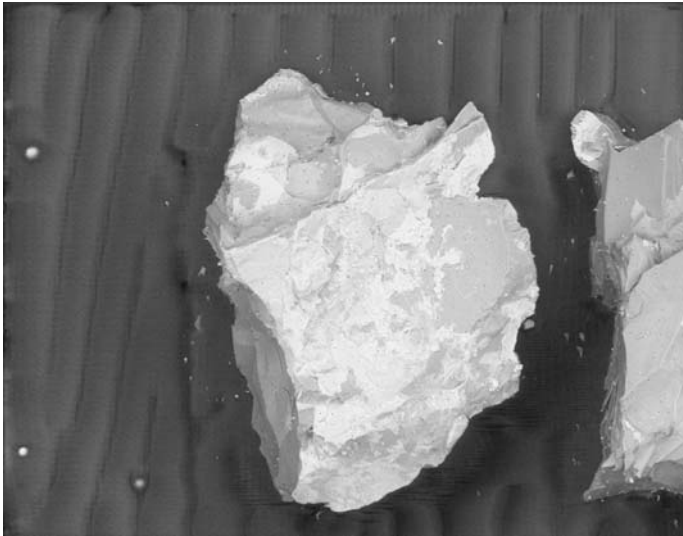
TIL07012 L3-9-1



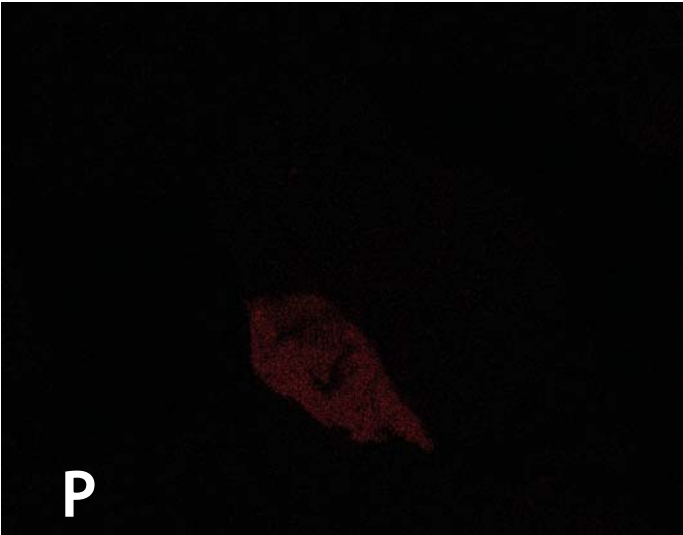
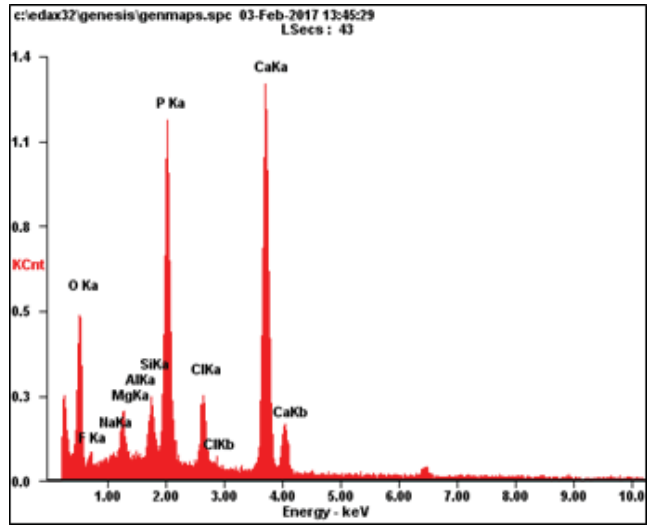
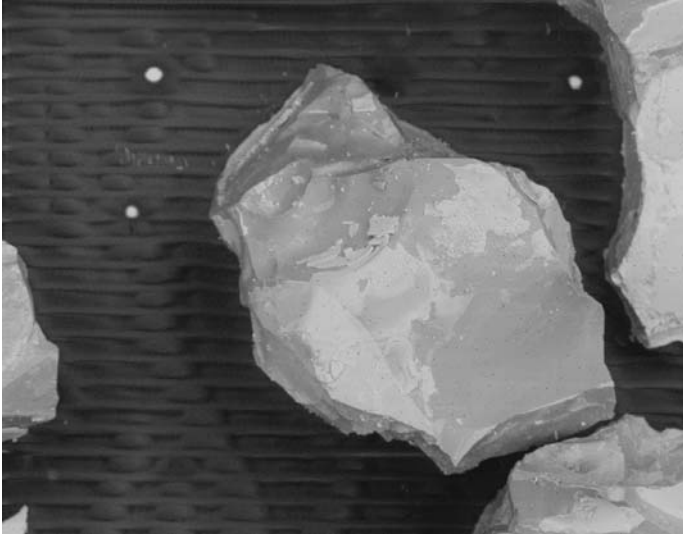
TIL07012 L3-10-1



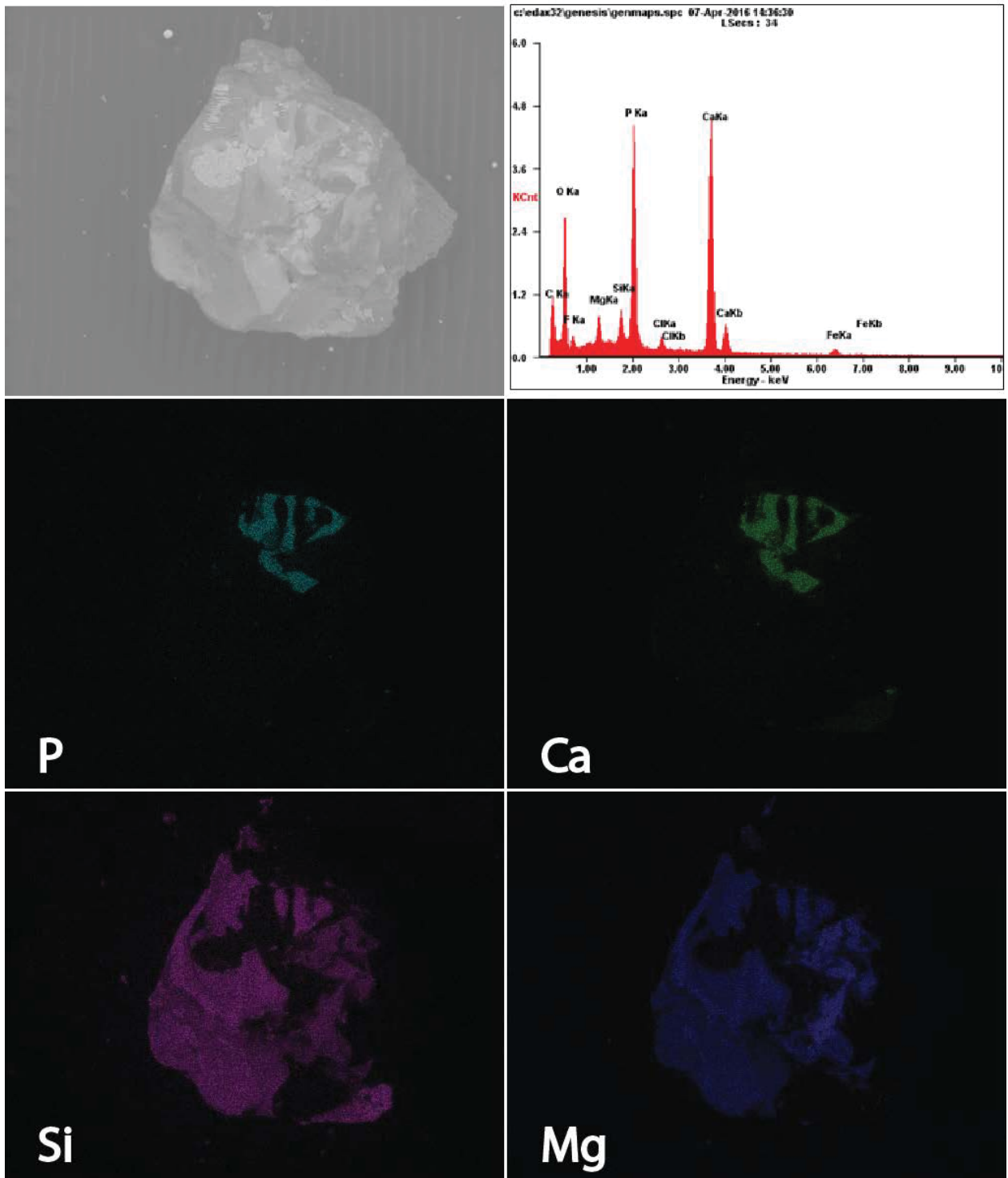
TIL07012 L4-4-1



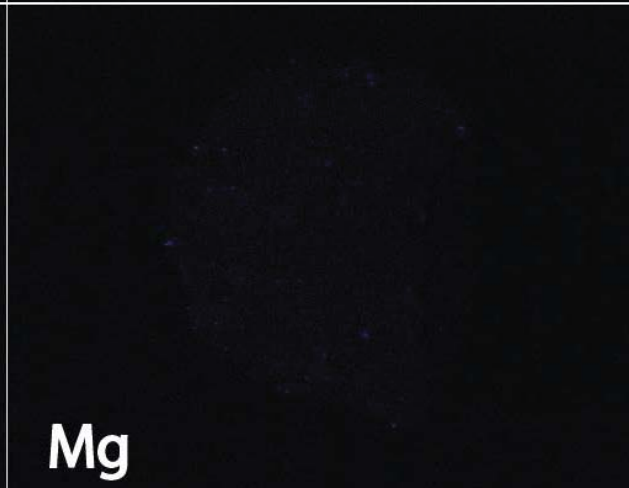
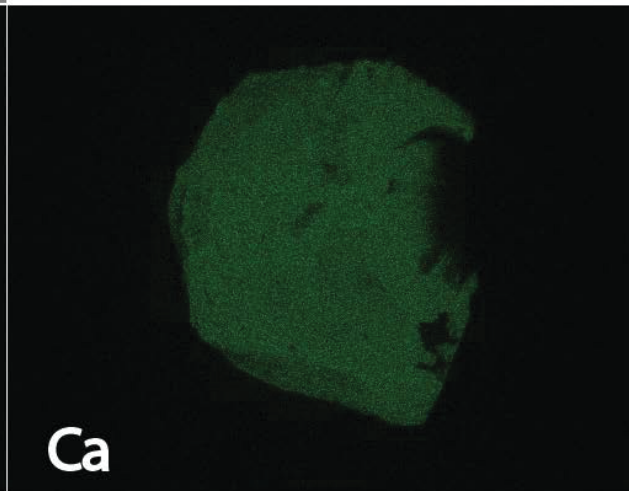
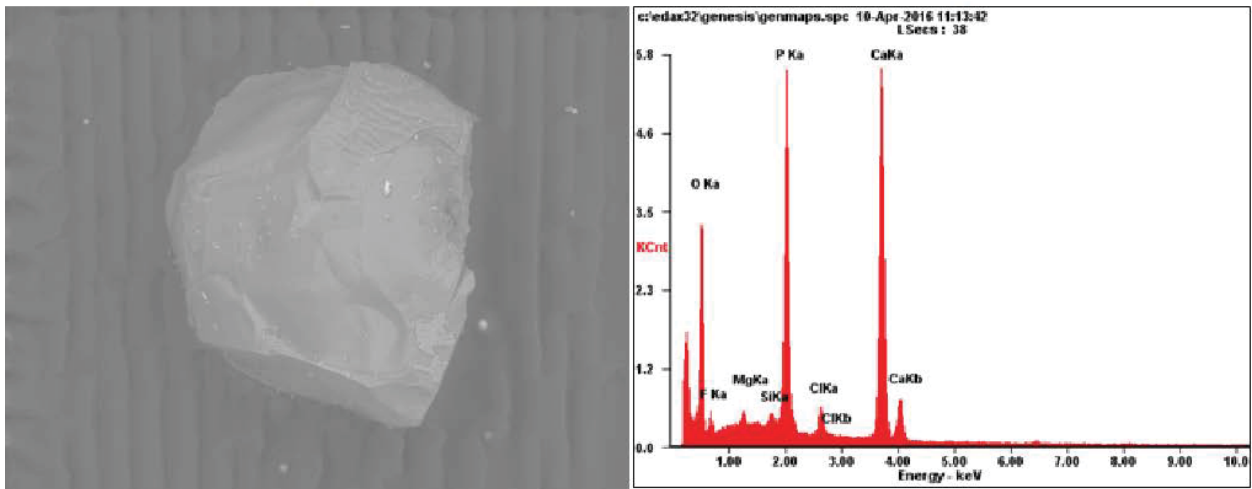
TIL07012 L4-14-15-1



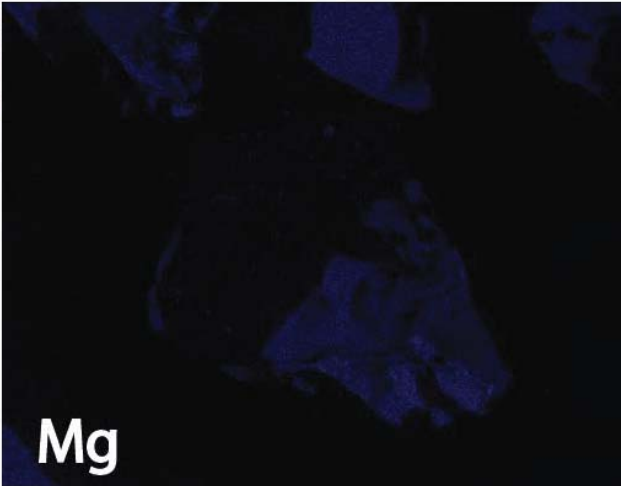
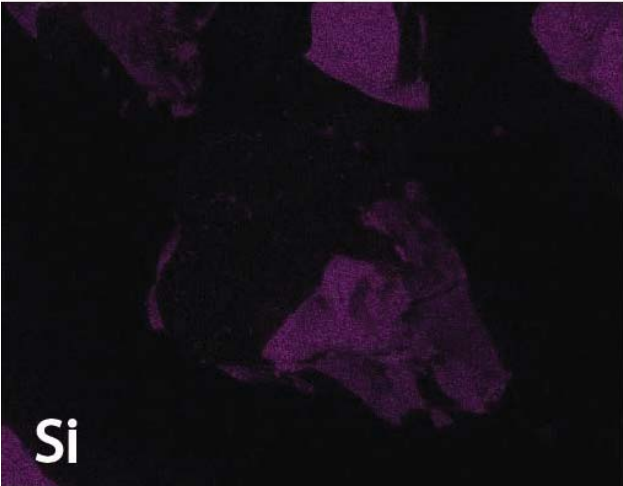
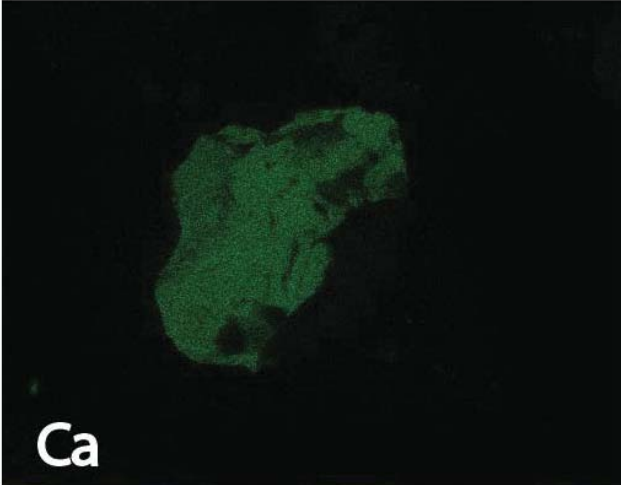
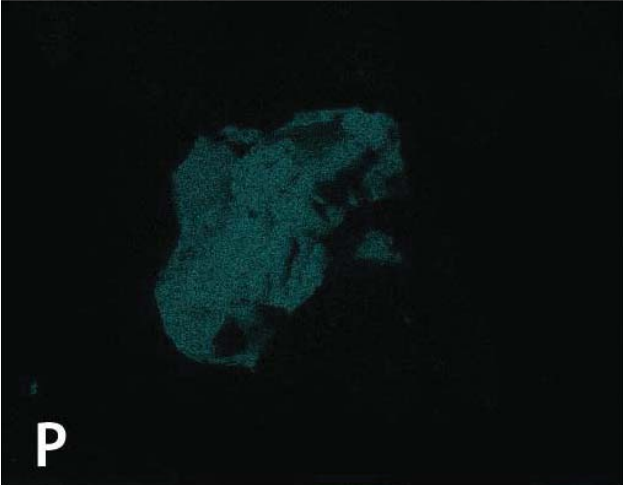
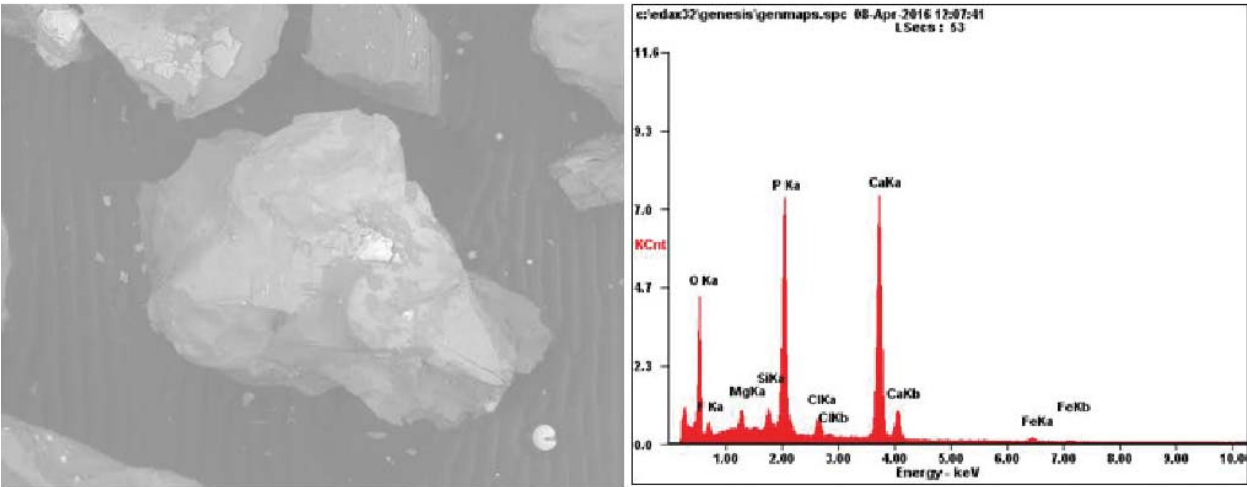
A8-3-one (U-Th)/He age: 1493.2 S.A. (um): 8157.312



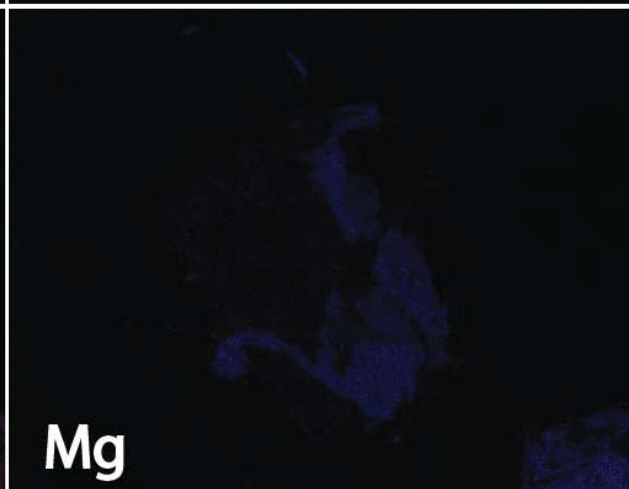
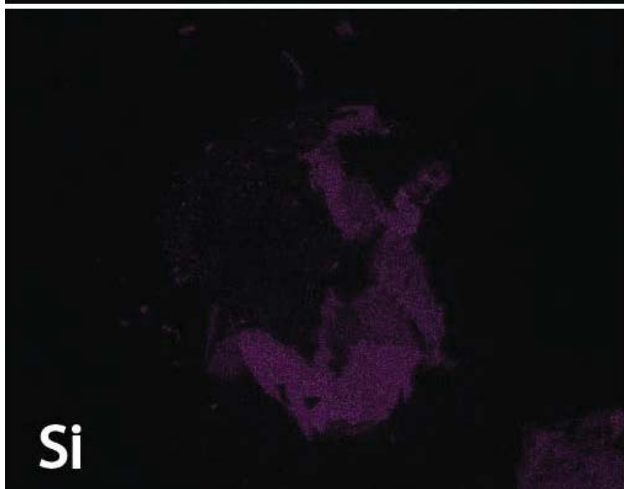
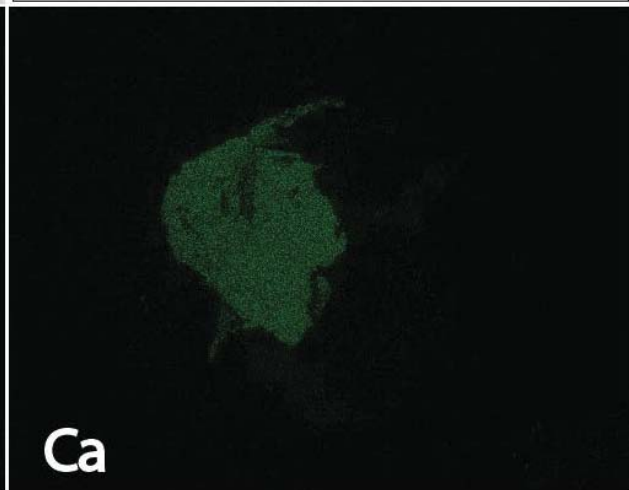
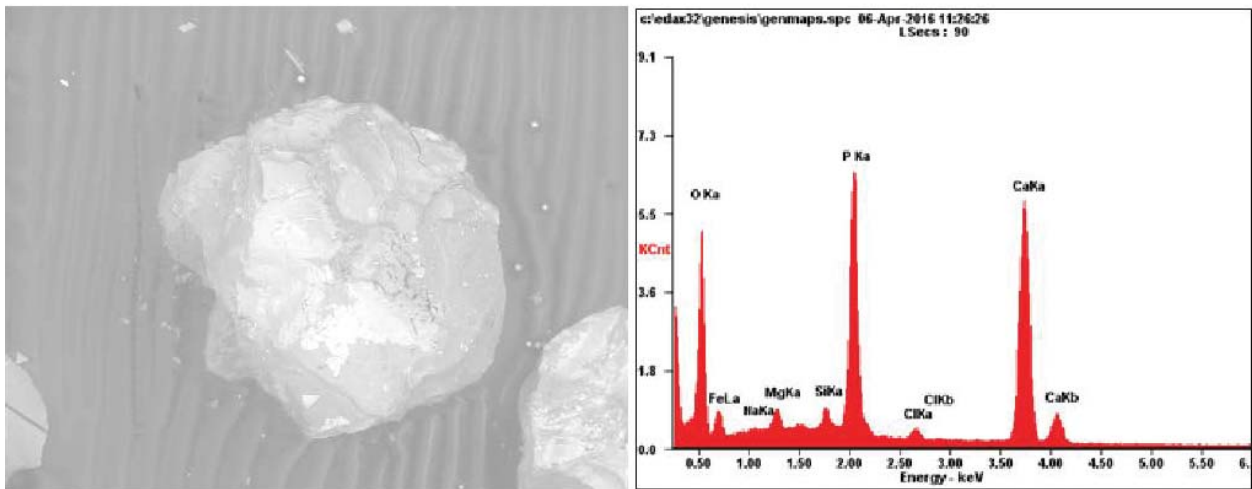
A7-6-one (U-Th)/He age: 3846.4 Ma S.A. (um): 36982.168



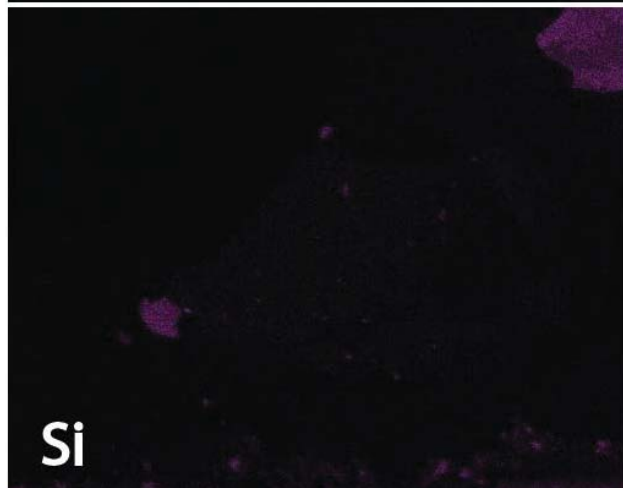
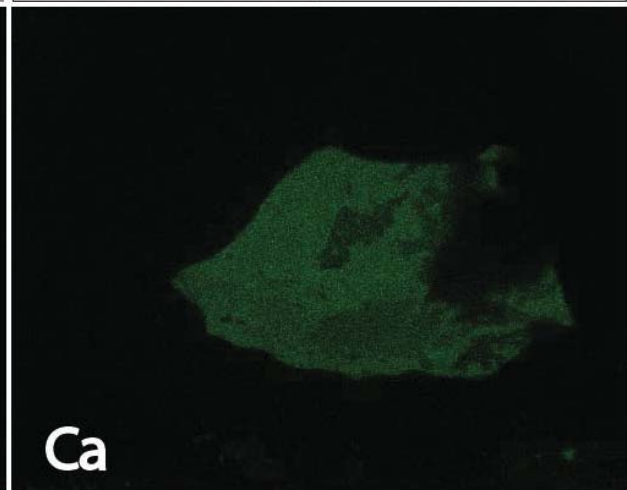
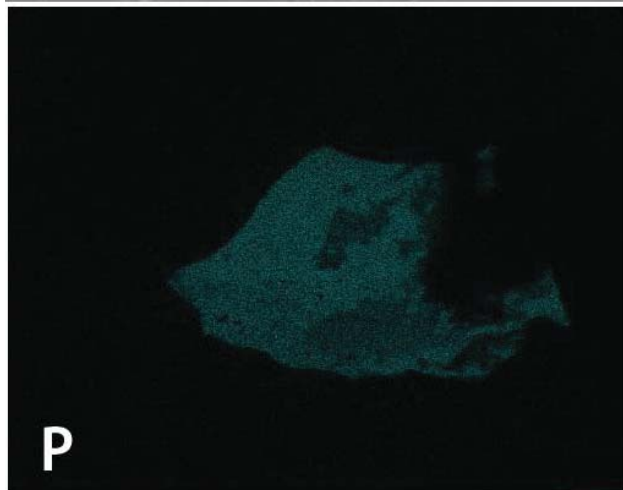
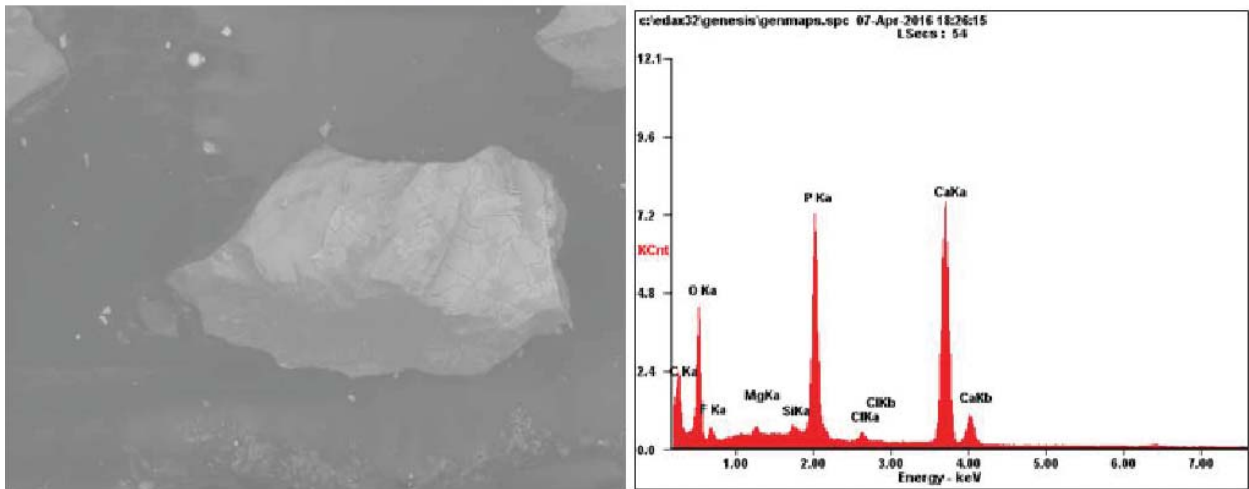
A4-5-one (U-Th)/He age: 116 Ma S.A. (um): 72512.597



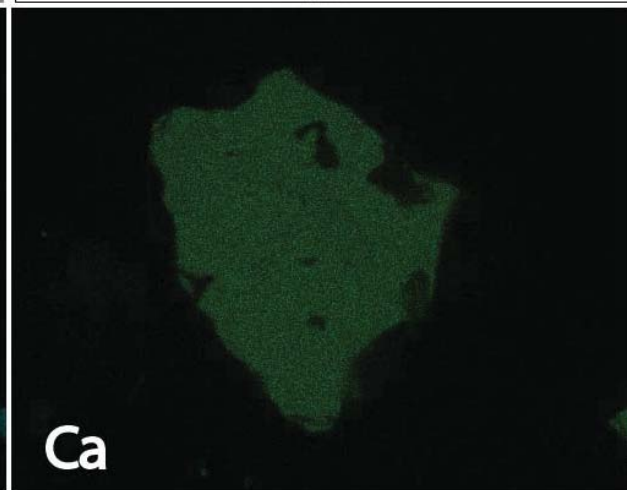
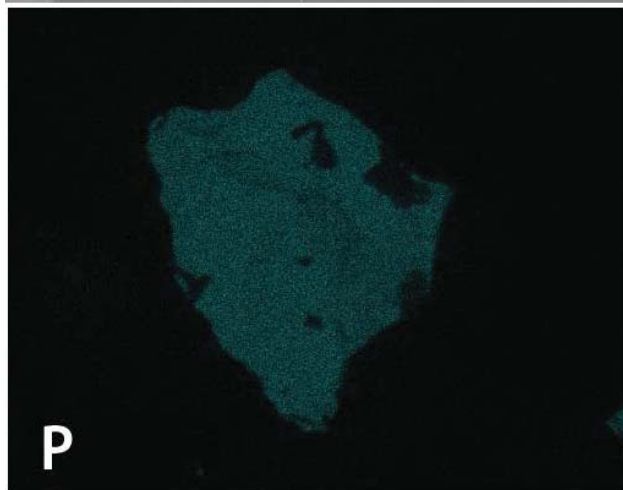
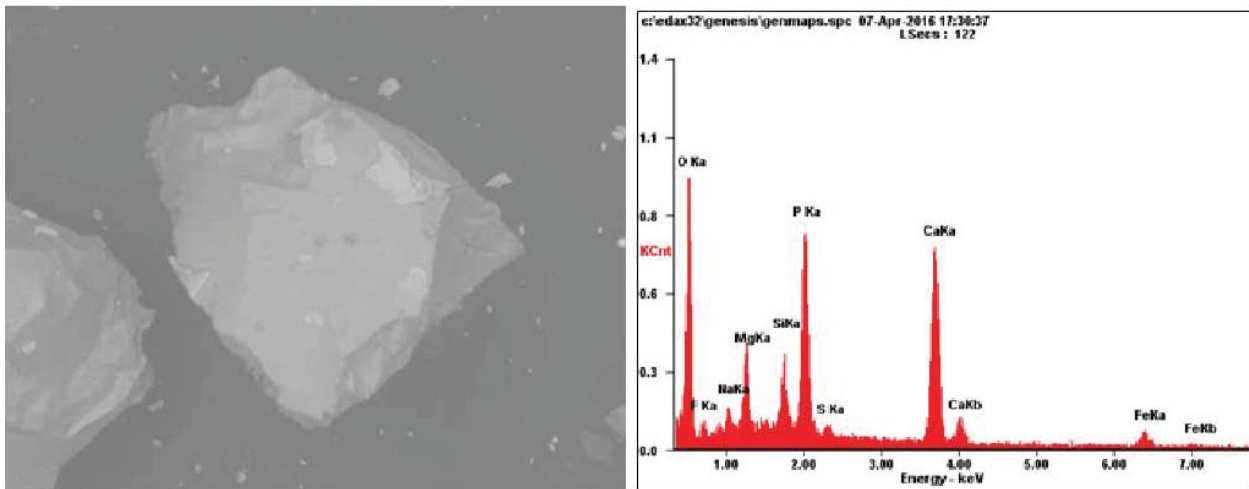
A6-1-one (U-Th)/He age: 3298.4 Ma S.A. (um): 75521.812



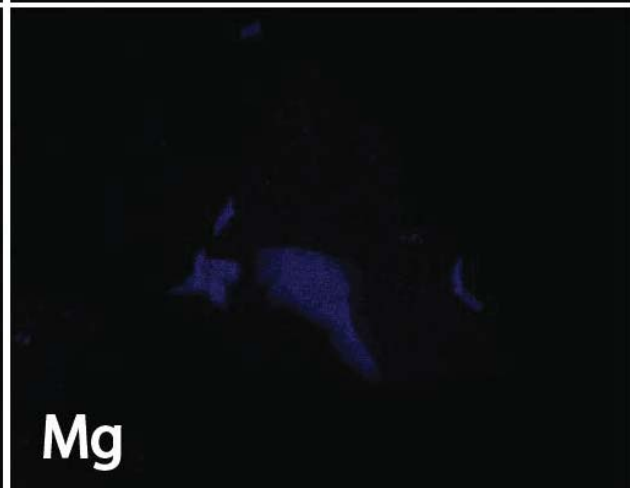
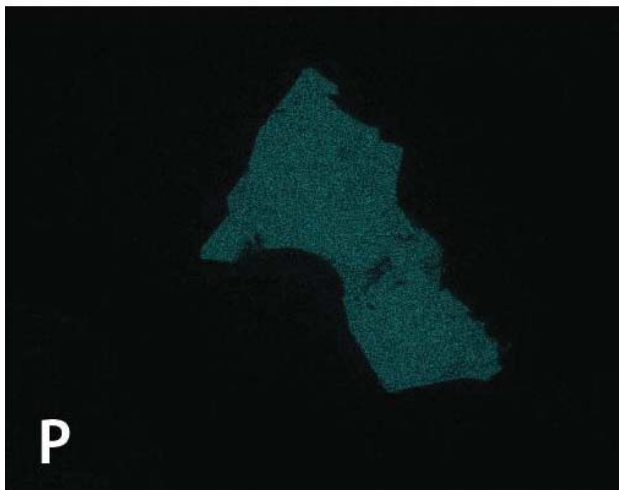
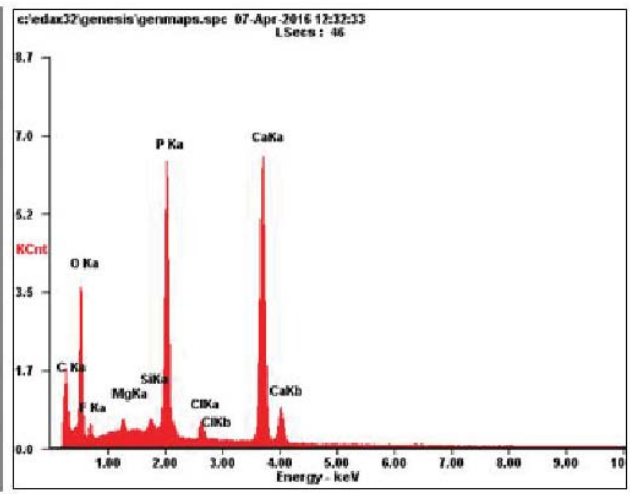
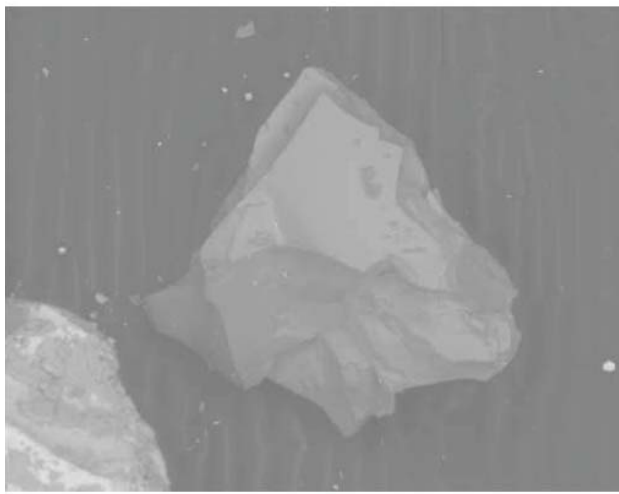
A3-4-two (U-Th)/He age: 2303.8 Ma S.A. (um): 18184.447



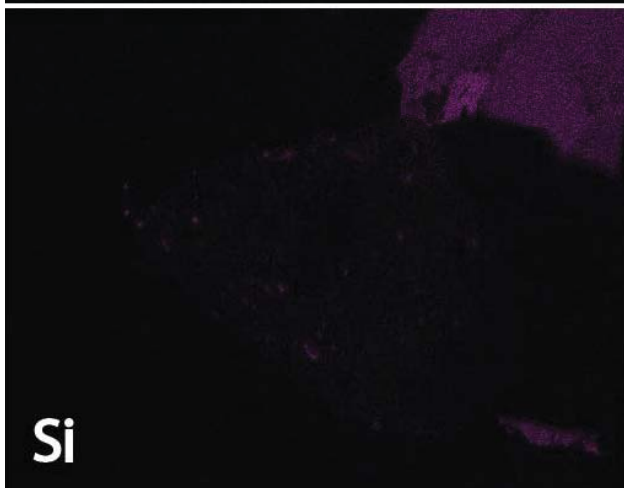
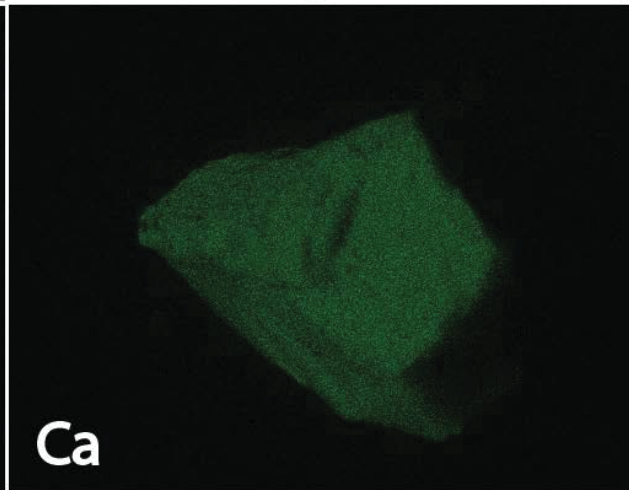
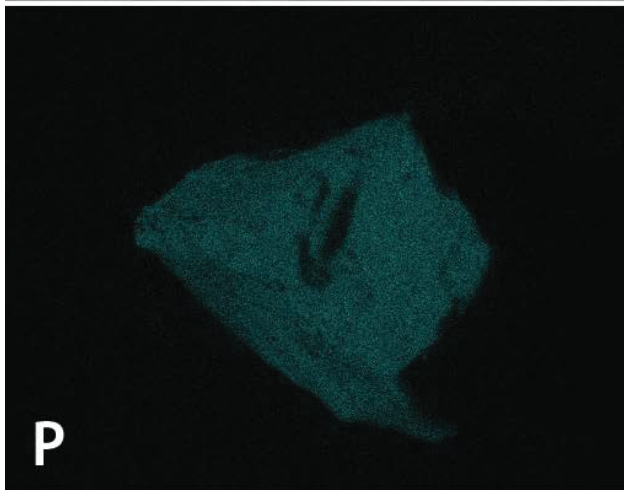
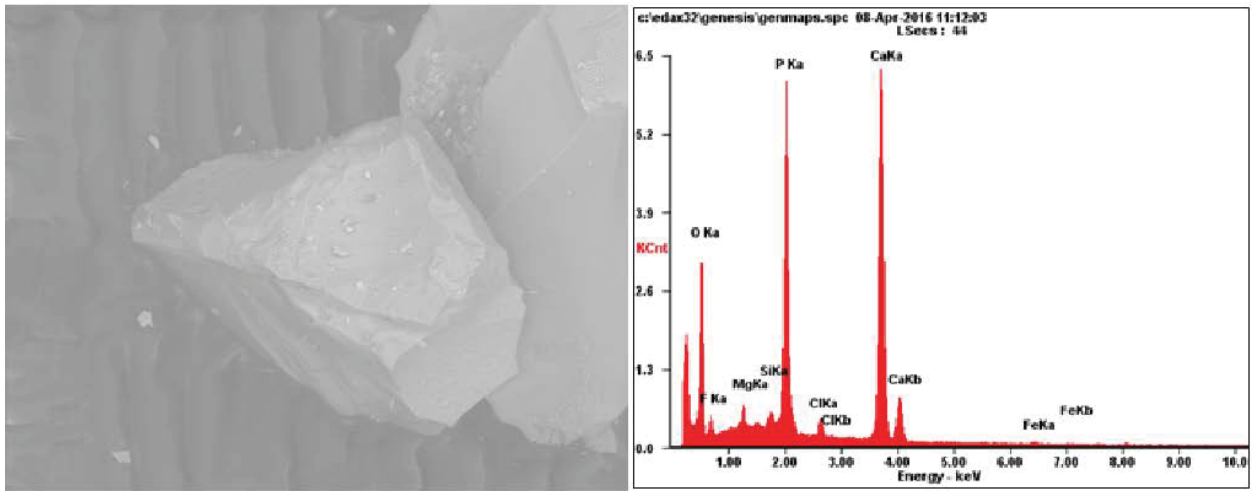
A3-4-one (U-Th)/He age: 3125.6 Ma S.A. (um): 29315.069



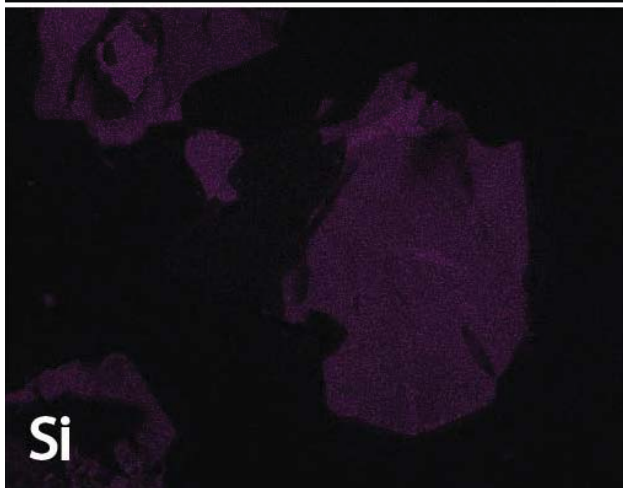
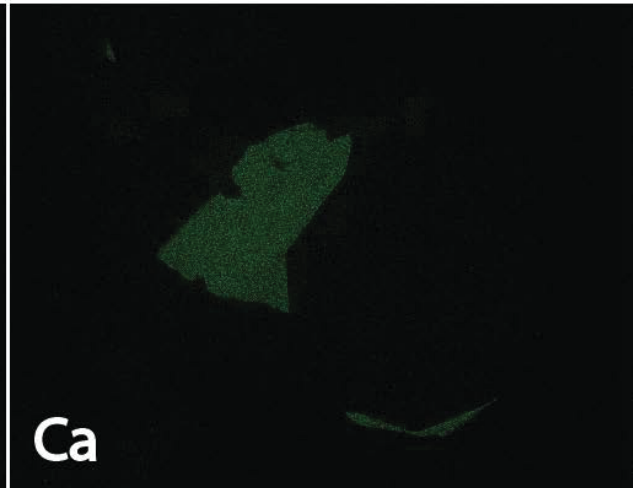
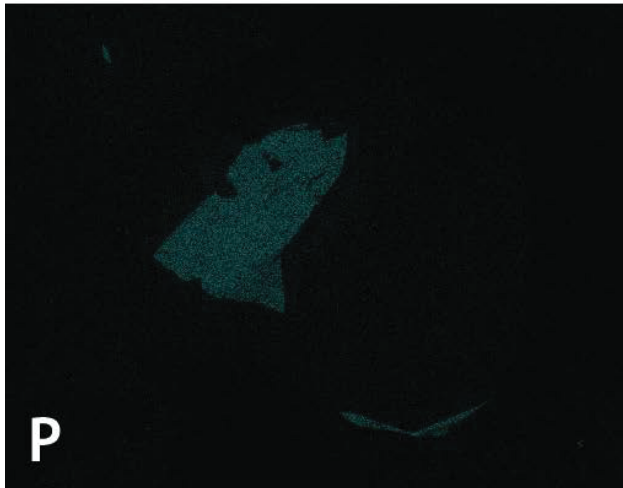
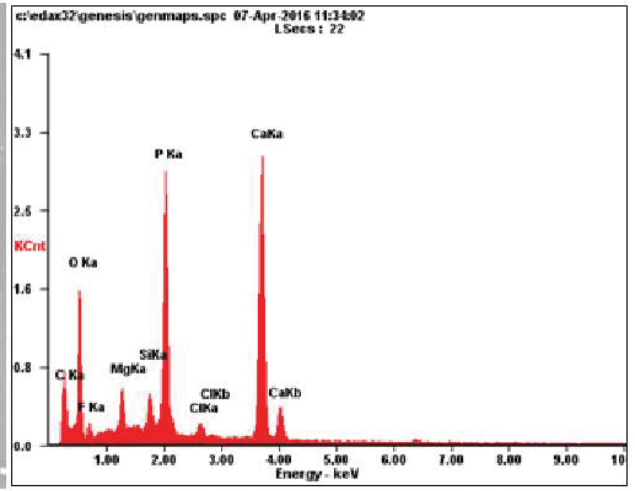
A3-3-one (U-Th)/He age: 2971.6 Ma S.A. (um): 54868.455



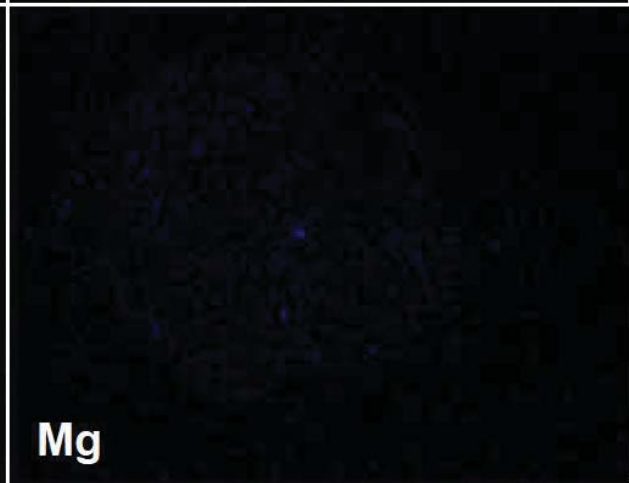
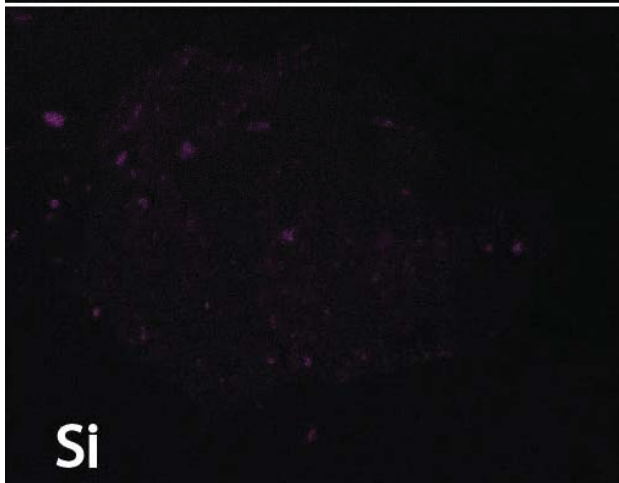
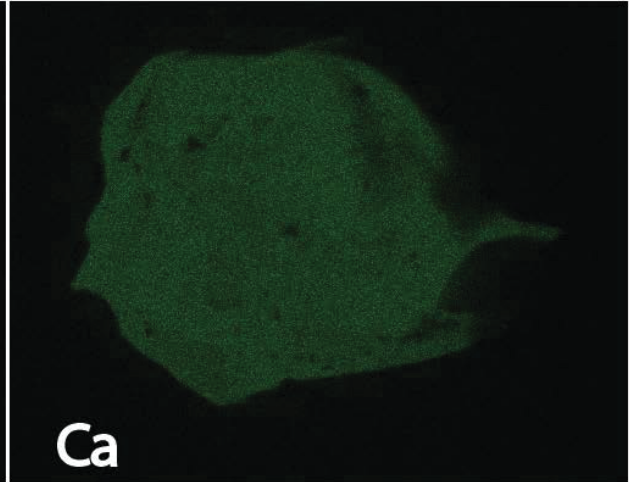
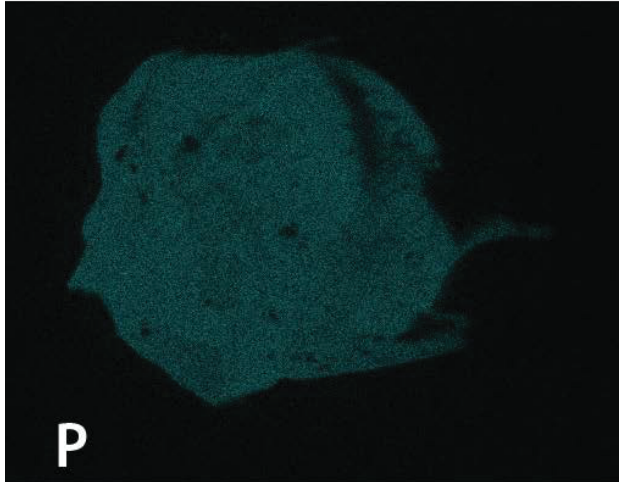
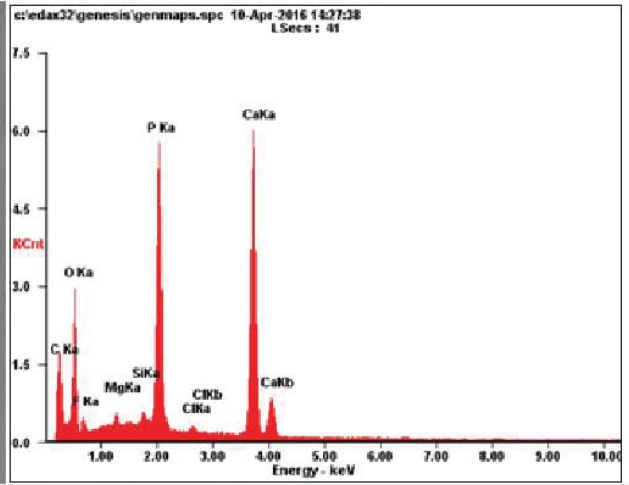
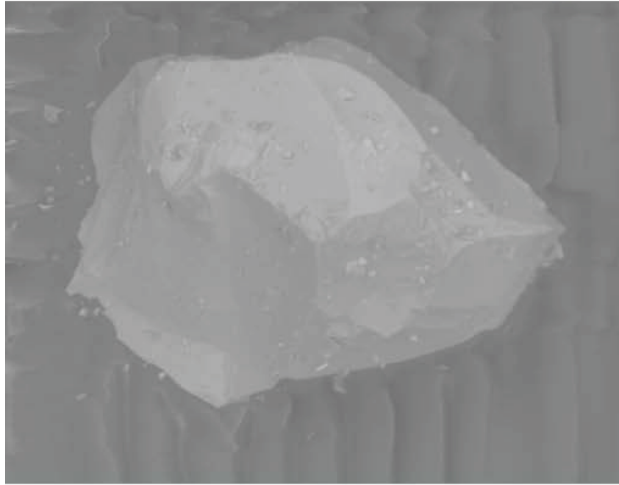
A2-5-one (U-Th)/He age: 2021.9 Ma S.A. (um): 15114.756



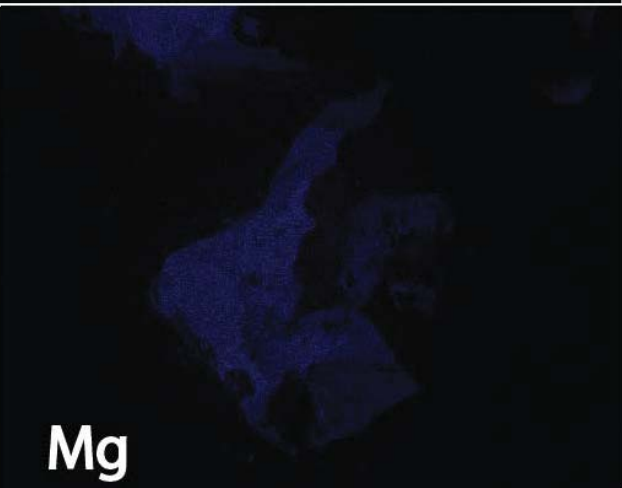
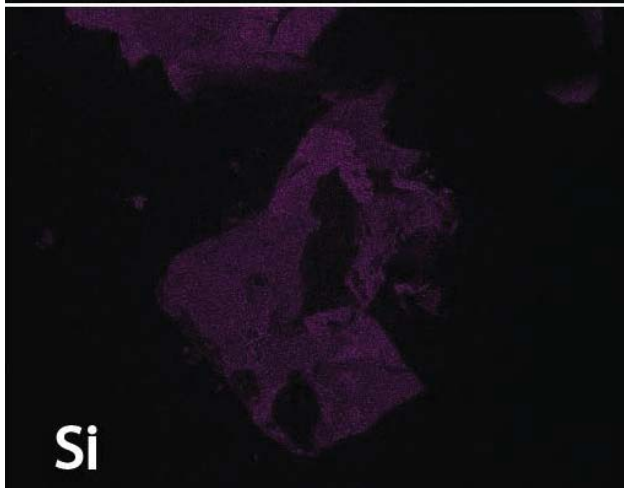
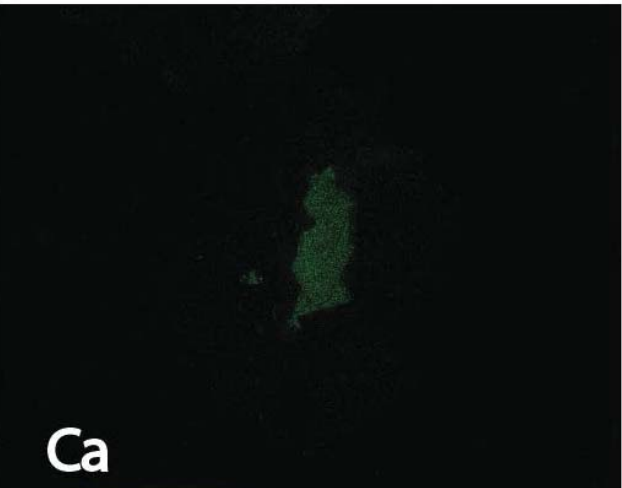
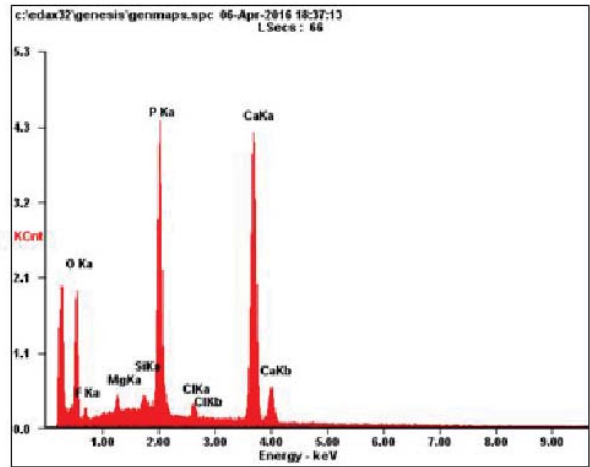
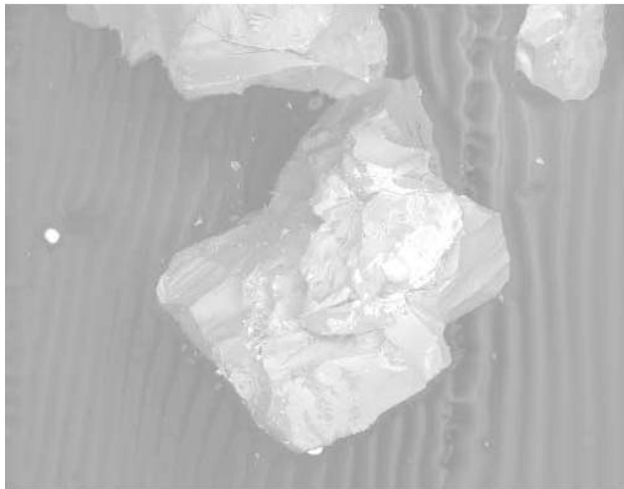
A2-3-one (U-Th)/He age: 2491 Ma S.A. (um) 20502.936



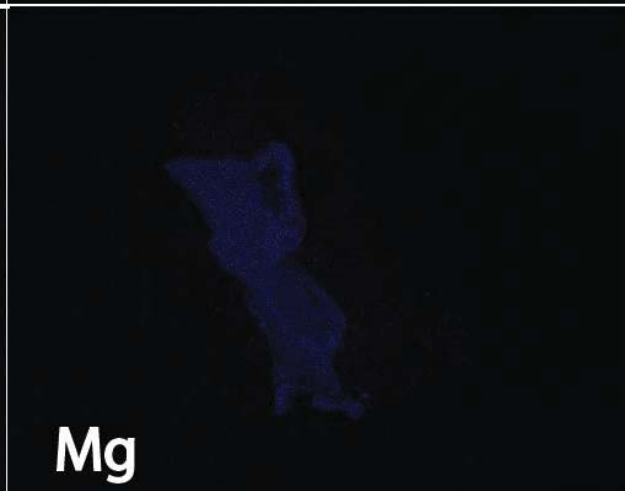
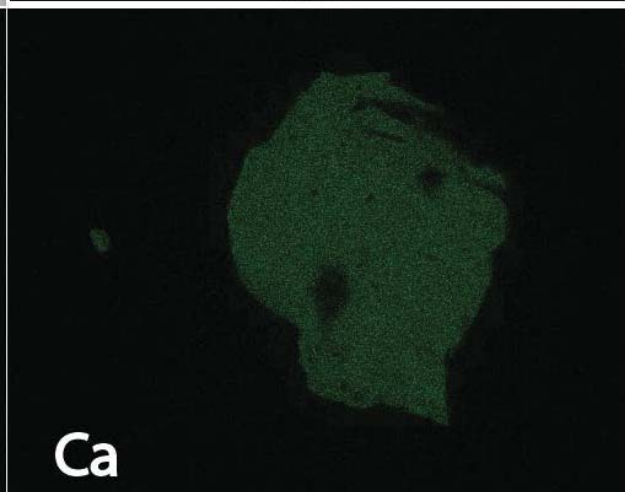
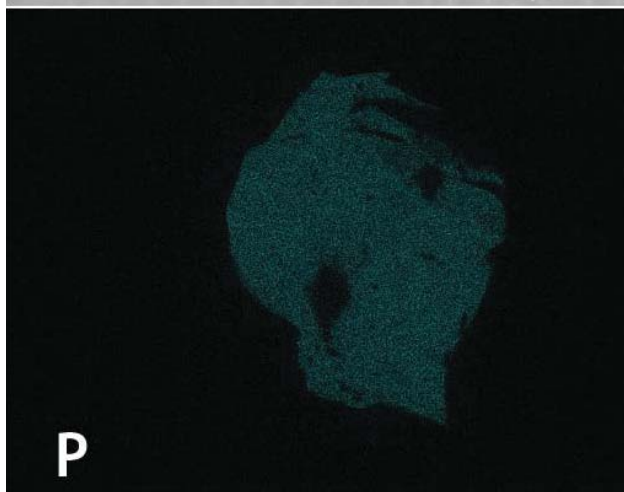
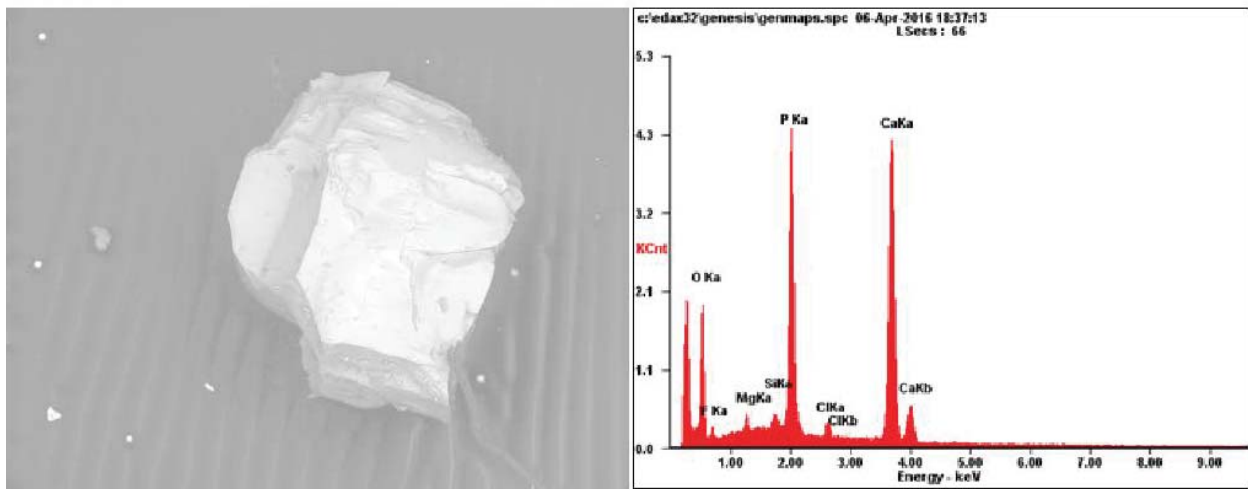
A14-6-one (U-Th)/He age: 2478.8 Ma S.A. (um): 22766.647



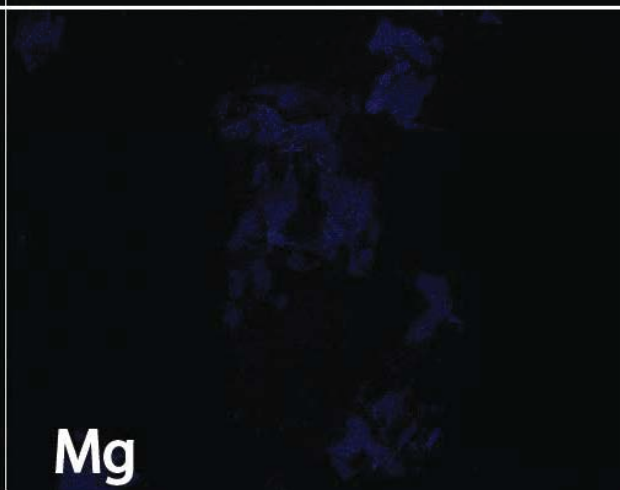
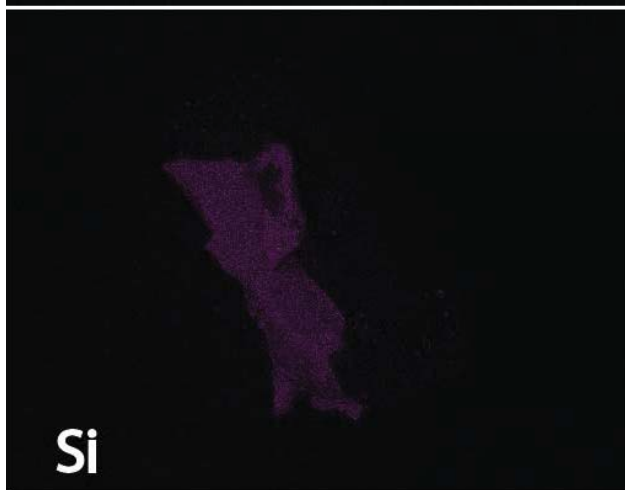
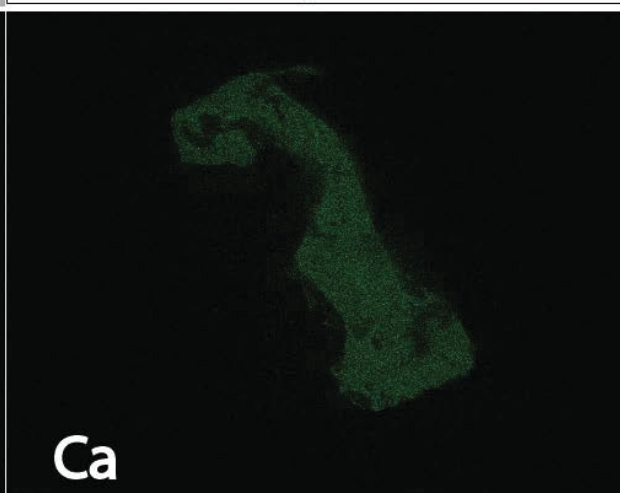
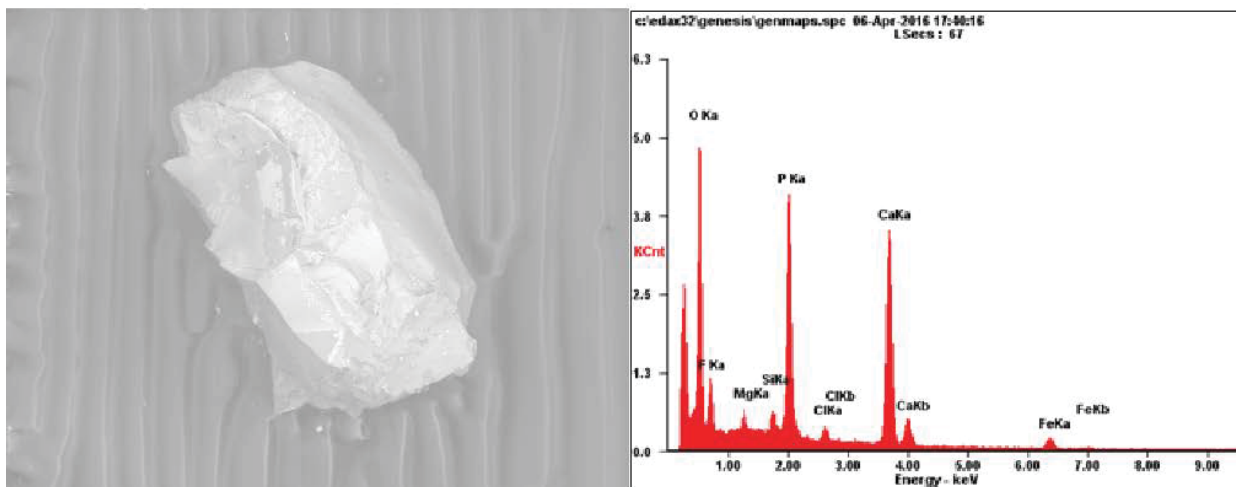
A13-1-two (U-Th)/He age: 221.2 Ma S.A. (um): 9196.678



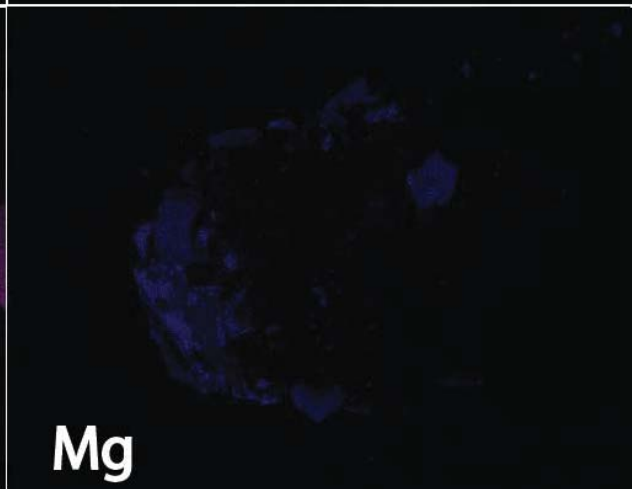
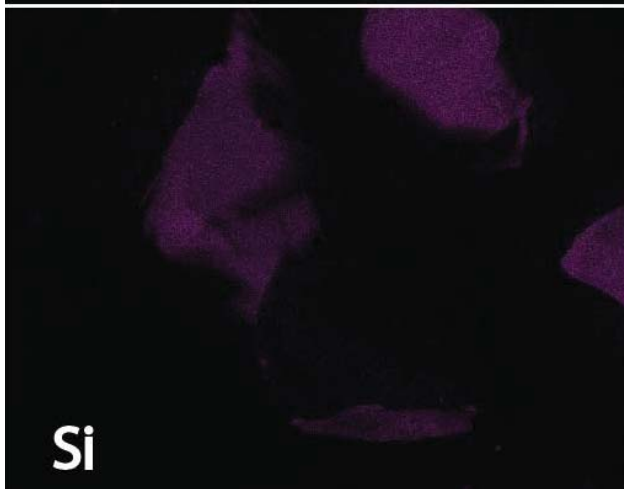
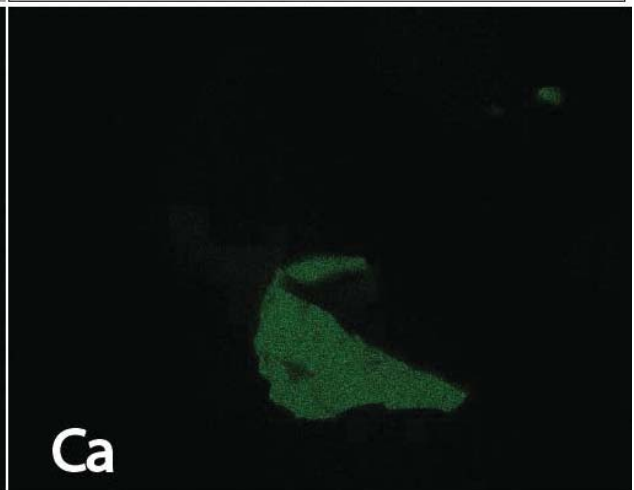
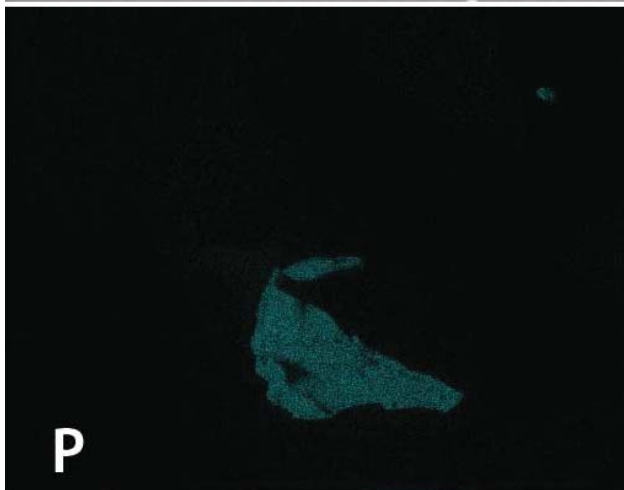
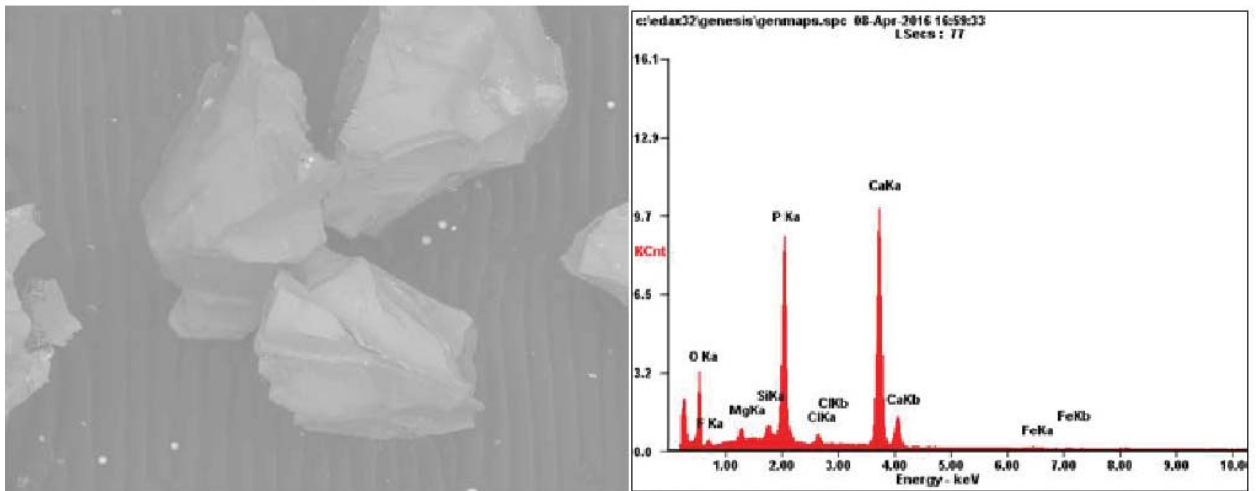
A13-1-one (U-Th)/He age: 2892.5 Ma S.A. (um): 54533.181



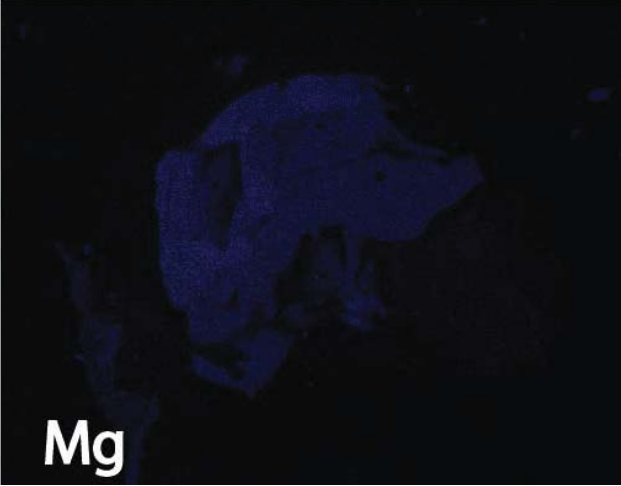
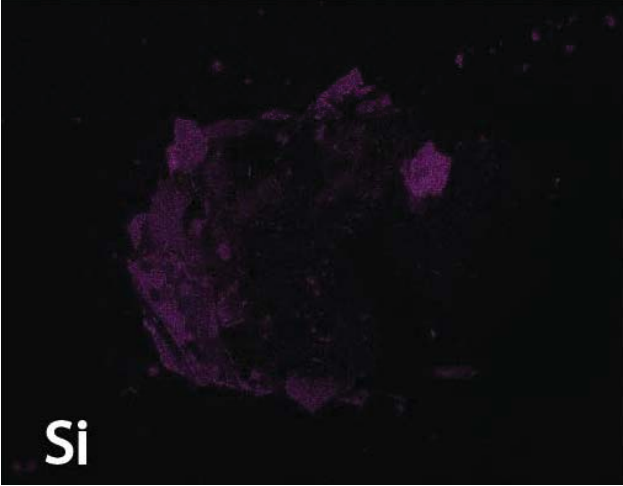
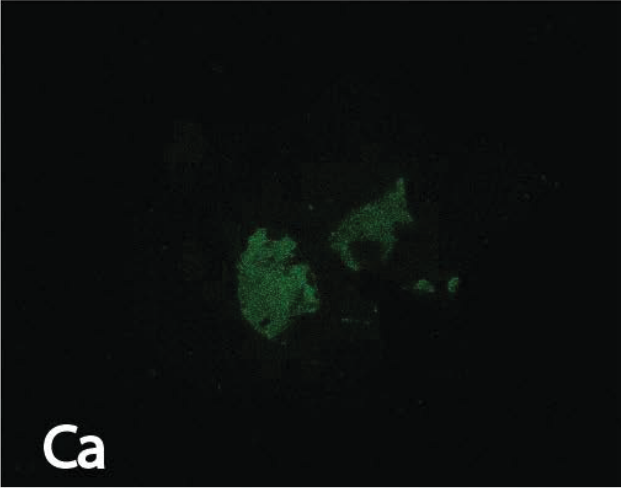
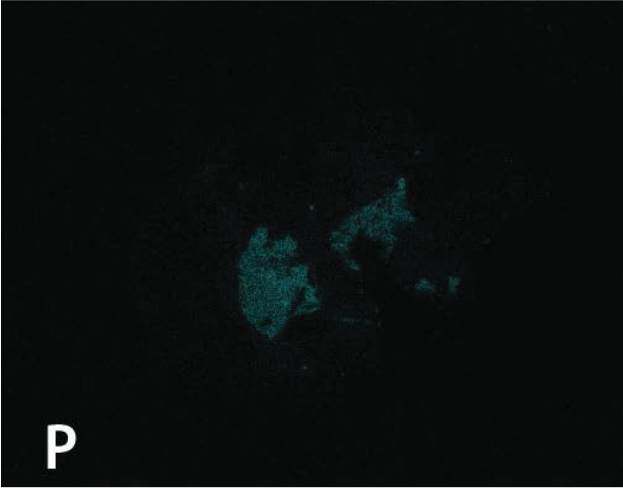
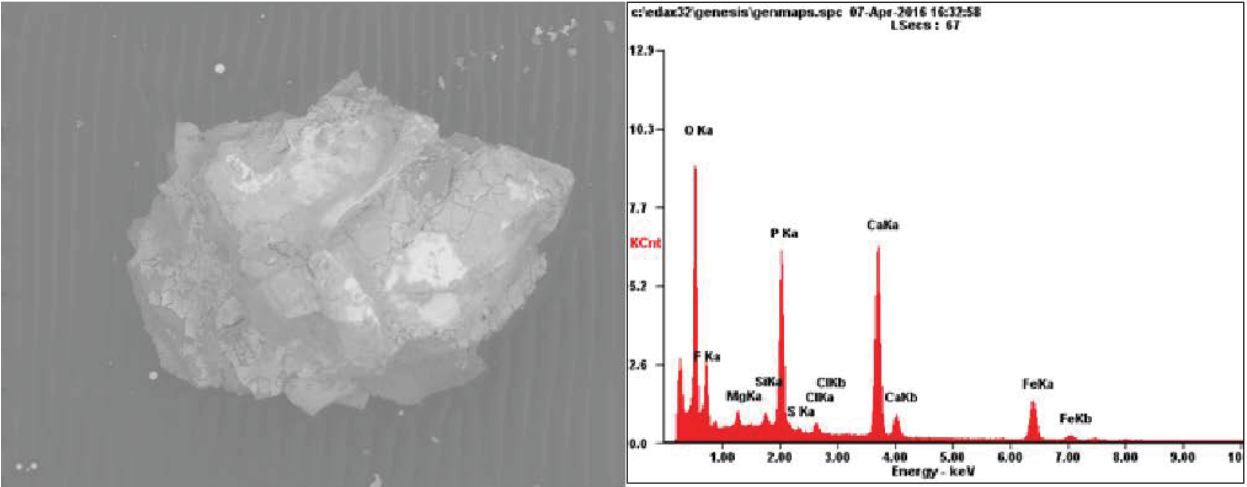
A12-1-two (U-Th)/He age: 880.7 Ma S.A. (um):13322.767



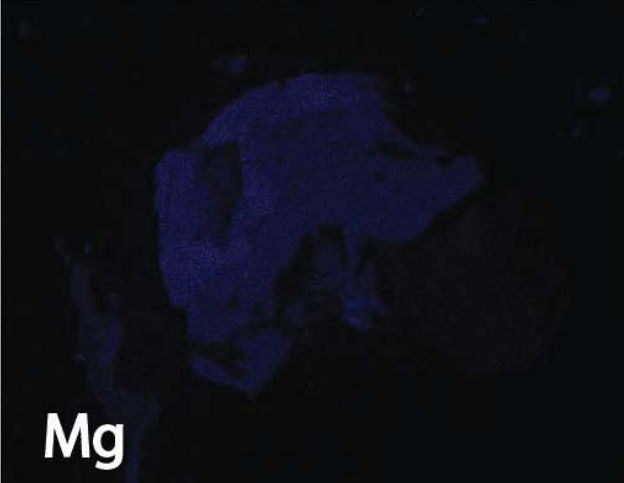
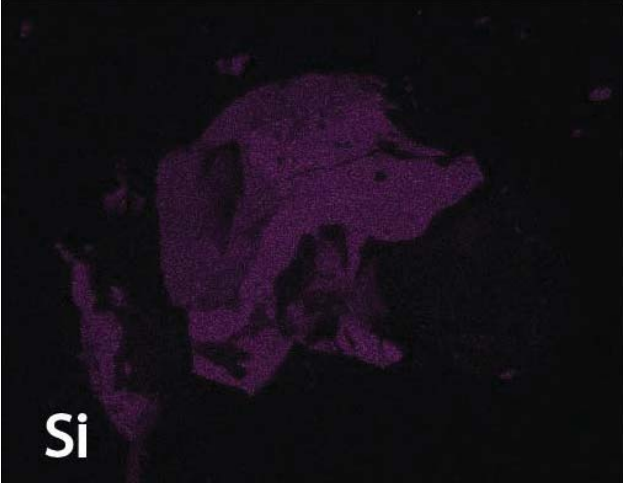
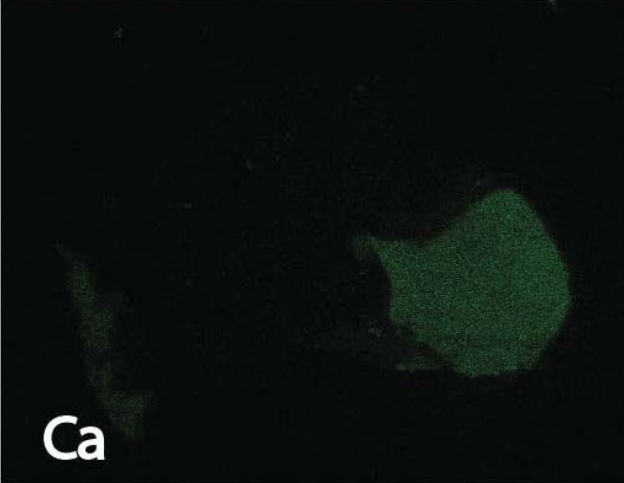
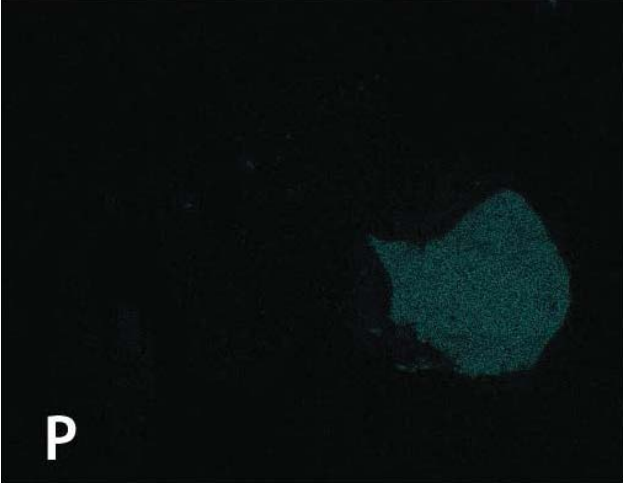
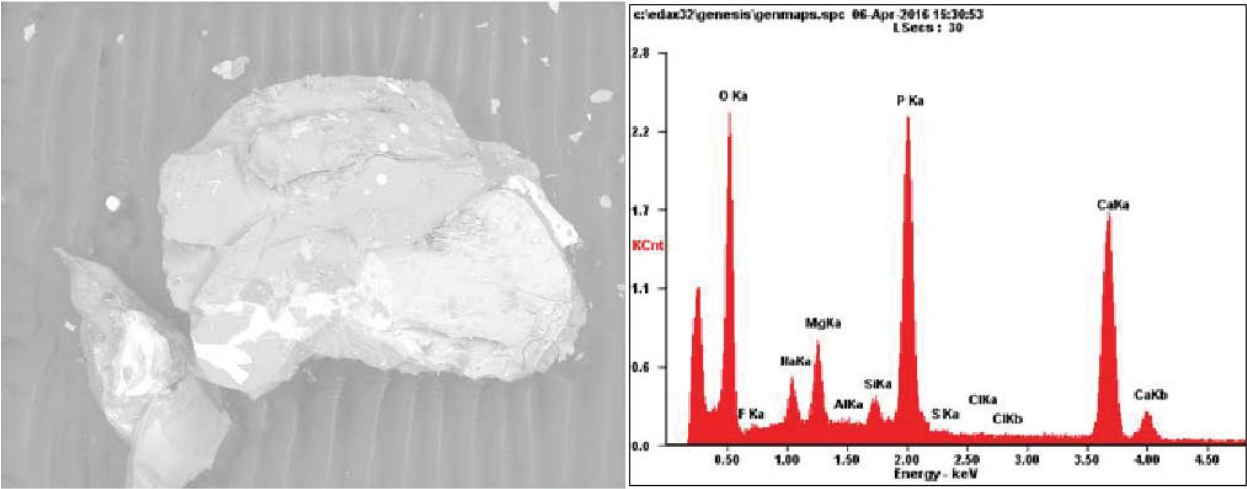
A11-5-one (U-Th)/He age: 3560.7 Ma S.A. (um): 28262.898



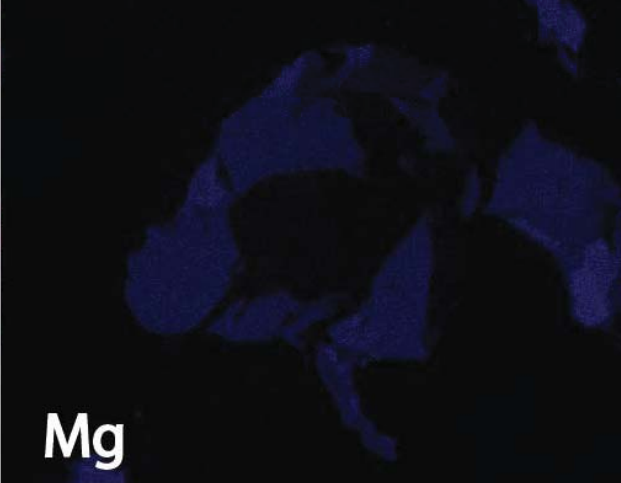
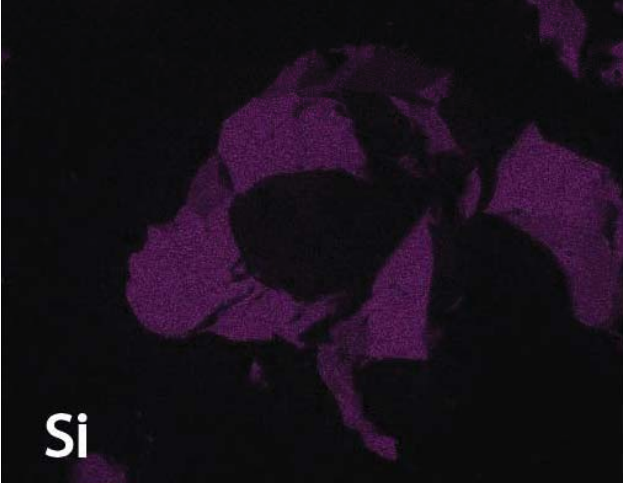
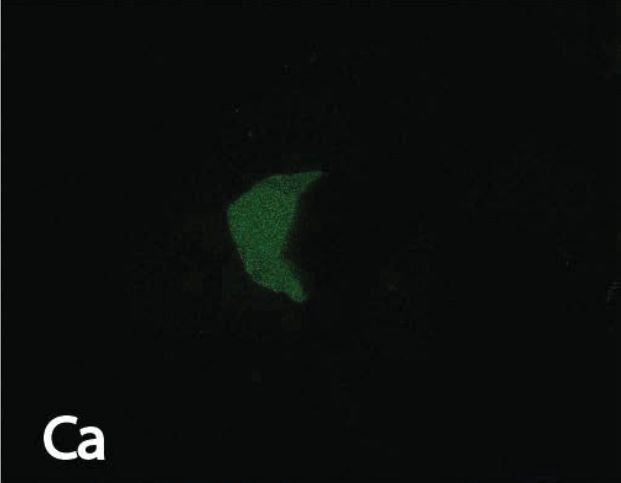
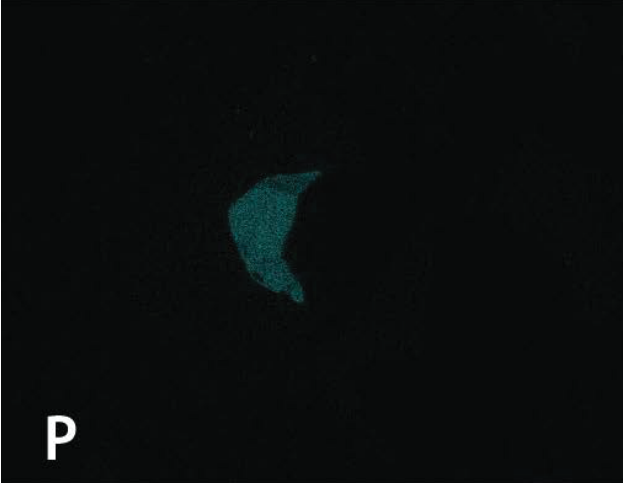
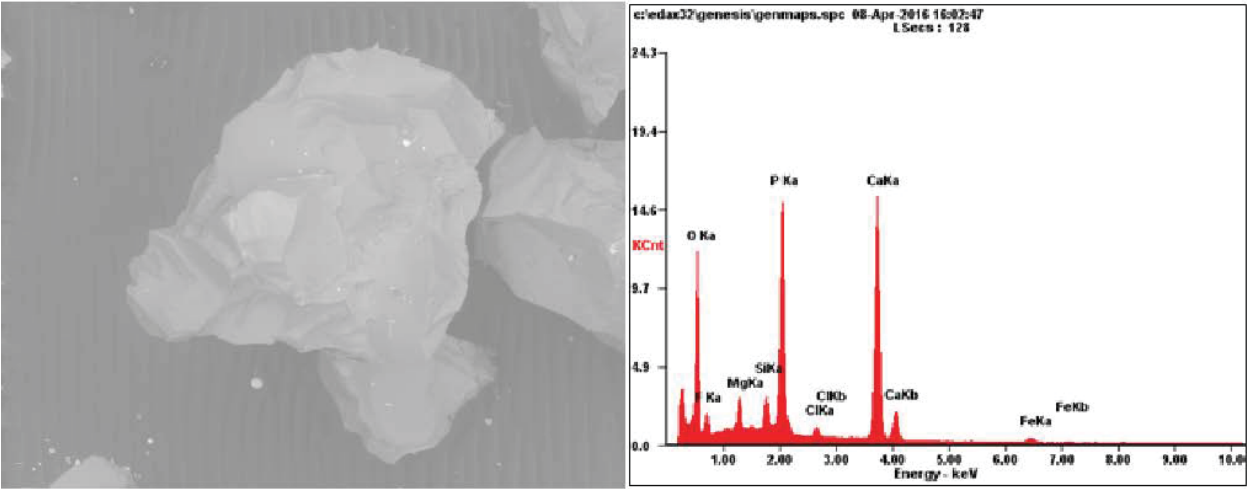
A11-3-one (U-Th)/He age: 2041.9 Ma S.A. (um): 20744.159



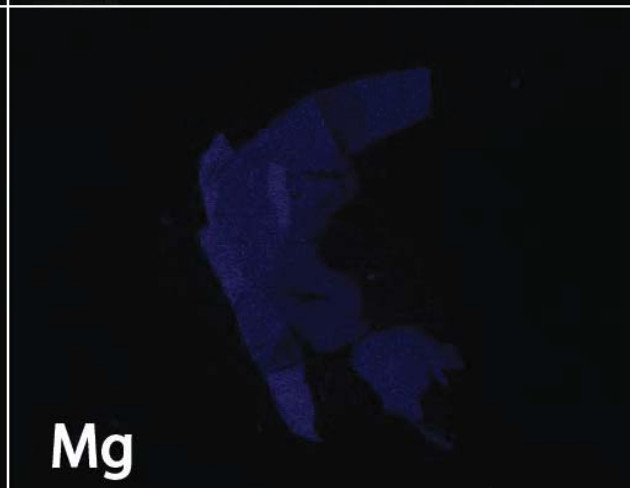
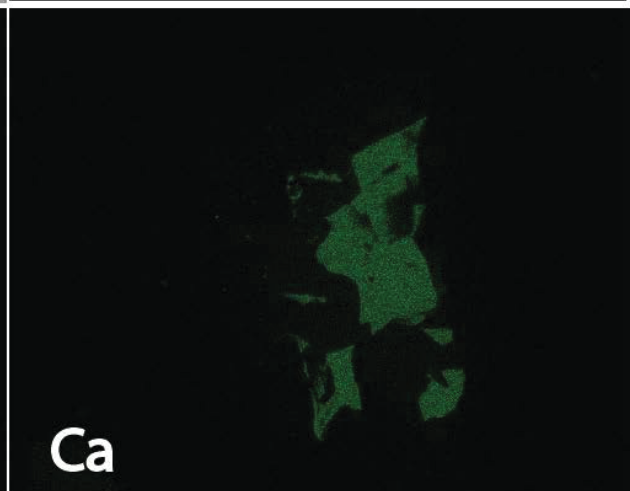
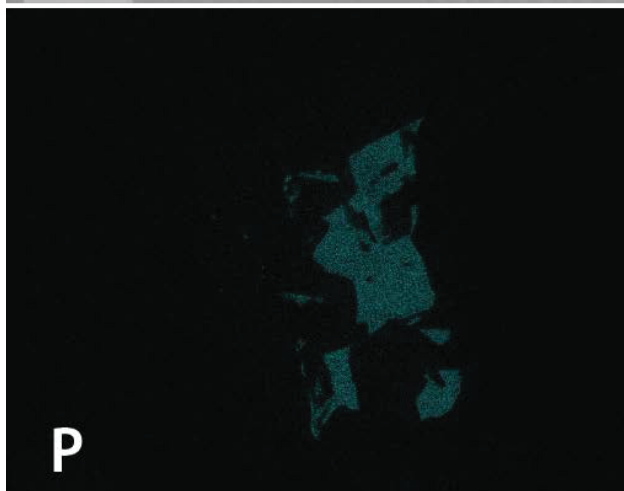
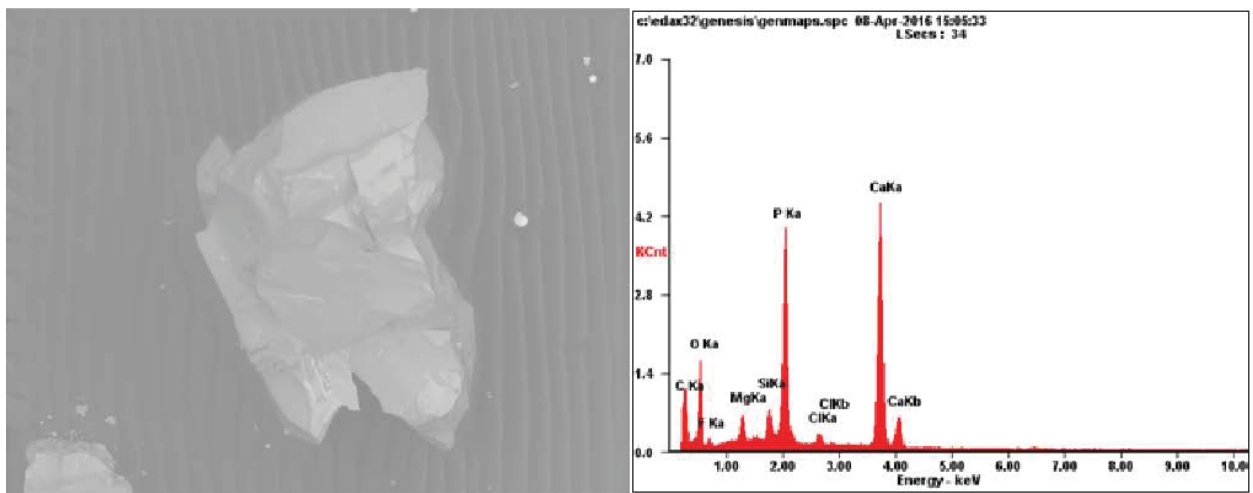
A11-1-one (U-Th)/He age: 2381.6 Ma S.A. (um): 14115.731



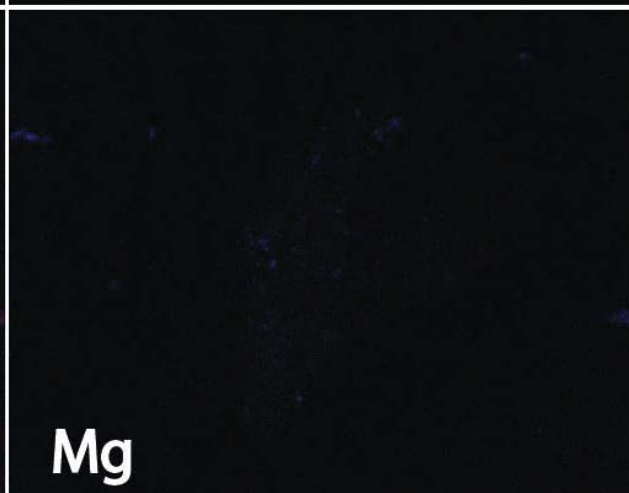
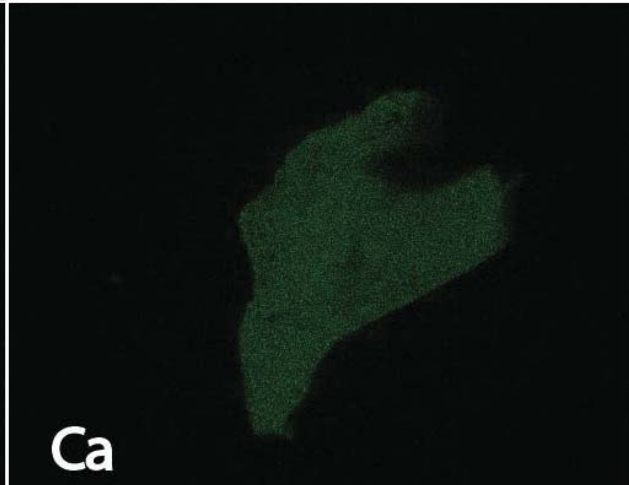
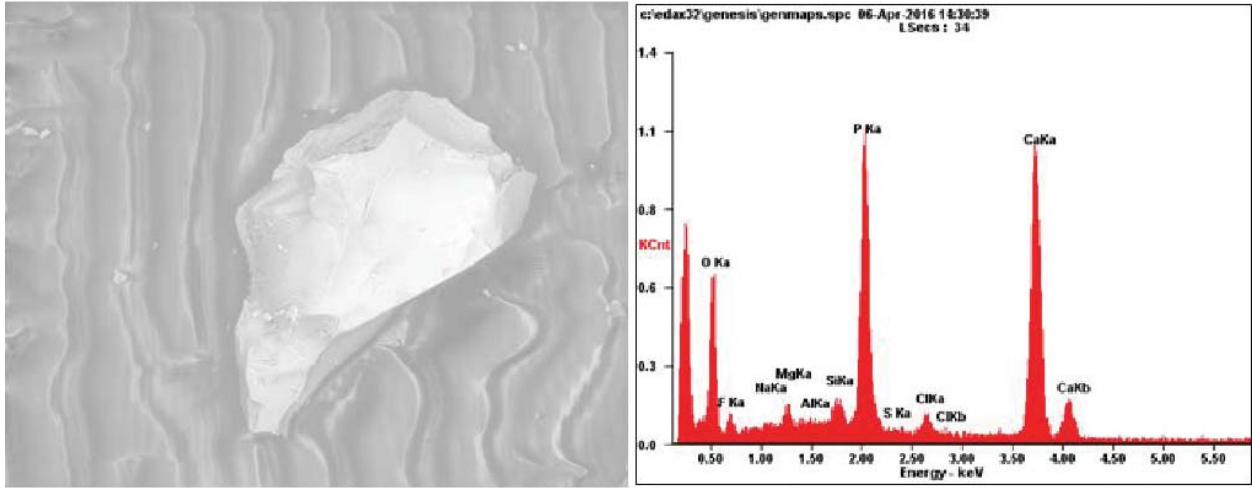
A10-5-two (U-Th)/He age: 4211.5 Ma S.A. (um): 21801.862



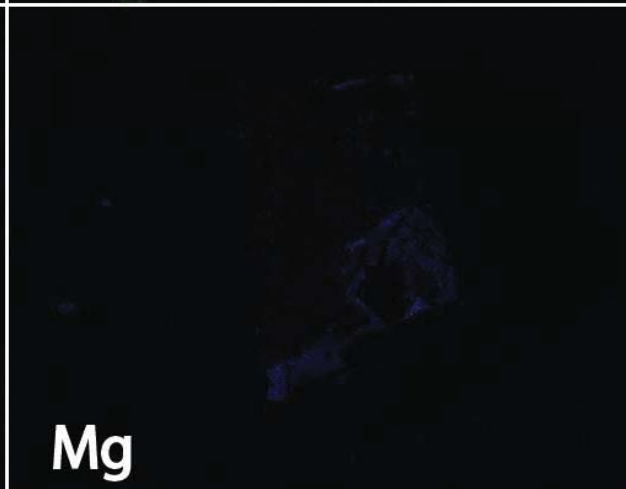
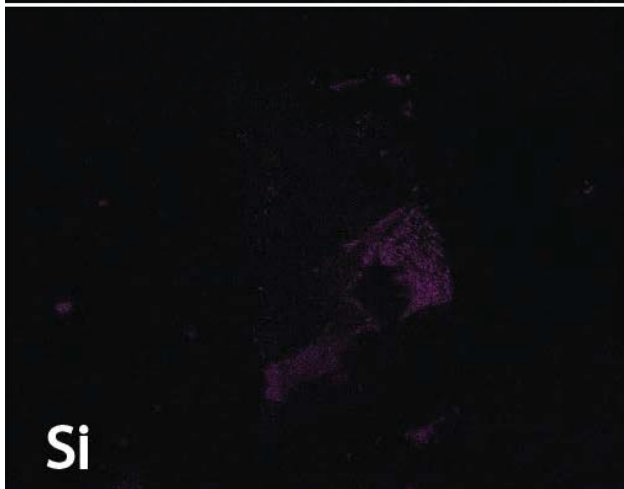
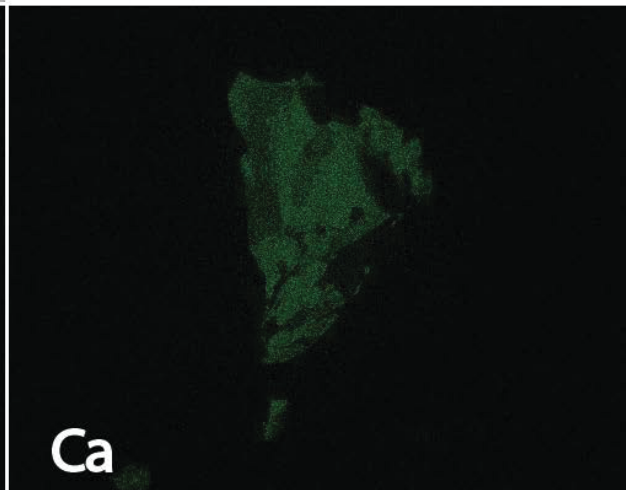
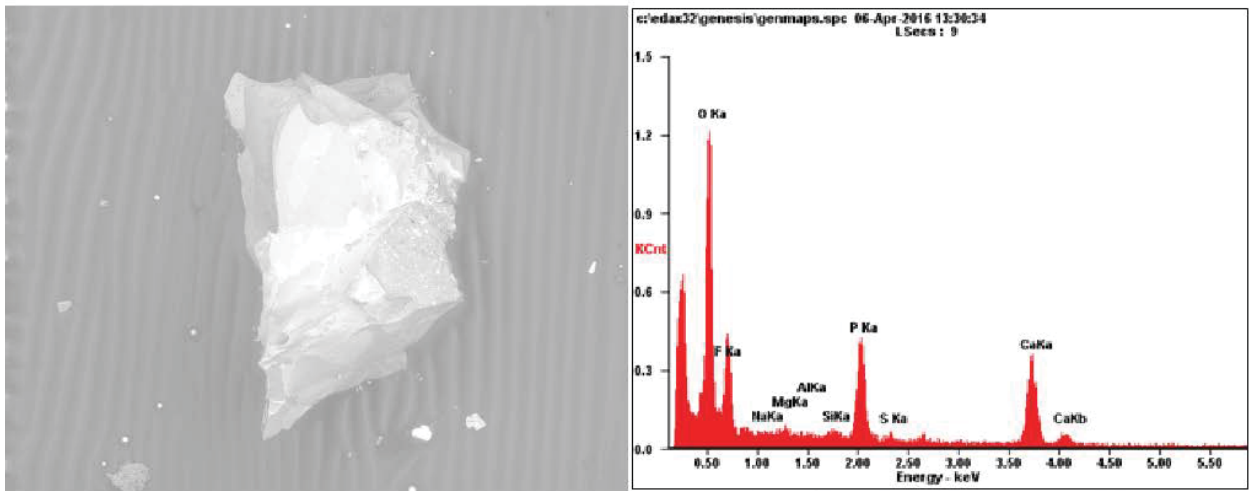
A10-5-one (U-Th)/He age: 3486.3 Ma S.A. (um): 37921.137



A10-1-two (U-Th)/He age: 2914 Ma S.A. (um): 12332.115



A10-1-one (U-Th)/He age: 3728.9 Ma S.A. (um) 75521.812





주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.