

운석의 열역사를 통한
행성형성 및 진화 과정 연구



University of Florida

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “남극 빅토리아랜드 지역 지각진화 및 행성형성과정 연구에 관한 연구” 과제의 위탁연구 “운석의 열역사를 통한 행성형성 및 진화 과정 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2016 . 6 . 30.

(본과제) 총괄연구책임자: 이 종 익

위탁연구기관명: University of Florida

위탁연구책임자: 민 경 원

Phum Sambo H4 콘드라이트 및 EET14067 의 (U-Th)/He 계에 대한 예비 연구

민경원

Department of Geological Sciences, University of Florida, 241 Williamson Hall

Gainesville, FL 32611, USA

서론

전년도에 이어 Phum Sambo H4 콘드라이트의 (U-Th)/He 계를 연구하였다. 이번 연구를 통해 보다 많은 시료를 분석했을뿐 아니라, 기존 자료의 해석 및 기초 모델링을 실시하였다. Phum Sambo 운석은 1933 년도에 추락이 관찰된 중요한 운석임에도 열역사에 대해서는 거의 알려진 것이 없다. 따라서 이번 연구에서는 He 확산을 이용한 모델링을 통해 열역사를 규명하고자 한다.

또다른 연구대상은 최근의 남극탐사에서 새로 발견된 운석인 EET14076 이다. 이 운석은 아카풀코아이트 (Acapulcoite) 로 밝혀졌으며, 주사전자 현미경을 이용한 예비연구에 의하면 비교적 큰 인산광물이 존재함을 확인하였다. 이러한 인산광물(phosphate)은 알파붕괴의 모원자인 U-Th 를 함유하고 있기 때문에 (U-Th)/He 연령측정의 주요 대상이 된다. 따라서, 이 운석의 인산광물에 대한 (U-Th)/He 연령측정을 위한 예비연구를 진행하였다. Min et al. (2003)의 연구에 의하면, 동일한 모암을 가진것으로 추정되는 아카풀코 (Acapulco) 운석에서 추출한 12 개의 인회석 입자중 5 개에서 태양계의 형성의 초기에 해당하는 (U-Th)/He 연령 (4538 ± 23 Ma)을 얻어, 이 운석이 고온에서 저온까지 빠른 냉각을 겪었음을 밝혔다. 태양계 형성초기 모암의 분쇄 (break-up)에 의해 아카풀코아이트와 로드리나이트가 분리되면서 빠른 냉각이 이루어 졌을것으로 추정하고있다. 매우 빠른 냉각이 이루어졌기 때문에, 만일 그 U/Pb, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 및 (U-Th)/He 연령이 잘 보존되어있다면, ^{40}K 의 붕괴상수를 규제하는 데에도 효과적으로 쓰일수 있다. 따라서 이번 (U-Th)/He 연구이후에 U/Pb, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 연령측정이 시행된다면, 열역사 유추뿐 아니라 붕괴상수 연구에도 사용될수 있다.

Phum Sambo: (U-Th)/He 계

U, Th 및 ^4He 의 정량은 전년도 연구의 방법을 따랐다. 시료준비방법을 간단히 요약하면 다음과 같다. 이번연구에 사용된 모든 인산광물 집계(phosphate aggregate)는 흔히 (U-Th)/He

연령측정에 쓰이는 지구상의 시료보다 크기 때문에, 약 5mm x 5mm 의 Nb 호일을 이용해 포장한 후, 새로 제작된 시료 챔버에 옮겨져 ^4He 정량을 실시하였다. 개별 인산광물 집계는 크지만, 내부의 인산광물은 비교적 크기가 작고, 또한 merrillite 의 U-Th 함량이 작기 때문에 이로부터 붕괴한 딸원소인 ^4He 의 양도 작을것으로 예상되었다. 따라서 정확한 ^4He 측정을 위해 많은 주의가 요구된다. 포장된 시료는 시료 챔버에 옮겨진 뒤, 진공 분석 시스템 내에서 다이오드 레이저(diode laser)를 이용한 가열-추출에 이용되었다. 모든 시료는 최소 두번의 추출 과정을 거쳐 ^4He 를 추출하였으며, 만일 두번째 추출실험으로부터 추출된 ^4He 의 양이 첫번째 실험결과의 1%를 넘는 경우에는, 연속적인 추출실험을 통해 99% 이상의 ^4He 를 추출하였다. 시료로부터 추출된 ^4He 는, 양을 알고있는 헬륨-3 스파이크와 섞은후, NP-10 게터로 정제하여, 그 4/3 질량 비율을 사중 극자 질량 분석기(Quadrupole Mass Spectrometer)를 이용하여 측정하였다. 모든 ^4He 측정은 플로리다 대학의 Thermochronology 연구소에서 수행되었다. 자세한 ^4He 측정 절차는 Vogl 외(2014)에 기술되어 있다.

전년도 실험을 통해 대부분의 인산광물 집계 내의 U-Th 양이 0.1ppm 이하로 매우 작은것을 확인했기 때문에, U-Th 측정에 보다 많은 주의가 요구된다. 가열실험을 통해 ^4He 의 양을 측정한 시료는 Nb 호일로부터 테플론 병에 옮겨지는데 이때 일부시료의 손실이 있다면 U-Th 의 측정 및 연령계산에 치명적인 문제를 야기할수 있다. 따라서, 이과정에 많은 시간이 소요되어 U-Th 정량은 아직 시행되지 못하였다. 이번 보고서에는 전년도 자료와 새로 구한 He 자료를 취합하여 쓰였다. U-Th 정량이 시행되는대로 새로운 연령의 계산 및 해석이 이루어질 예정이다.

^4He 의 보정과정은 전년도 보고서에 자세히 기재되어있다. 그림 1 은 ^4He 추출 및 측정의 결과를 보여준다. 모든 시료는 초기 추출실험의 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 비(그림 1 의 적색 동그라미)가 블랭크(그림 1 의 회색 동그라미)보다 약 5 배 이상 높는데, 이러한 높은 값으로부터 신빙성있는 ^4He 정량이 가능하다. 모든 시료의 2 차이상의 추출 실험의 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 비 (그림 1)는 1 차 추출실험 결과에 비해 매우 낮는데, 이는 1 차 추출실험이 시료내 대부분의 헬륨을 방출한다는 것을 지시한다. 몇개의 시료에서는 두번의 추출로도 불완전한 것으로 밝혀져, 최대 7 번의 추출 및 측정이 이루어졌다. 그림 2 는 시료의 무게와 측정된 ^4He 양의 상관관계를 보여준다. 대부분의 시료는 무게가 100 μg 이하이며 그 측정된 ^4He 양이 <1 fmol 부터 20 fmol 까지 매우 넓게 분포한다. 이번에 새로 분석한 시료(PI#91)는 전년도 시료(PI#91)에 비해 다소 가벼운 (작은) 시료가 많으며, 그 ^4He 의 양도 상대적으로 작다. 따라서, U-Th 의 양도 작을 것으로 예상되기 때문에 U-Th 정량시 보다 세심한 주의가 요구된다. 시료의 무게와 ^4He 양은 뚜렷한 양의

상관관계를 보여주지 않는데, 이는 분석에 사용된 인산광물 집계 시료의 크기가 내부에 포함된 인산광물의 크기와 큰 상관관계가 없기 때문이라 해석할 수 있다. 따라서, 주사전자현미경 관찰 결과로부터 인산광물 집계내의 인산광물의 양을 대략적이거나 추정하는 작업이 필요하다. St. Severin 운석의 경우 U-Th-Sm의 합이 주사현미경으로 관찰된 인산광물의 2차원상의 표면적과 대체로 양의 상관관계를 보인다. 따라서, ^4He 역시 유사한 관계를 가질 것으로 예상된다. 또한, 충격 변성작용을 받은 ALHA84001 화성운석의 경우 측정된 연령의 표준편차는 인산광물 집계내에서 관찰된 인산광물의 반경과 역 상관관계를 보인다 (Min et al, 2007). 이는 인산광물 내의 수많은 절개로 인해 실제 He 확산 도메인은 인산광물 입자보다 작으며, 따라서 큰 시료는 여러개의 He 확산 도메인을 포함하게 되며 이러한 시료는 각 확산 도메인의 평균 (U-Th)/He 연령을 산출하게 된다. 작은 시료의 경우 작은 수의 확산 도메인만을 포함하므로, 그 연령의 변화가 크게 된다. 충격 변성작용을 겪지 않은 Phum Sambo의 경우, 인산 광물내에 절개가 많지 않을 경우, 그 확산도메인의 크기 분포는 비교적 좁게 나타날 수 있다.

그림 3은 시료의 무게와 측정된 (U-Th)/He 연령의 상관관계를 보여준다. 의미없는 하나의 연령을 제외하고는, 모든 시료의 연령은 $42 \pm 13 \text{ Ma}$ 부터 $4324 \pm 1700 \text{ Ma}$ 까지 넓게 분포한다. 이의 단순 평균은 1968 Ma 이고 표준 오차는 342 Ma 이다 (그림 3의 shadow 부분). 이러한 연령은 동일한 운석에서 구한 고온에 해당하는 I-Xe 연령 ($4567 \pm 2 \text{ Ma}$: Brazzle et al., 1999)이나, H-4 콘드라이트 운석에서 기대되는 저온의 태양계 형성 초기 ($>4400 \text{ Ma}$: Trierloff et al., 2003) 연령과 큰 차이를 보인다. 이는 Phum Sambo 운석이 초기 냉각 이후에 열적작용을 겪었음을 시사한다. 만일 이 운석이 기대되는 바와 같이 4400 Ma 이전에 (U-Th)/He 계의 폐쇄온도 이하로 냉각한 후, 최근의 열적 작용에 의해 (U-Th)/He 계의 부분적인 교란이 있었다면, (U-Th)/He 연령으로부터 He 손실량(=f: fractional loss)을 구할 수 있다. He 손실량은 대체로 (U-Th)/He 연령과 역직선적인 관계를 보인다. 즉, (U-Th)/He 연령이 4400 Ma 이상이라면 이후에 He 손실이 없었다는 것을 의미하기 때문에 $f=0$ 가 된다. 반대로, 에 폐쇄되었고 연령이 0 Ma 라 한다면 모든 He 이 손실되었음을 의미하므로, $f=1$ 이 된다. Phum Sambo의 경우 그 평균연령($1968 \pm 342 \text{ Ma}$)은 이 두 값의 중간정도에 해당하므로 f 는 약 0.5-0.45 정도가 된다. 그러면, 어떠한 열적 작용이 관찰된 (U-Th)/He 연령 혹은 He 손실량을 잘 설명할 수 있을지 알아보았다. 우선 두 가지 상황을 가정할 수 있다.

첫번째 경우는 이 운석이 태양계 형성 초기의 냉각 후 한번의 짧은 열적작용에 의해 그 (U-Th)/He 계가 교란되었을 경우이다. 이러한 경우, 열적 작용의 시기는 평균연령인 $\sim 2 \text{ Ga}$ 보다 젊어야 하며, 더 나아가 이번 연구의 가장 젊은 연령구간인 $\sim 1000 - 42 \text{ Ma}$ 보다도 젊어야 한다.

Phum Sambo 운석은 충격변성작용의 증거가 없고, H 콘드라이트는 모암으로부터 태양계 형성 초기에 떨어져 나온 것으로 알려져 있다. 따라서, 최근의 모암 분쇄 혹은 강한 충격작용에 의한 열적작용의 가능성은 배제할수 있다. 하나의 가능성은 운석이 지구 대기 통과시 대기와의 마찰(friction)에 의해 He 확산을 유발하였을 경우이다. Phum Sambo 운석은 1933 년 그 추락이 관찰되었으며, 발견 당시 7.8 kg 으로 용해표면 (fusion crust)이 일부에서 관찰되었다. 용해표면을 가지고 있는 몇몇 운석에 대한 thermoluminescence 연구에 의하면, 대기 통과시의 운석내부의 온도조건은 용해표면으로부터 멀어짐에 따라 감소하는데, 그 온도의 변화는 약 1-50 °C/mm 정도이다 (Melcher, 1979). 이 연구결과에 의하면, 용해표면으로부터 약 5mm 이상 떨어진 운석내부는, 대기 마찰에 의한 온도증가가 200°C 이하이다. 이러한 온도증가가 (U-Th)/He 계를 얼마만큼 교란시킬수 있는지를 그림 4 에 도시하였다. 그림 4 는 다양한 확산 도메인을 가진 인회석 입자가, 200°C 이하에서 10 초, 100 초, 600 초 동안 가열되었을 경우 얼마만큼의 He 손실이 있는지를 보여준다. He 손실이 100%일 경우에는 (U-Th)/He 연령은 0 이 되며, He 손실이 0%일 경우에는 He 손실이 전혀 없었으므로 (U-Th)/He 계는 교란되지 않았음을 의미한다. 보통 운석의 대기통과 시간은 수초에서 수십초에 불과하며, 이러한 조건에서 확산 도메인 반경 20-60um 의 인회석으로부터의 He 손실은 0.5% 미만이다. 매우 극단적인 경우인 600 초 동안의 가열 조건에서도, He 손실은 1% 미만이다. 만일 이번 연구에 사용된 시료가 용해표면에 매우 가까운 (<5mm) 곳에서 추출되었을 경우, 그 온도 조건은 200°C 보다 높고, 따라서 보다 많은 He 손실을 야기할수 있다. 예를 들어, 용해표면으로부터 약 2mm 떨어진 내부의 경우, Barwell 운석은 약 250°C, Kirin 운석은 약 300°C 까지 올라갔던 것으로 알려져있다 (Melcher, 1979). 이러한 온도 조건에서, 100 초의 가열에 의한 He 손실은 약 6% 미만이 된다. 극단적인 경우의 300°C, 600 초 가열조건에서도 He 손실은 약 15%를 넘지 않기 때문에 관찰된 평균 (U-Th)/He 연령을 설명할수 없다. 또한, 큰 확산반경과 작은 확산반경의 He 손실의 차이 (15%-5%)도 크지 않기때문에 관찰된 연령의 큰 분포도 설명할수 없다. 따라서 이 가설은 신빙성이 매우 낮다.

두번째 가능한 상황은, 이 운석이 태양에 비교적 가까운 궤도를 장시간 돌면서, 비교적 낮은 온도에서 오랜 시간에 걸쳐 He 확산을 일으킨 경우이다. 이러한 경우, 역시 첫번째 경우와 마찬가지로, 모든 시료는 동일한 열역사를 겪었을 것이다. 45 개의 ordinary 콘드라이트에 대한 thermoluminescence 연구에 따르면 (Melcher, 1981), 대부분의 운석이 지구대기 진입 이전에 약 0.8-1.0 AU 의 근일점 (perihelion) 을 가지며, 이는 약 $0 \pm 10^{\circ}\text{C}$ 에서 $35 \pm 10^{\circ}\text{C}$ 에 해당한다. 얼마나 오랜 기간 이러한 궤도를 유지하고 있었는지는 추정하기 어렵지만, thermoluminescence 의 평형 시간이 ~0.1 Myr 이기 때문에, 최소 이보다는 오랜동안 머물렀을

것으로 추정할수 있다 (Melcher, 1981). 그림 5-7 는 이러한 온도조건에서 1 Myr, 10 Myr, 100 Myr 동안 가열되었을 경우의 He 손실량을 보여준다. 1 Myr 의 가열조건에서는 He 손실량이 21% 미만으로 비교적 낮은 편이며, 동일한 온도-시간 조건에서 주어진 확산 도메인 범위 (반경 20-60 um)에 대한 He 손실량의 차이가 14% (=21%-7%) 보다 작다 (그림 5). 따라서 관찰된 (U-Th)/He 연령의 분포를 설명할수 없다. 10 Myr (그림 6) 및 100 Myr (그림 7)의 경우에는 보다 많은 He 손실이 일어난다. 이번 모델링의 최상 조건인 100 Myr - 40°C 에서는 60%-100%의 He 손실이 일어나며, 따라서 관찰된 평균 연령에 해당하는 f 값(0.5-0.45)을 상회한다. 100 Myr-30°C 혹은 10 Myr-40°C 조건은 그 계산된 f 의 범위가 각각 70%-30%, 57%-22%로 관찰된 평균 (U-Th)/He 연령에 해당하는 f 값(0.5-0.45)을 포함한다. 또한, 일정한 열역사 조건에 대한 f 값의 변화 범위가 약 30-40% 정도로, 위의 첫번째 모델링 결과에 비해 상당히 크기 때문에, 관찰된 넓은 (U-Th)/He 연령범위를 설명하는데 유리하다. 따라서 운석이 태양에 비교적 가까운 궤도를 장시간 돌면서 태양열에 의해 He 손실이 서서히 일어났다는 가설이 관찰된 (U-Th)/He 연령의 분포를 보다 잘 설명할수 있다.

위의 모델링에서는 관찰된 넓은 (U-Th)/He 연령 범위를 설명하기 위해 열적 작용의 온도조건, 열적 작용의 기간, 인산광물 입자의 He 확산 도메인 크기 등을 이용하였다. 가능성이 높은 두번째 가설 (태양에 근접한 궤도에서의 오랜시간 저온 가열)이 평균 (U-Th)/He 연령에 해당하는 f 값은 설명할수 있으나, 그 연령의 넓은 분포는 일부만을 설명할수 있다. 그렇다면 보다 넓은 (U-Th)/He 연령분포는 어떻게 설명할수 있을까? 이를 규명하기 위해 주사전자 현미경으로 관찰한 인산광물 집계내의 인산광물의 형태학적 특징이 필요하다. 이상적인 인산광물 시료의 경우 온전한 입자를 추출하여 연령측정에 쓰일 경우 전체 입자내의 U, Th, ⁴He 양을 측정하고, 알파 되튀김 효과를 보정할수 있겠다. 하지만, 대부분의 운석시료는 인산광물 입자의 일부 만이 다른 상과 같이 붙어 있는 인산염 집계를 사용하고, 그 형태학적 특징도 인산광물이 일부 드러난 표면만을 주사전자현미경을 통해 관찰할수 있으므로 (U-Th)/He 연령측정시 여러 가능성을 고려해야 한다. ⁴He 확산과 알파되튀김 현상 때문에, 인산광물 내의 ⁴He 분포는 일정하지 않고, 중심부에서 주변부로 갈수록 낮아지는 경향을 보인다. 이러한 현상은 천천히 식은 시료의 경우 보다 뚜렷이 나타난다. 이러한 시료의 경우, 운석내의 원래 인산광물 입자의 어떤부분을 분석하느냐에 따라, 그 ⁴He 양이 다르게 되며, 따라서 (U-Th)/He 연령도 달라지게 된다. 예를 들어, 인산광물 집계가 원래 인산 광물의 주변부만 포함하고있을 경우 인산광물의 전체를 포함한 시료에 비해 젊은 (U-Th)/He 연령을 산출하게 된다. 이는 단순히 인산광물 입자의 주변부가 중심부에 비해 작은 양의 ⁴He 을 가지고 있기 때문이다. 하지만 현실적으로 인산광물 집계의 인산광물이 드러난 표면에 대한

주사현미경 관찰만으로는 인산광물의 3 차원적 구현이 불가능하고, 따라서 원래 인산광물의 어느정도가 시료에 포함되어있는지 추정이 불가능하다. 모델링을 통해 보다 정량적인 연령 편차를 간접적으로 추정하여, 실제 관찰된 편차와 비교하는 과정이 필요하다. 이상적인 구형태를 가지고 있는 인산 광물 입자(=확산 도메인)내의 He 분포가 정확히 대칭으로 중심부로부터 주변부까지 감소한다고 가정하면, 반구만이 인산광물 집계에 포함되었을 경우 연령은 원래의 형태인 전체 구의 연령과 동일하게 된다. 반구보다 작은 부분만이 포함되었을 경우는 이보다 젊은 연령을, 반구보다 큰 부분을 포함하였을 경우에는 그 부피가 증가함에 따라 초반에는 높은 연령을 후반에는 젊은 연령을 산출하다가, 전체 구가 포함될 경우에는 다시 평균 연령으로 회귀하게 된다. 즉, 중심부가 많이 포함된 경우에는 높은 연령을, 주변부가 많이 포함되었을 경우에는 젊은 연령을 산출하게 된다. 이에대한 구체적인 모델링을 통해 (U-Th)/He 연령의 편차를 예측하는 과정이 필요하다. 실제 지구상의 인회석 입자에 대해 유사한 모델링이 실시된바 있는데 (Brown et al., 2013; Beucher et al., 2013) 이는 광물분리시 원래입자의 일부만이 보존되었을 경우 이로부터 도출된 연령이 원래입자의 연령과 다르기 때문이다. 이러한 효과를 파쇄 효과 (fragmentation effect)라 부른다. 하지만 이러한 경우라 하더라도, 많은 시료를 분석한다면, 원래 인산광물의 절반 이하만을 보존한 시료뿐 아니라, 원래 인산광물의 절반 이상을 포함한 시료도 확률적으로 동수로 존재할 것이기 때문에, 그 평균 연령은 전체 인산광물의 평균연령에 근접할 것으로 기대된다. 이에 대한 자세한 모델링이 실시되어야 정량적이 편차의 예측이 가능할 것이다. 하지만, 이러한 효과는 반드시 연령편차를 증가시키기 때문에, 위의 모델링에서 보여준 f 편차의 기대치와 관찰치의 차이를 설명해 줄수 있으리라 기대한다. 따라서, 평균연령을 이용한 위의 모델링결과 (운석이 태양에 비교적 가까운 궤도를 장시간 돌면서 태양열에 의해 He 손실이 서서히 일어났다는 가설)는 연령 편차에 관계없이 보다 신빙성이 있다.

EET74016: 주사전자 현미경 관찰 결과

대부분의 운석의 경우 U 및 Th 은 인산광물내 Ca (9-fold site)을 치환하며 미량으로 존재하기 때문에 인산광물이 (U-Th)/He 연령측정에 주로 쓰인다. (U-Th)/He 연령측정에 필요한 입자를 선별하고, 이후에 구하여질 (U-Th)/He 연령의 올바른 해석을 위해서는 시료의 광물학적, 암석학적 기재가 필요하다. 이러한 기재학적 연구의 중요성에 대해 간단히 알아보자. 우선 (U-Th)/He 연령측정에 쓰일 시료인 인산광물의 종류를 확인하는 과정이 필요한데, 이는 다른 종류의 인산광물이 상이한 He 확산의 특성을 보이며, 폐쇄온도에 영향을 미치기 때문에 상이한 (U-Th)/He 연령 산출하기 때문이다. 최근의 연구에 의하면, 콘드라이트 내 인산광물의 한

종류인 메릴라이트 (merrillite) 는 인회석 (apatite)보다 높은 폐쇄온도를 가지며, 따라서 그 (U-Th)/He 연령도 상대적으로 높게 나오는 경향이 있다 (Min et al., 2013). 또한 Chlorapatite 와 Fluorapatite 도 약간의 He 확산 차이가 있는것으로 알려져 있다 (Gautheron et al, 2009).

EET14076 암편을 조심스럽게 부순후, 그 입자들을 구리테이프 상에 골고루 뿌려준 후 Zeiss EVO10 주사전자현미경을 이용하여 관찰하였다. 저배율에서 초기 자동 화학 스캔을 통해 ~30 여개의 인산광물 집계를 식별한 후, 개개의 인산광물 집계는 다시 고배율에서 주변 광물과의 형태학적 관계를 검토하고, 에너지 분산 분광기(EDS)를 사용하여 인산광물의 반정량적 조성을 분석하였다. 확인 인산광물 집계의 이차 전자 이미지, P, Ca, Mg, Si 화학 지도는 Appendix 에서 찾아볼수 있다. 대부분의 인산광물 집계는 소량의 인산광물만을 포함하고 있으며, 상당량의 다른 광물이 포함되어 있다. 30 개의 인산광물 입자의 반정량 EDS 분석에 따르면, F-Cl 인회석(23 개), F-인회석 (3), Cl-인회석 (1), 그리고 그 종류가 불분명한 인산광물 (2) 등 이 산출한다 (표 1). 이는 EET14076 박편으로부터 구한 전자현미경 (EPMA) 정량 분석 결과와 대부분 일치한다. 이번 연구를 통해 식별한 이산 광물 입자는 이후 (U-Th)/He 연령측정에 사용될 계획이다. 또한, 보다 많은 입자들이 주사전자현미경 분석을 위해 준비되어 있으므로 필요할 경우 추가 인산광물 집계의 식별 및 추출이 가능하다.

앞으로의 연구에 대한 제언

1. 이번 모델링은 단순한 등온도 가열의 경우만을 고려했으나, 실제 운석의 궤도는 타원일 것이므로, 이에대한 고려가 필요하다. 만일 궤도를 이론적으로 혹은 통계학적으로 추정할 연구가 있다면 이를 바탕으로, 태양과의 거리에 따는이론적인 온도조건 변화로부터 이 궤도의 열역사를 추정하고, 이의 열역사에 해당하는 He 확산의 정도를 추정하는 일종의 전진모델링 (forward modeling) 이 가능하다. 실제로 화성운석의 화성-지구간 궤도를 이론적으로 추정한 연구가 있다 (Wetherill, 1984; Goldman, 1997). 이러한 자료를 바탕으로한 전진 모델링을 통해 화성운석의 He 손실량을 이론적으로 추정할수 있다.
2. 보다 신빙성있는 온도-시간 조건을 규제하기 위해서는 (U-Th)/He 자료뿐 아니라, 우주선에 의한 (cosmogenic) 불활성 기체 동위원소의 비 (예를 들면, $^3\text{He}/^{21}\text{Ne}$), $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 다단계 가열 자료 등이 요긴하게 쓰일수 있다. 이러한 자료들은 위의 모델링의 중요한 변수를 제한할수 있으므로 철저한 문헌조사가 필요하다. 실제로 ALHA84001 화성운석의 경우 (U-Th)/He 과 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 계를 종합적으로 해석해 보다 신빙성있는 열역사를 추정한 예가 있다 (Min et al., 2007).

3. 위에서 언급한 파쇄 효과를 인산광물 집계내의 인산광물에 적용하여, (U-Th)/He 연령편차를 설명할수 있는 모델링이 필요하다. 우선 추정된 열역사로부터, 인산 광물내 He 분포를 유추한후, Monte-Carlo 방법을 통해 원래 인산광물의 일부가 무작위로 추출되었을 경우, ^4He 손실량의 분포를 계산할수 있다. 이러한 모델링은 충격변성을 받지 않은 운석뿐 아니라 충격 변성 작용을 받은 화성 운석에 대해서도 적용될수 있으며, 그간 풀리지 않았던 운석시료의 넓은 (U-Th)/He 연령 분포를 설명하는 단초를 마련할수 있기를 기대한다.

참고문헌

- Beucher, R., Brown, R., Roper, S., Stuart, F. and Persano, C. (2013) Natural age dispersion arising from the analysis of broken crystals: Part II. Practical application to apatite (U-Th)/He thermochronometry. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 120, 395-416.
- Brazzle, R.H., Pravdivtseva, O.V., Meshik, A.P. and Hohenberg, C.M. (1999) Verification and interpretation of the I-Xe chronometer. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63, 739-760.
- Brown, R.W., Beucher, R., Roper, S., Persano, C., Stuart, F. and Fitzgerald, P. (2013) Natural age dispersion arising from the analysis of broken crystals. Part I: Theoretical basis and implications for the apatite (U-Th)/He thermochronometer. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 122, 478-497.
- Gautheron, C., Tassan-Got, L., Barbarand, J. and Pagel, M. (2009) Effect of alpha-damage annealing on apatite (U-Th)/He thermochronology. *Chemical Geology* 266, 157-170.
- Goldman, B. (1997) Destination: Earth. Martian meteorite delivery. *Icarus* 130, 228-246.
- Melcher, C.L. (1979) Kirin meteorite: Temperature gradient produced during atmospheric passage. *Meteoritics* 14, 309-316.
- Melcher, C.L. (1981) Thermoluminescence of meteorites and other orbits. *Earth and Planetary Science Letters* 52, 39-54.
- 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.
- 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.
- Vogl, J.J., Min, K., Foster, D.A., Carmenate, A. and Marsellos, A. (2014) Miocene regional hotspot-related uplift, exhumation, and extension north of the Snake River Plain: Evidence from apatite (U-Th)/He thermochronology. *Lithosphere* 6, 108-123
- Wetherill, G.W. (1984) Orbital evolution of impact ejecta from Mars. *Meteoritics* 19, 1-13.

Table 1. Summary of EDS data for the identified phosphates in Phum Sambo.

Sample	Na peak	Cl peak	F peak	Mineral	
A6-1-one	No	Yes	No	Chlorapatite	
A9-2-one	No	No	Yes	Fluorapatite	
A10-1-one	No	No	Yes	Fluorapatite	
A10-1-two	No	Yes	Yes	Apatite	
A11-1-one	Yes	No	No	Phosphate	
A12-1-one	No	No	Yes	Fluorapatite	
A12-1-two	No	Yes	Yes	Apatite	
A13-1-one	No	Yes	Yes	Apatite	
A13-1-two	No	Yes	Yes	Apatite	
A2-3-one	No	Yes	Yes	Apatite	
A3-3-one	No	Yes	Yes	Apatite	
A4-3-one	No	Yes	Yes	Apatite	
A8-3-one	No	Yes	Yes	Apatite	
A10-3-one	No	Yes	Yes	Apatite	
A11-3-one	No	Yes	Yes	Apatite	
A3-4-one	?	No	Minor	Phosphate	
A3-4-two	No	Yes	Yes	Apatite	
A7-4-one	No	Yes	Yes	Apatite	
A2-5-one	No	Yes	Yes	Apatite	
A4-5-one	No	Yes	Yes	Apatite	
A6-5-one	No	Yes	Yes	Apatite	
A6-5-two	No	Yes	Yes	Apatite	
A10-5-one	No	Yes	Yes	Apatite	
A10-5-two	No	Yes	Yes	Apatite	
A11-5-one	No	Yes	Yes	Apatite	
A4-6-one	No	Yes	Yes	Apatite	
A7-6-one	No	Yes	Yes	Apatite	
A7-6-two	No	Yes	Yes	Apatite	
A11-6-one	No	Yes	Yes	Apatite	
A14-6-one	No	Yes	Yes	Apatite	
				Phosphate	2
				Chlorapatite	1
				Fluorapatite	3
				Apatite	23

그림 1a

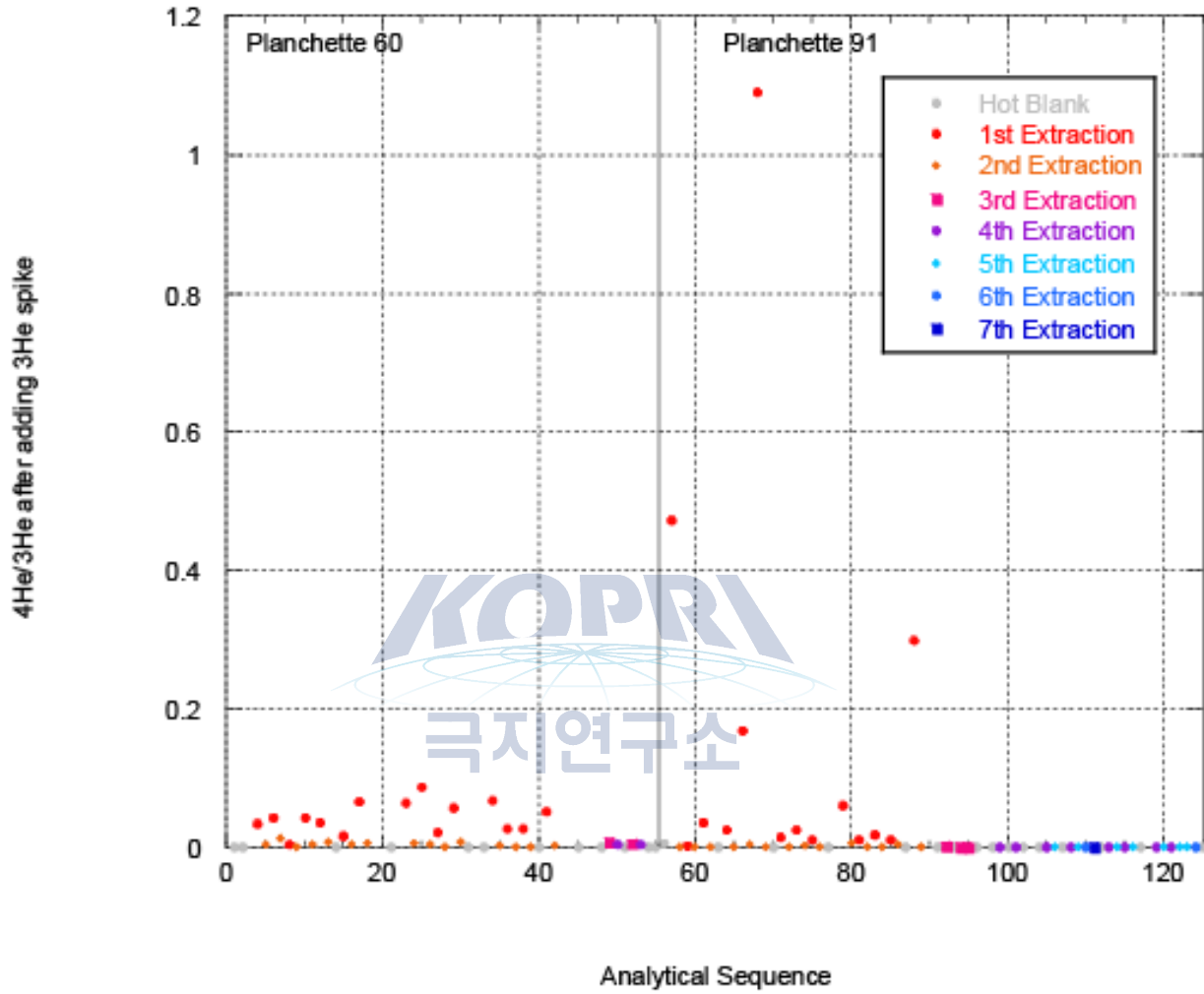


그림 1b

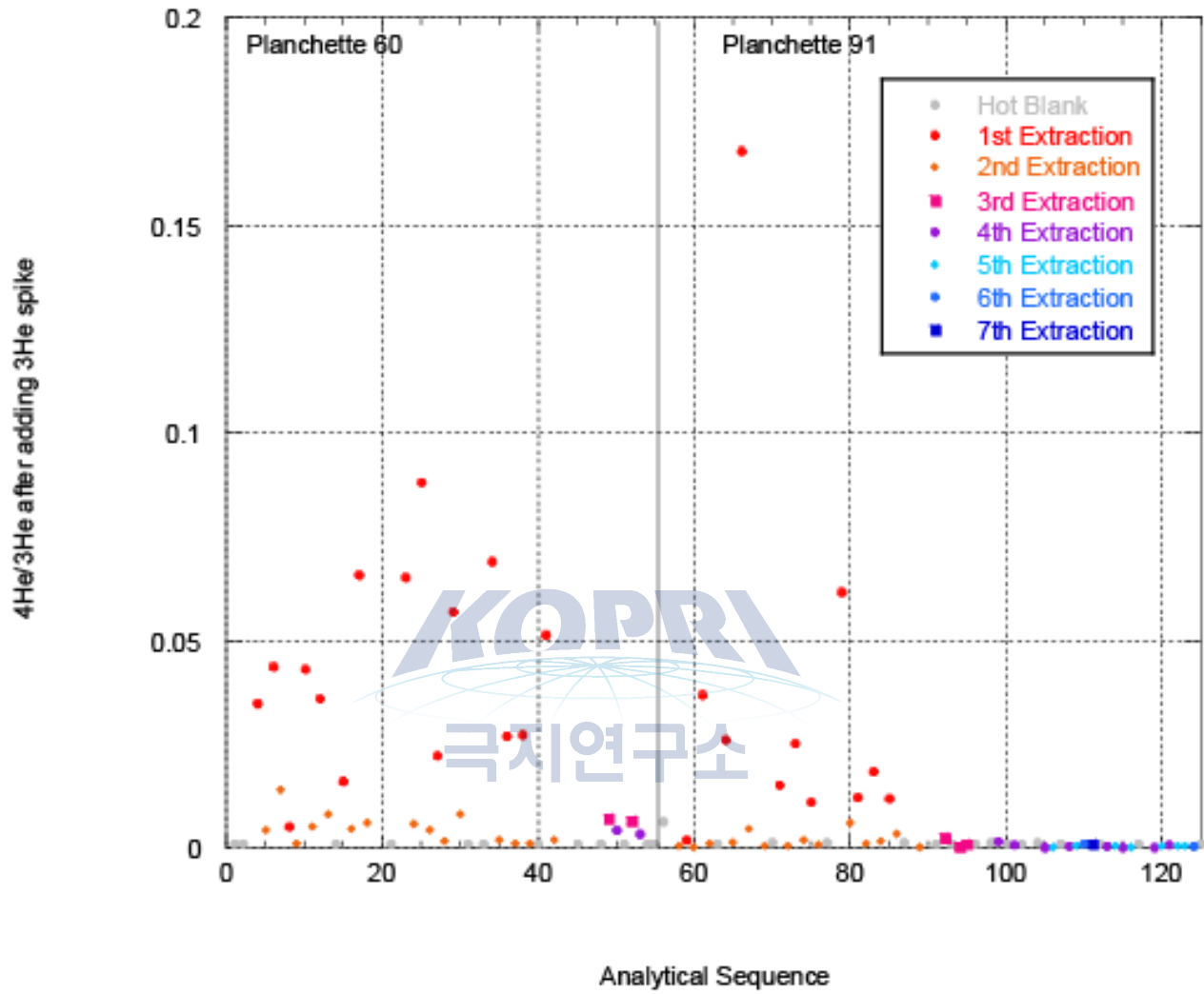


그림 2

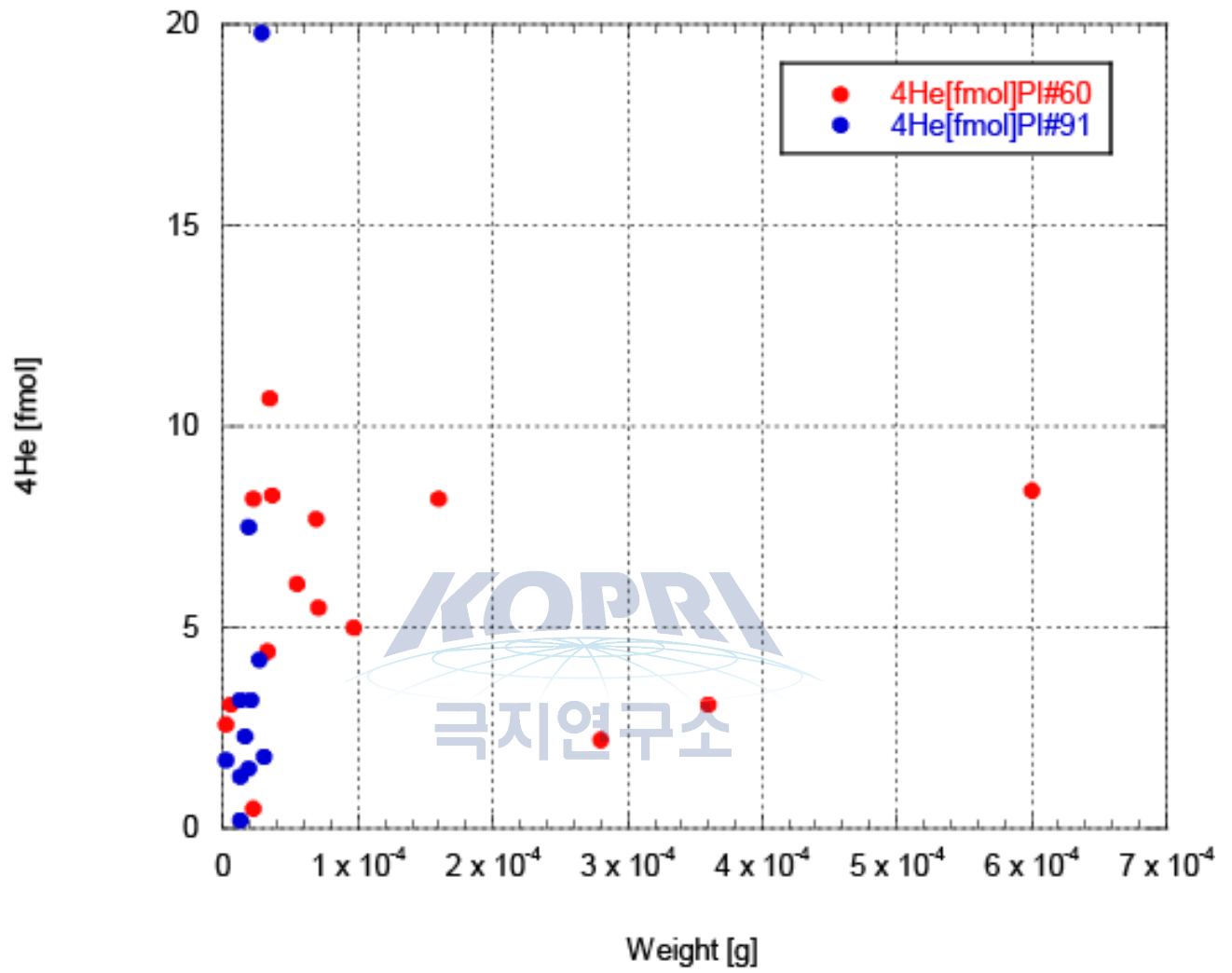


그림 3

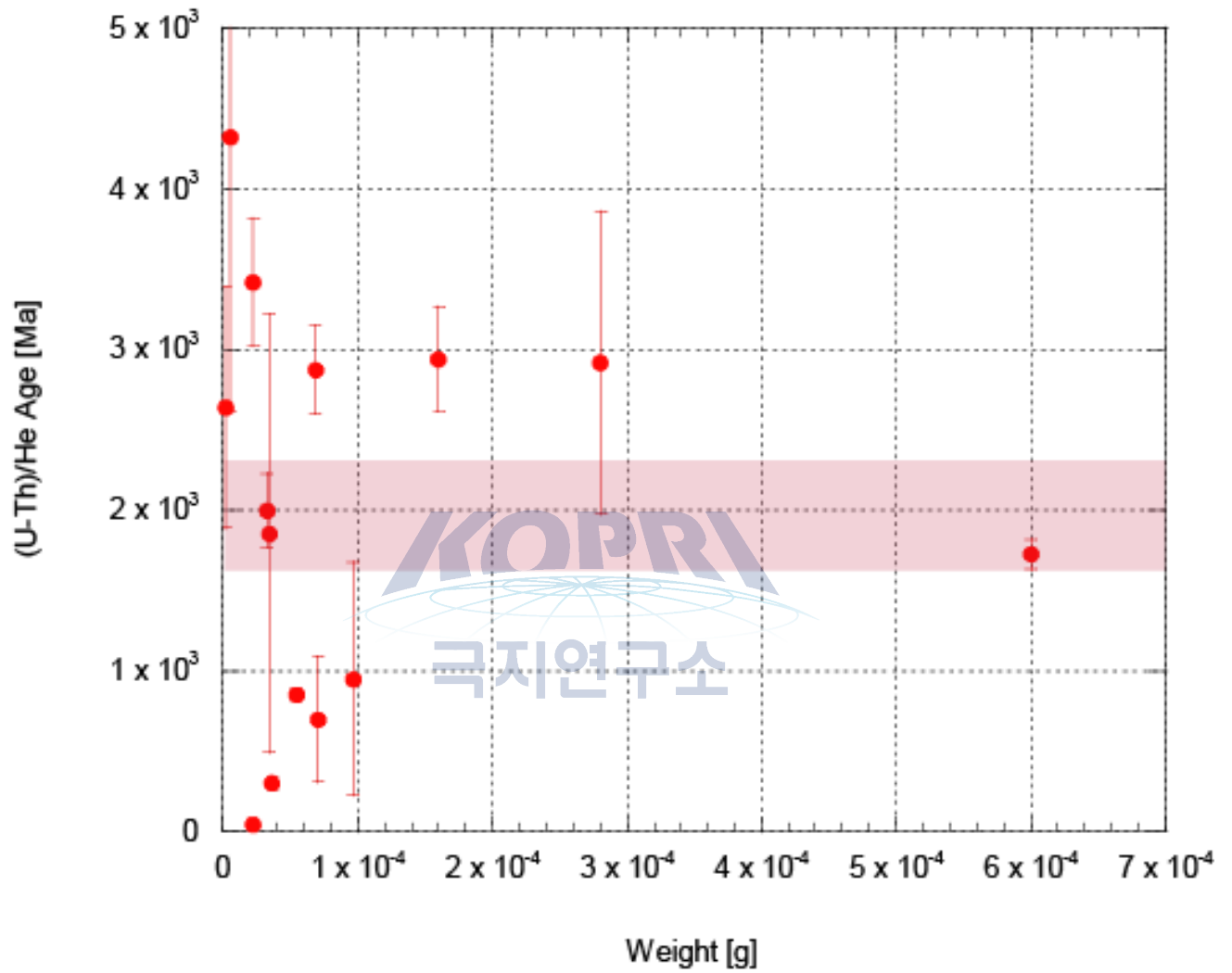


그림 4

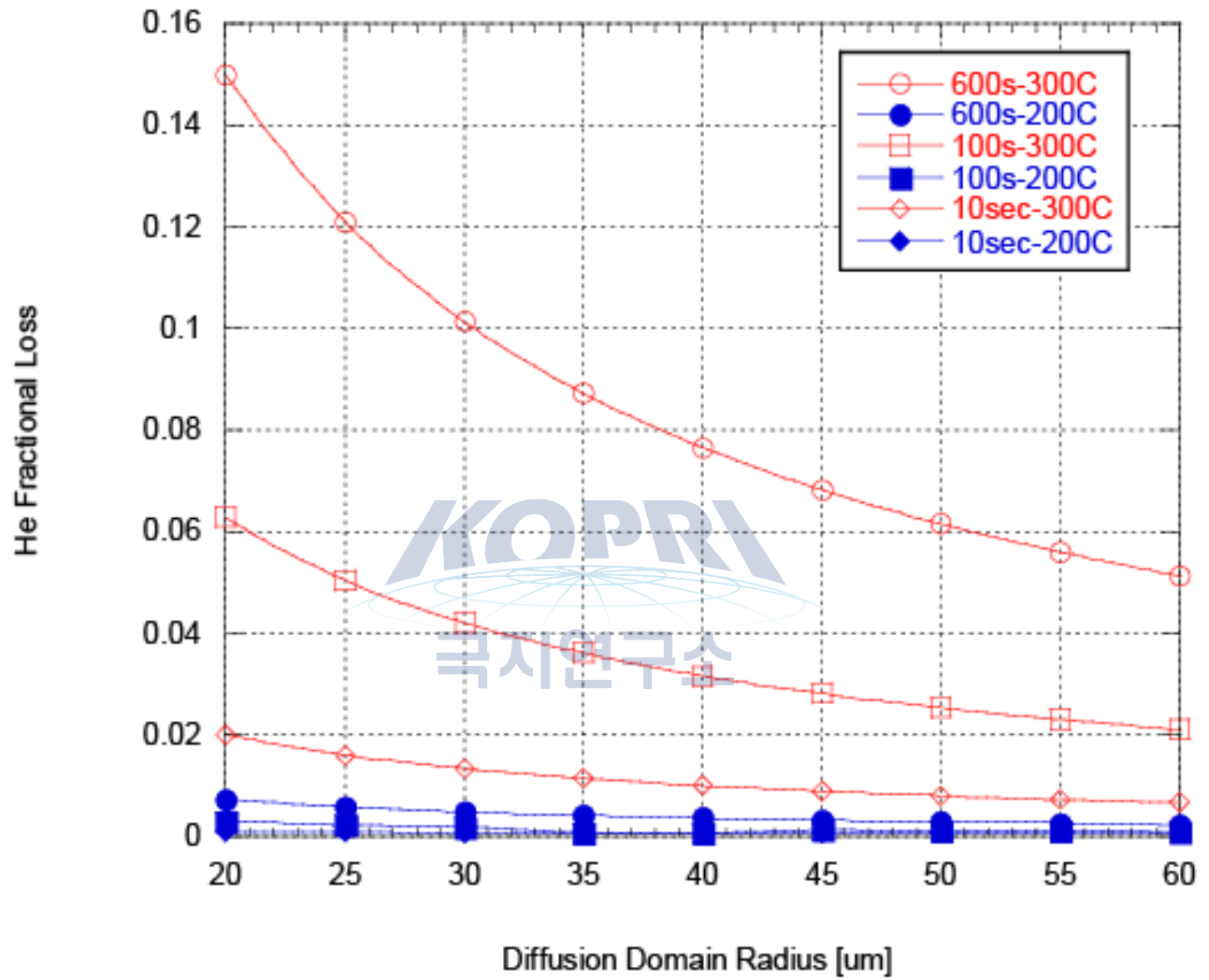


그림 5

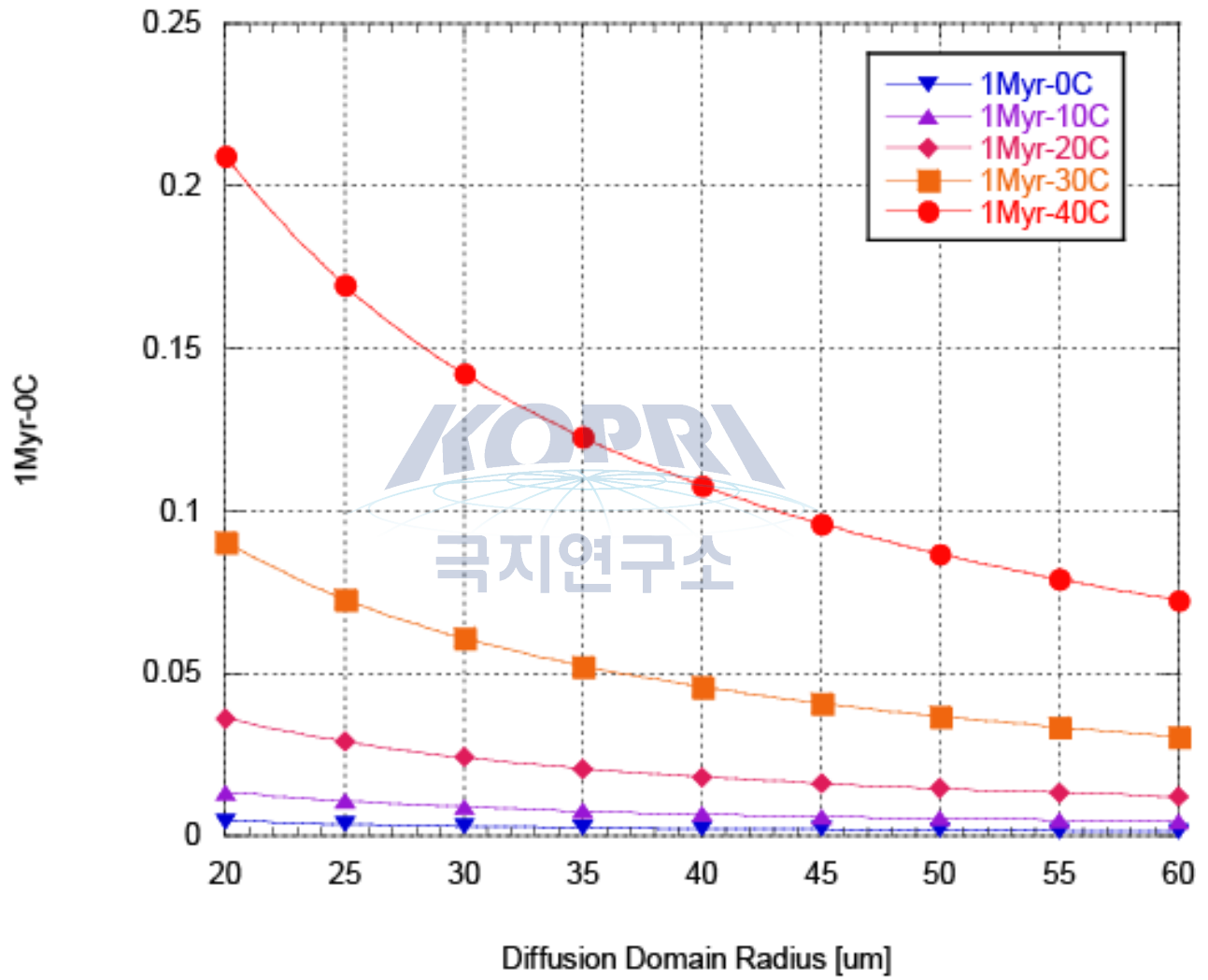


그림 6

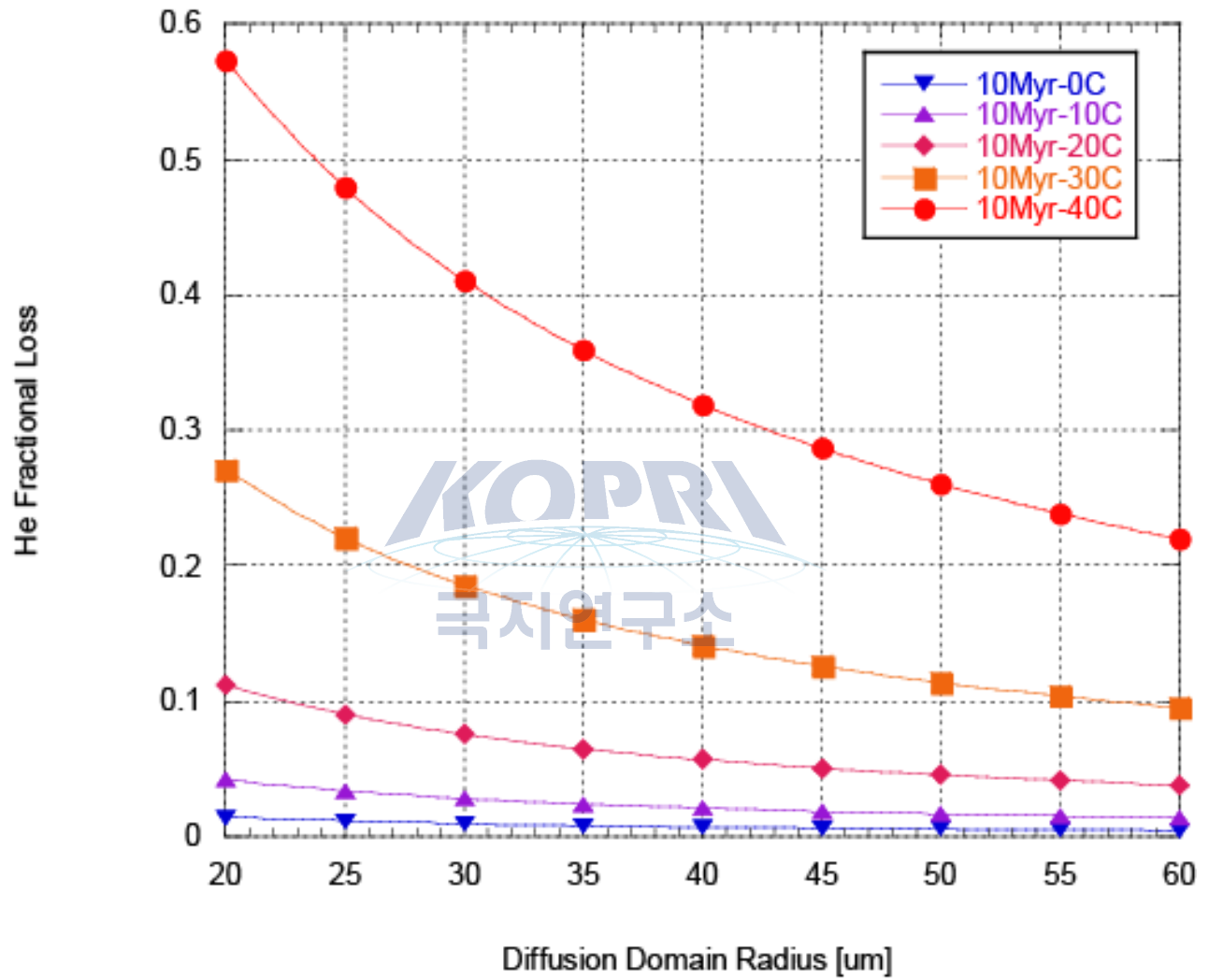
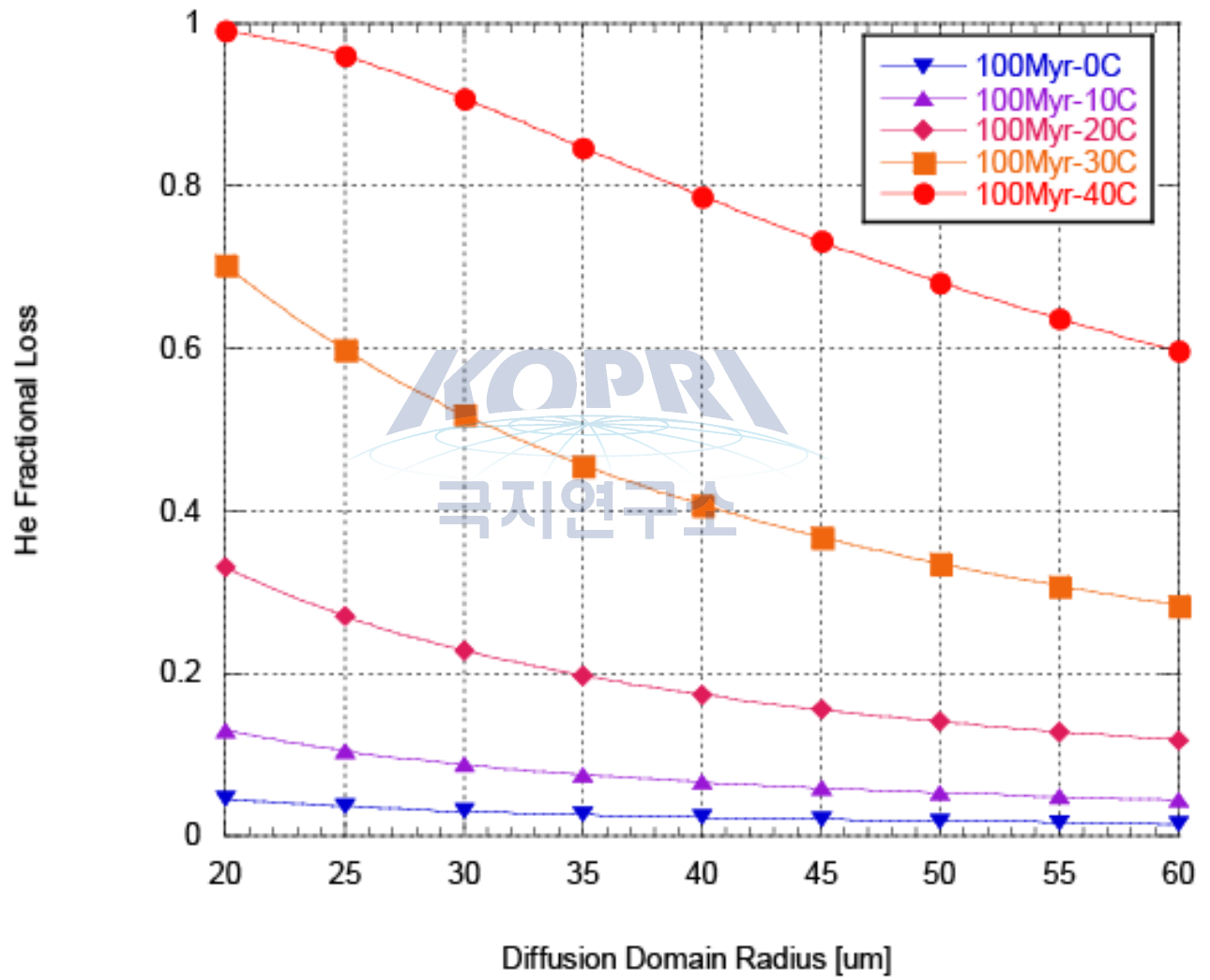
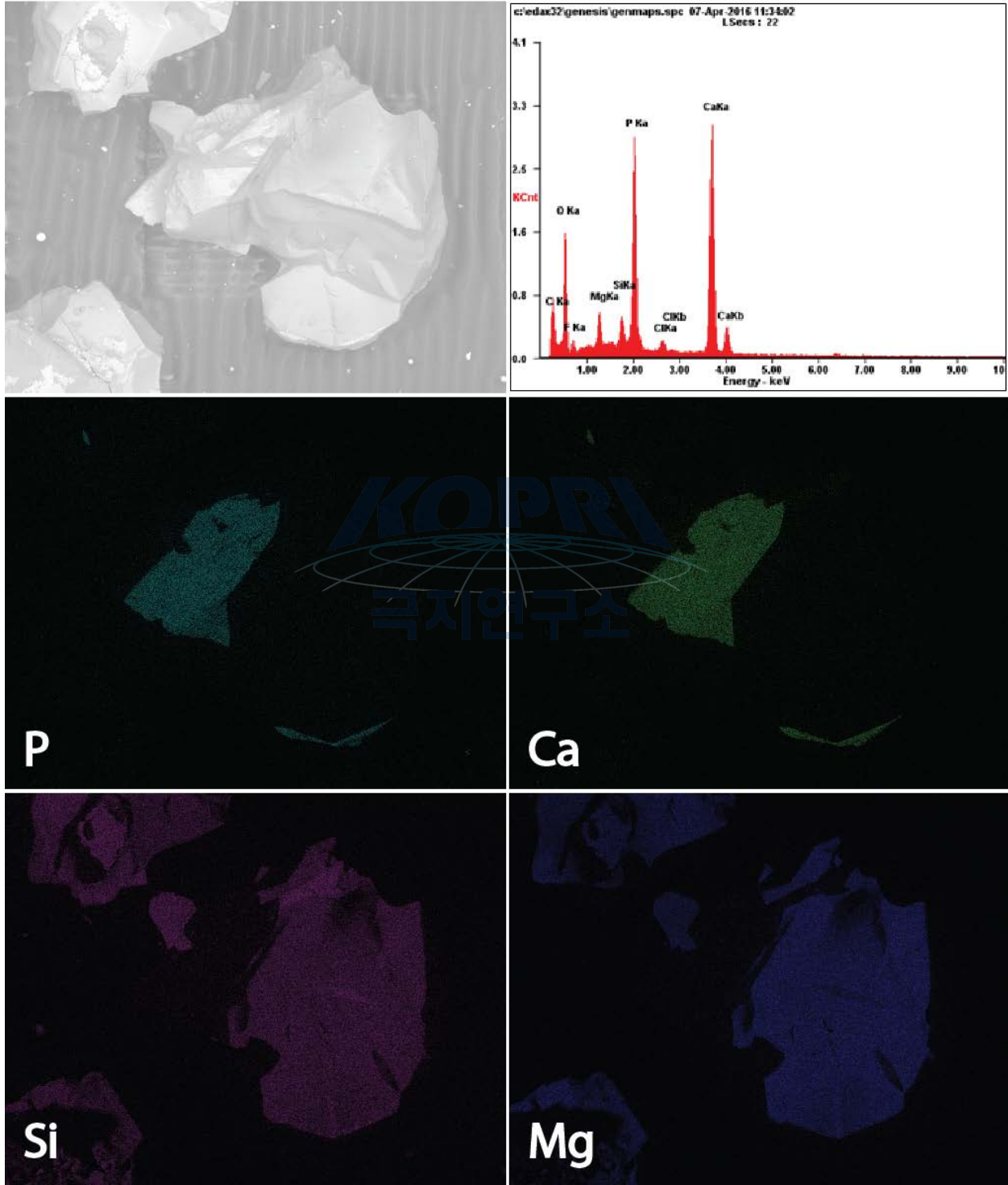


그림 7

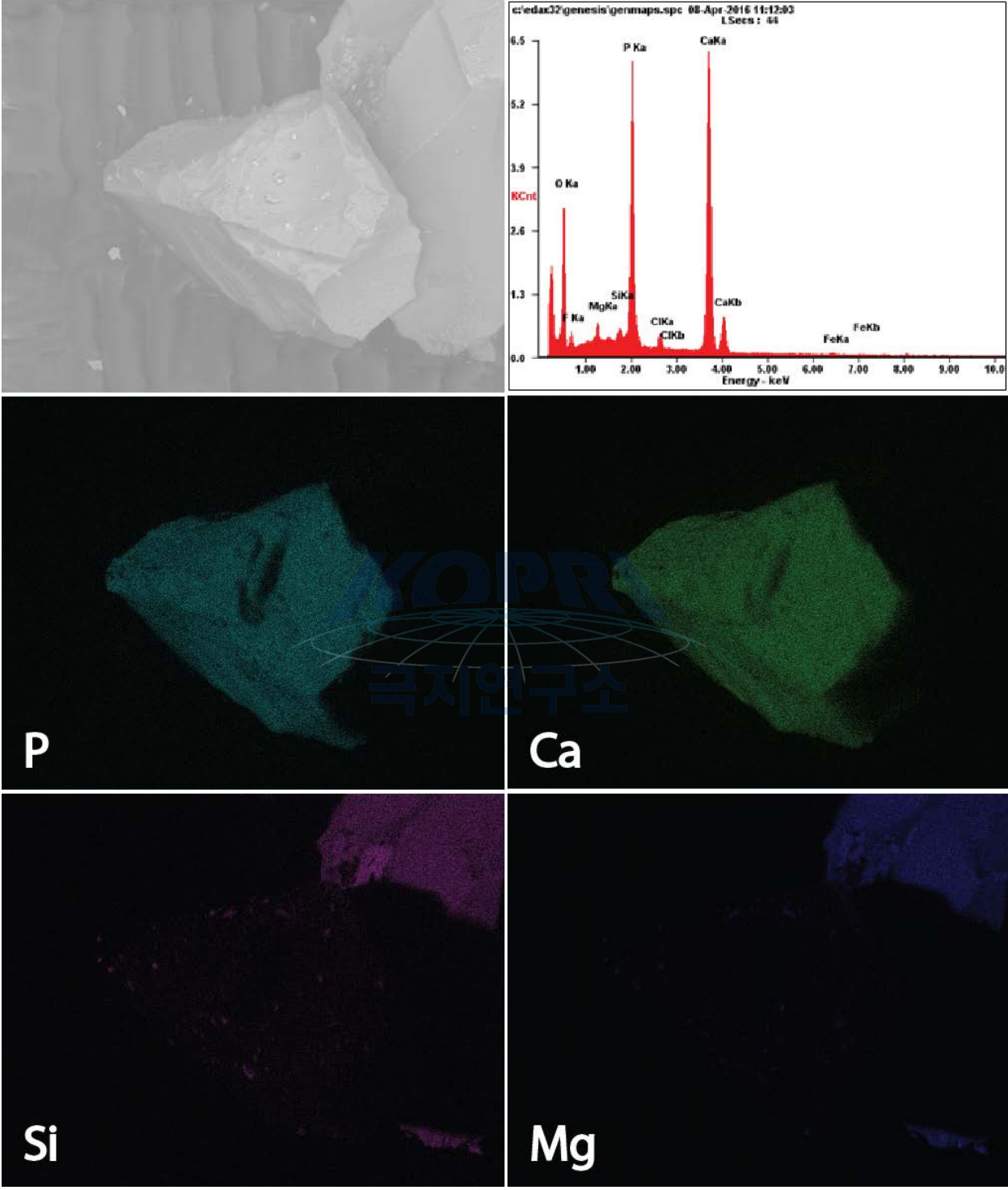


APPENDIX

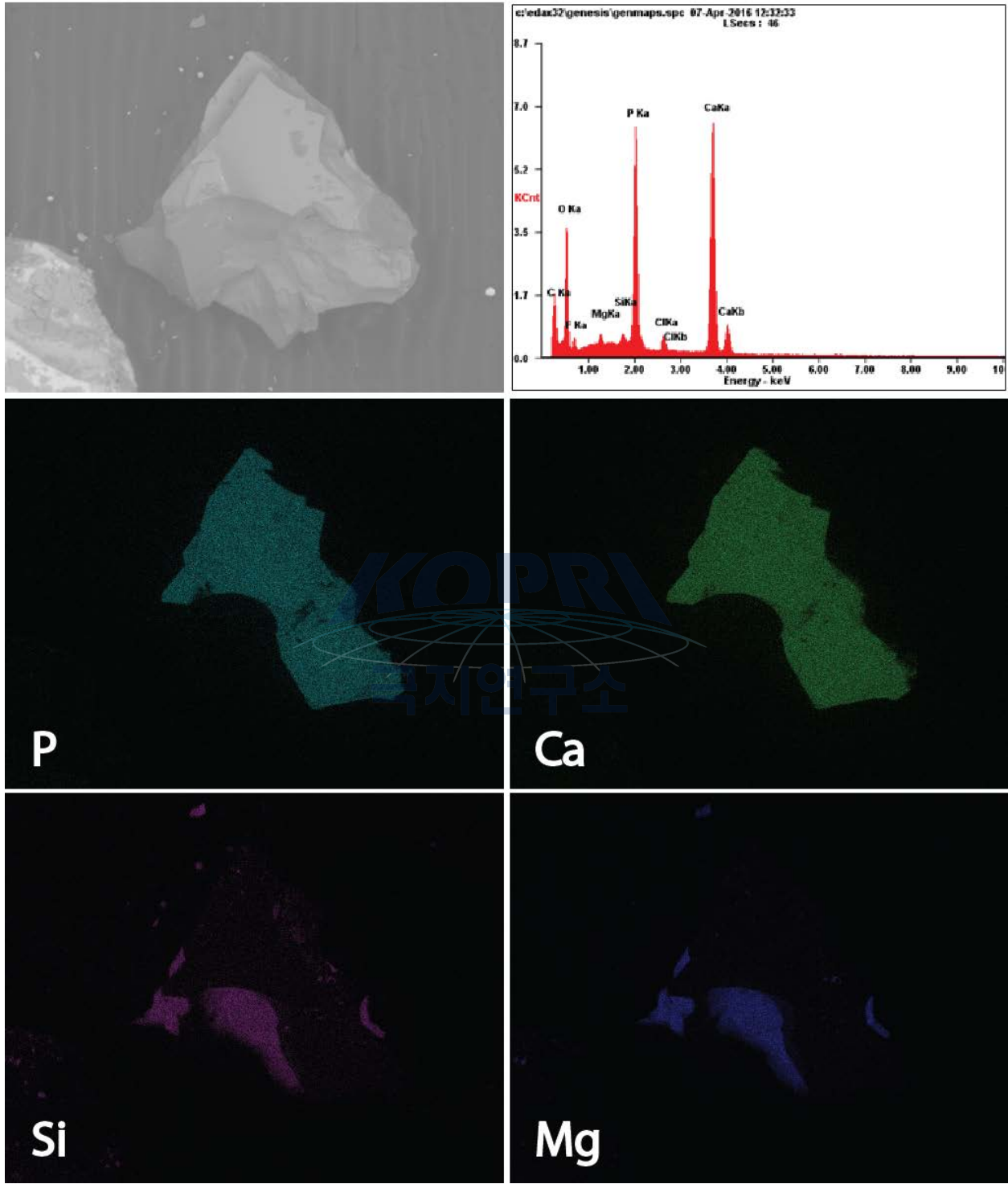
A2-3-one



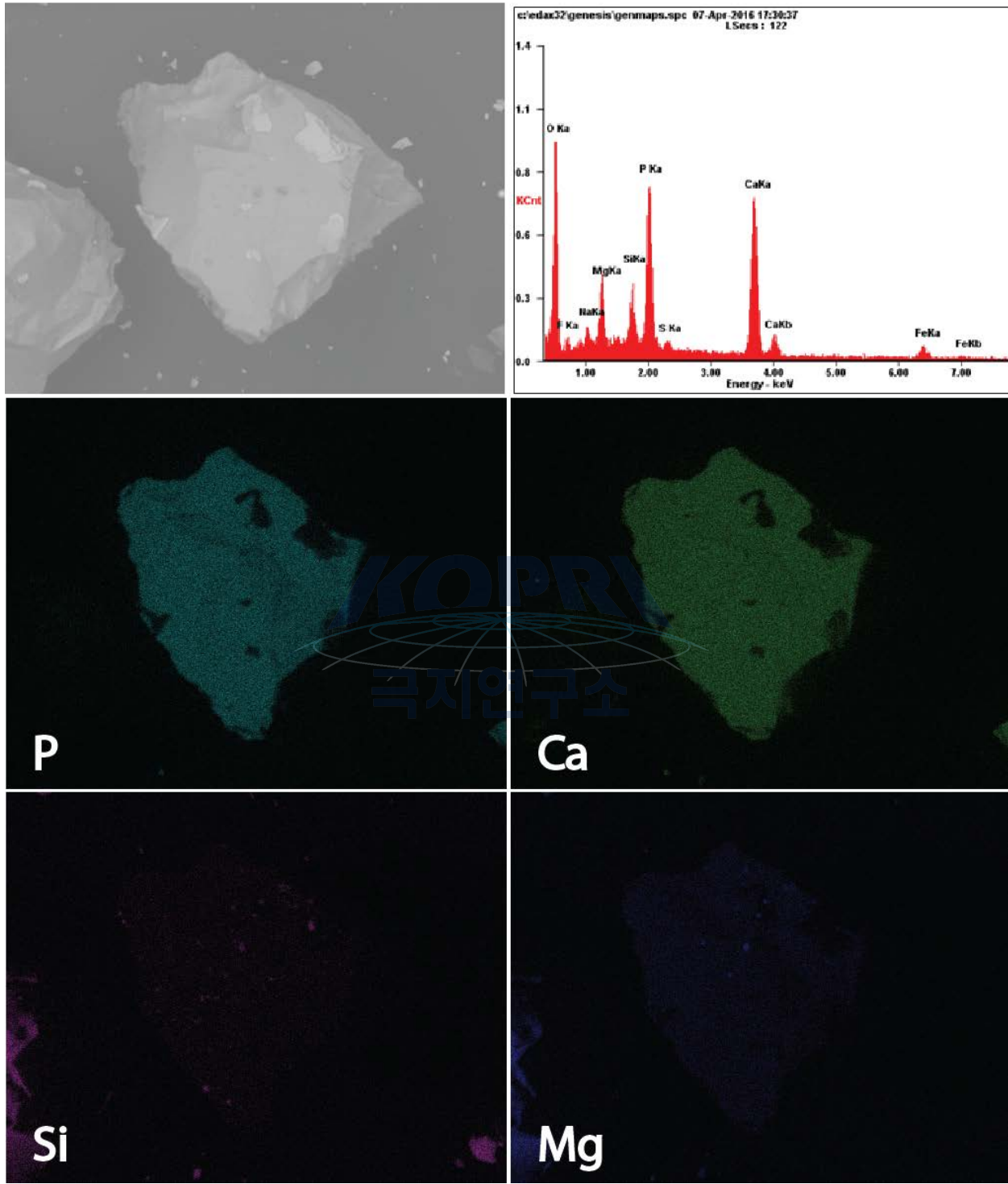
A2-5-one



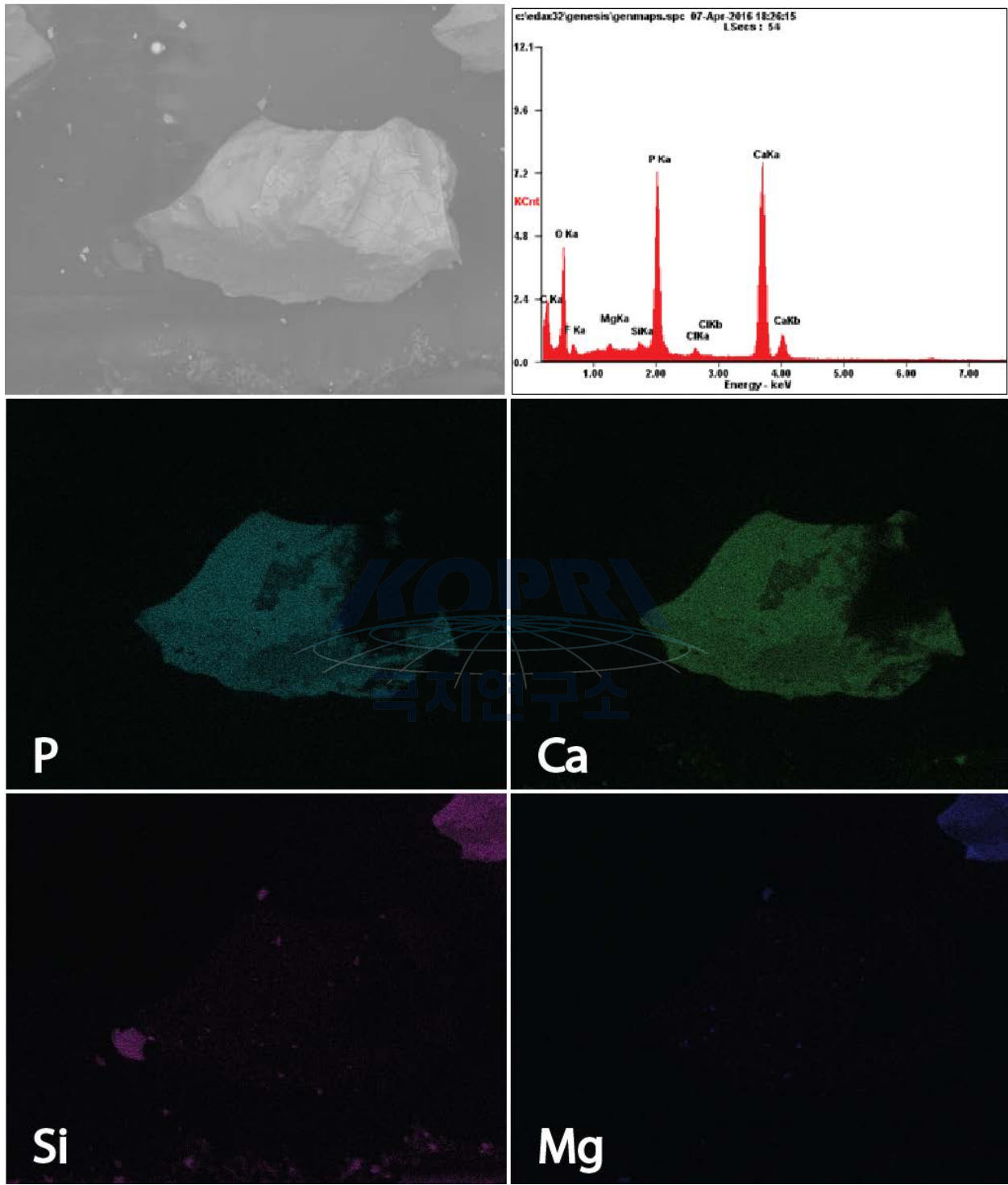
A3-3-one



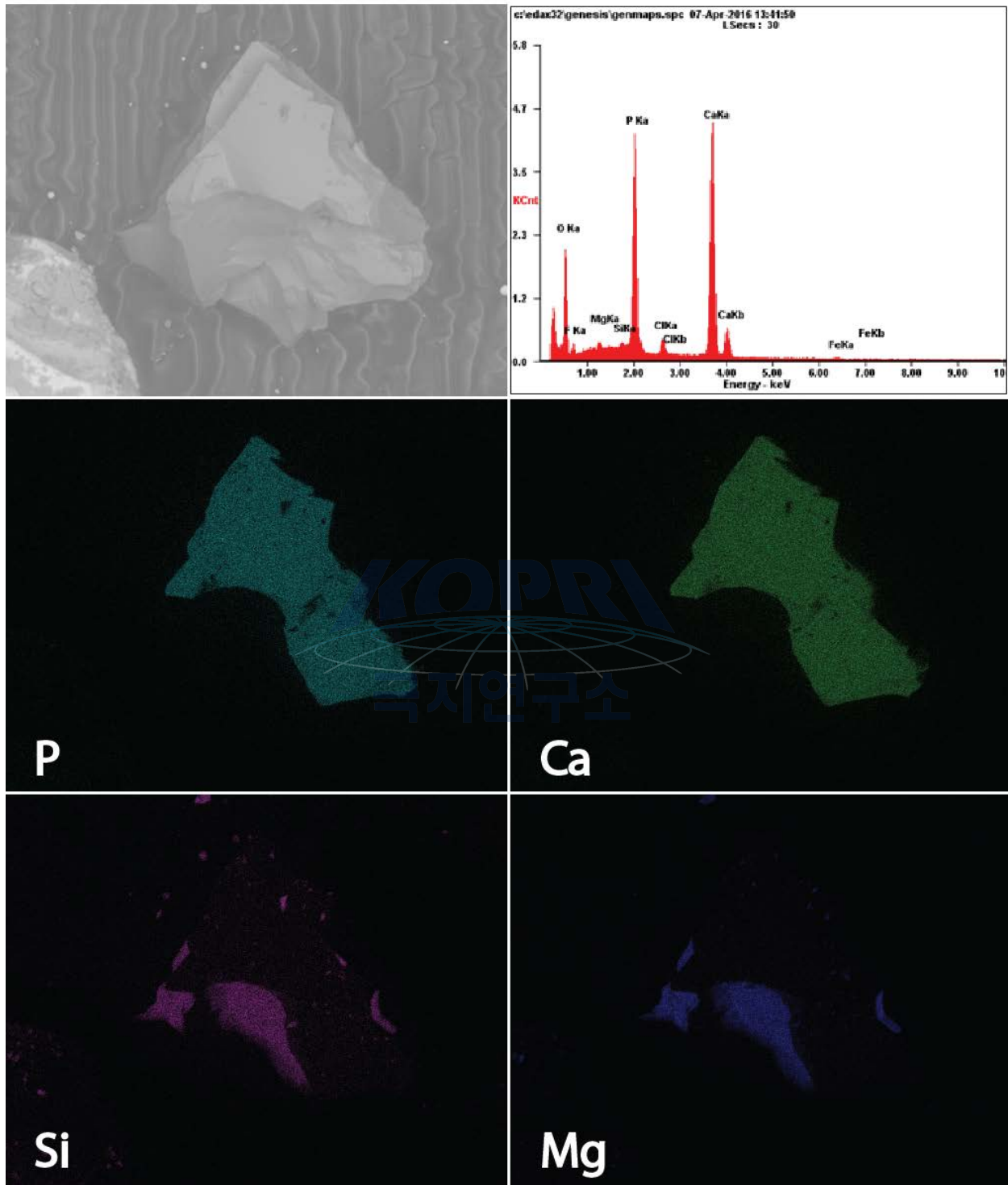
A3-4-one



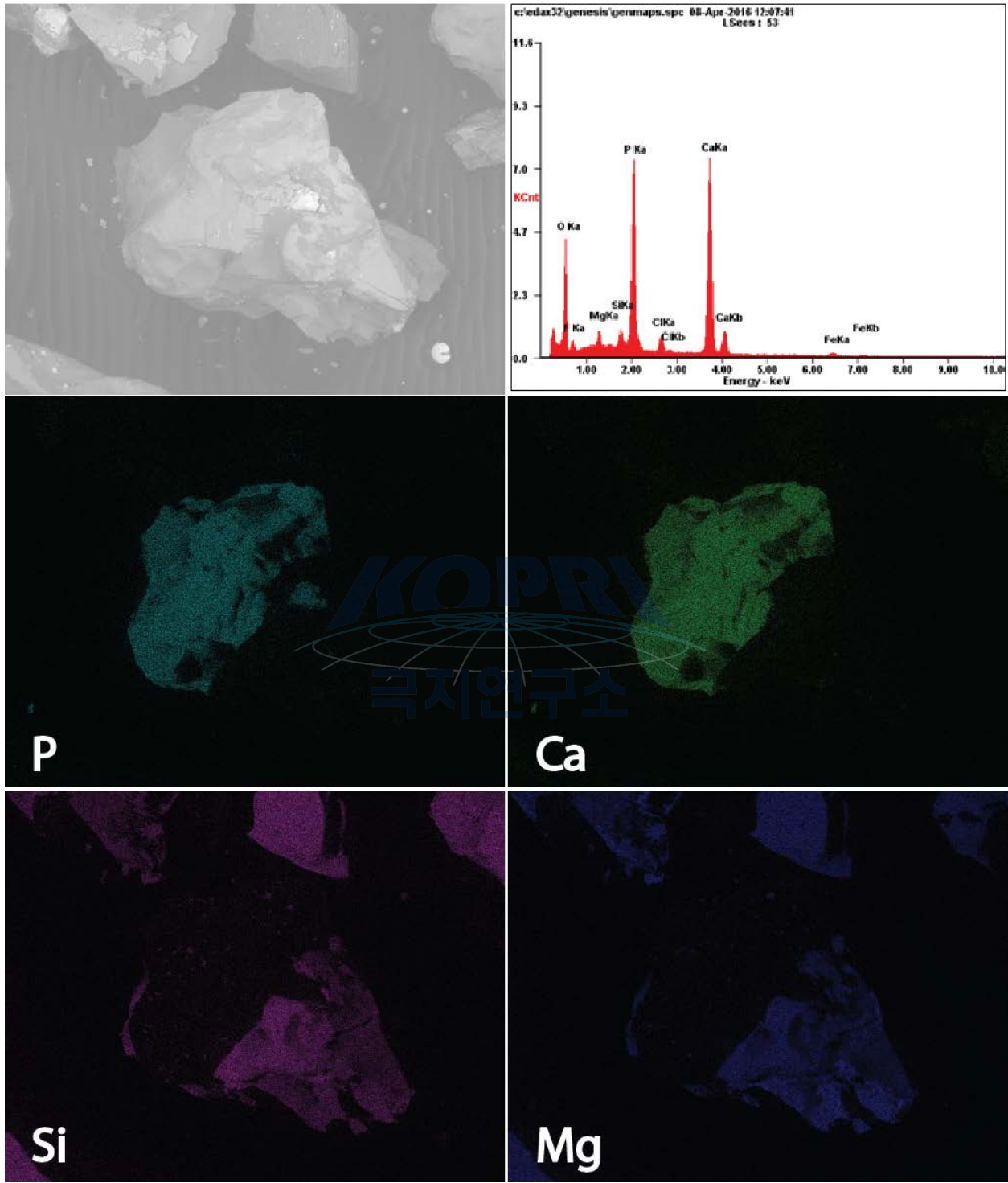
A3-4-two



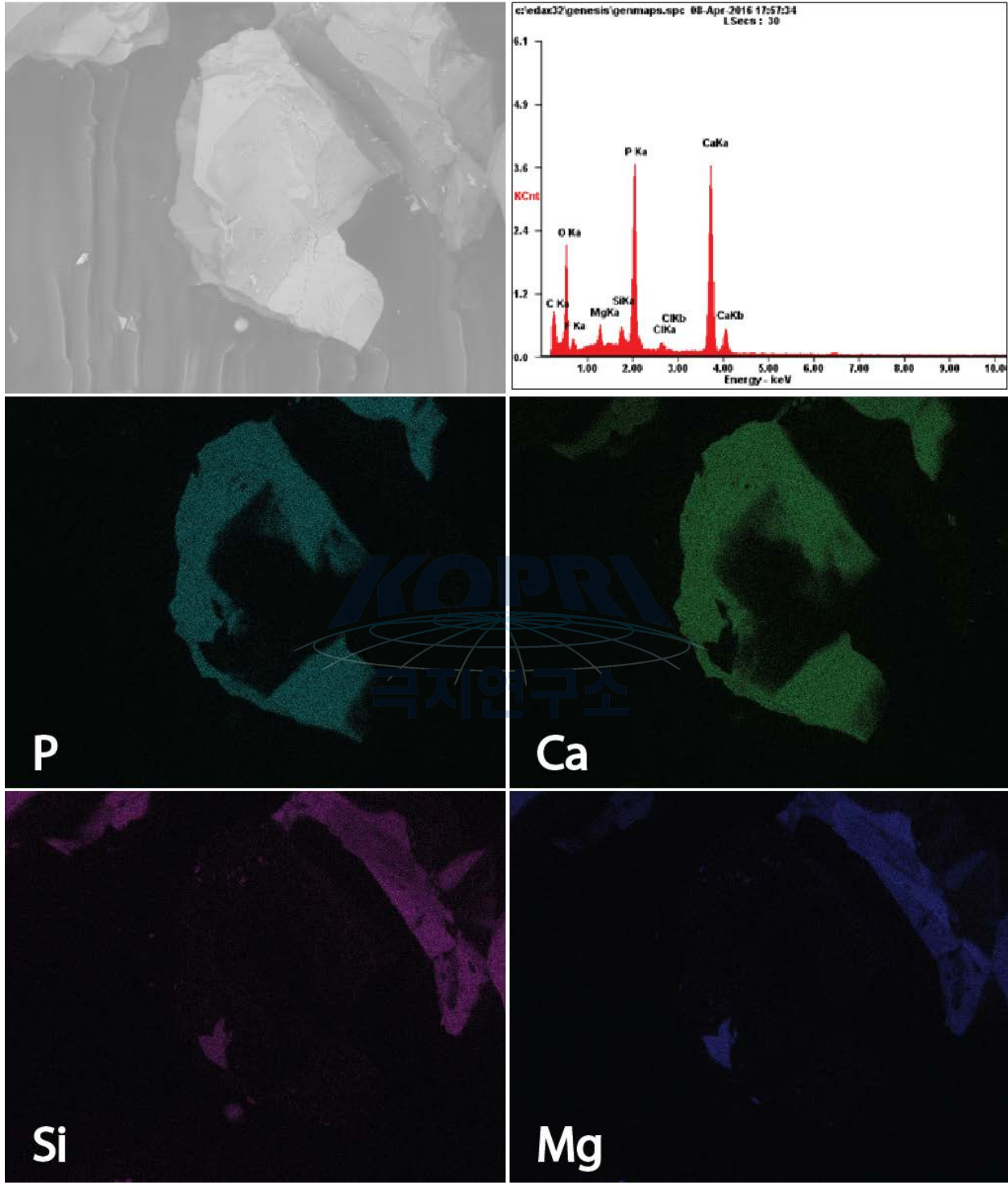
A4-3-one



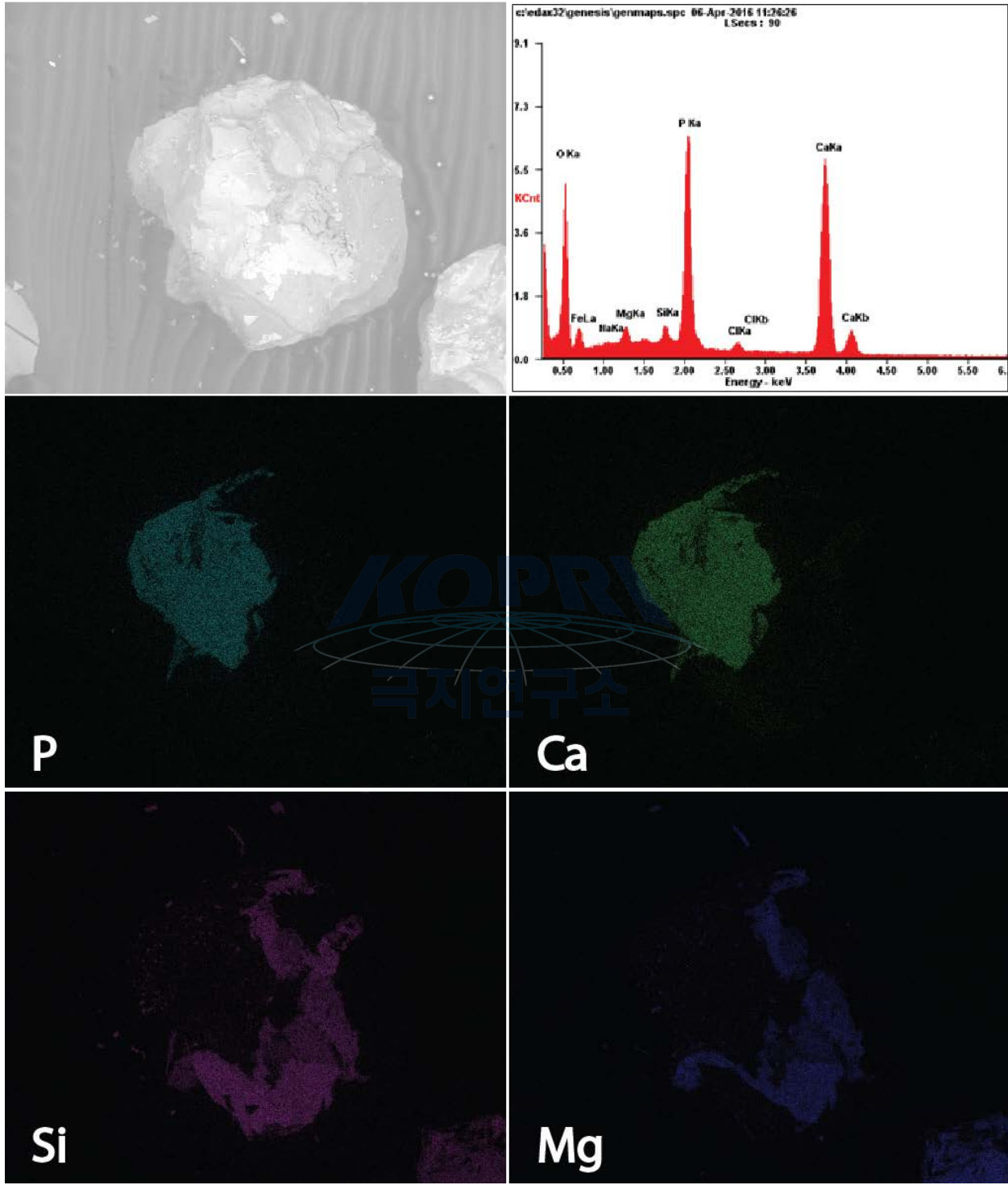
A4-5-one



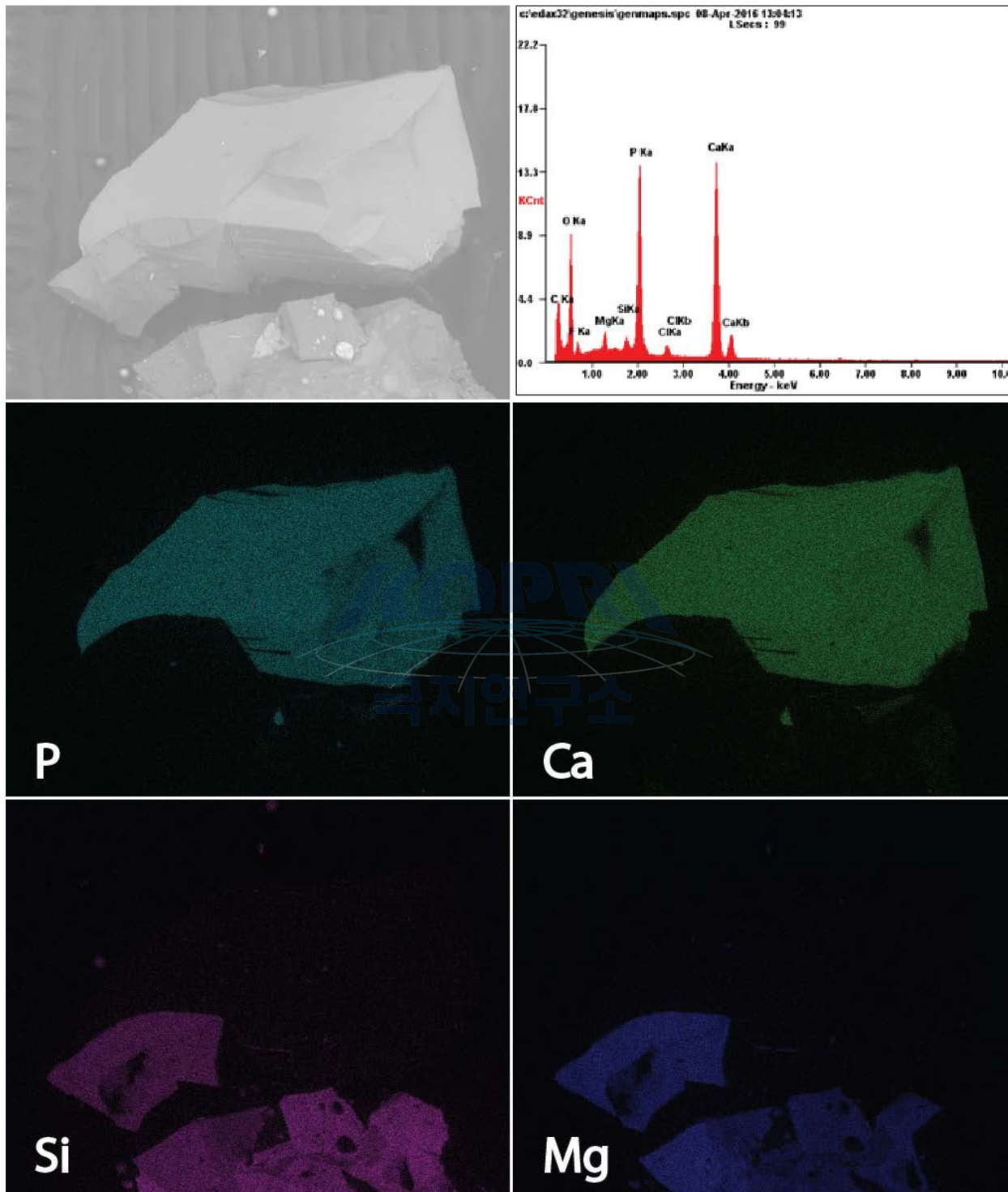
A4-6-one



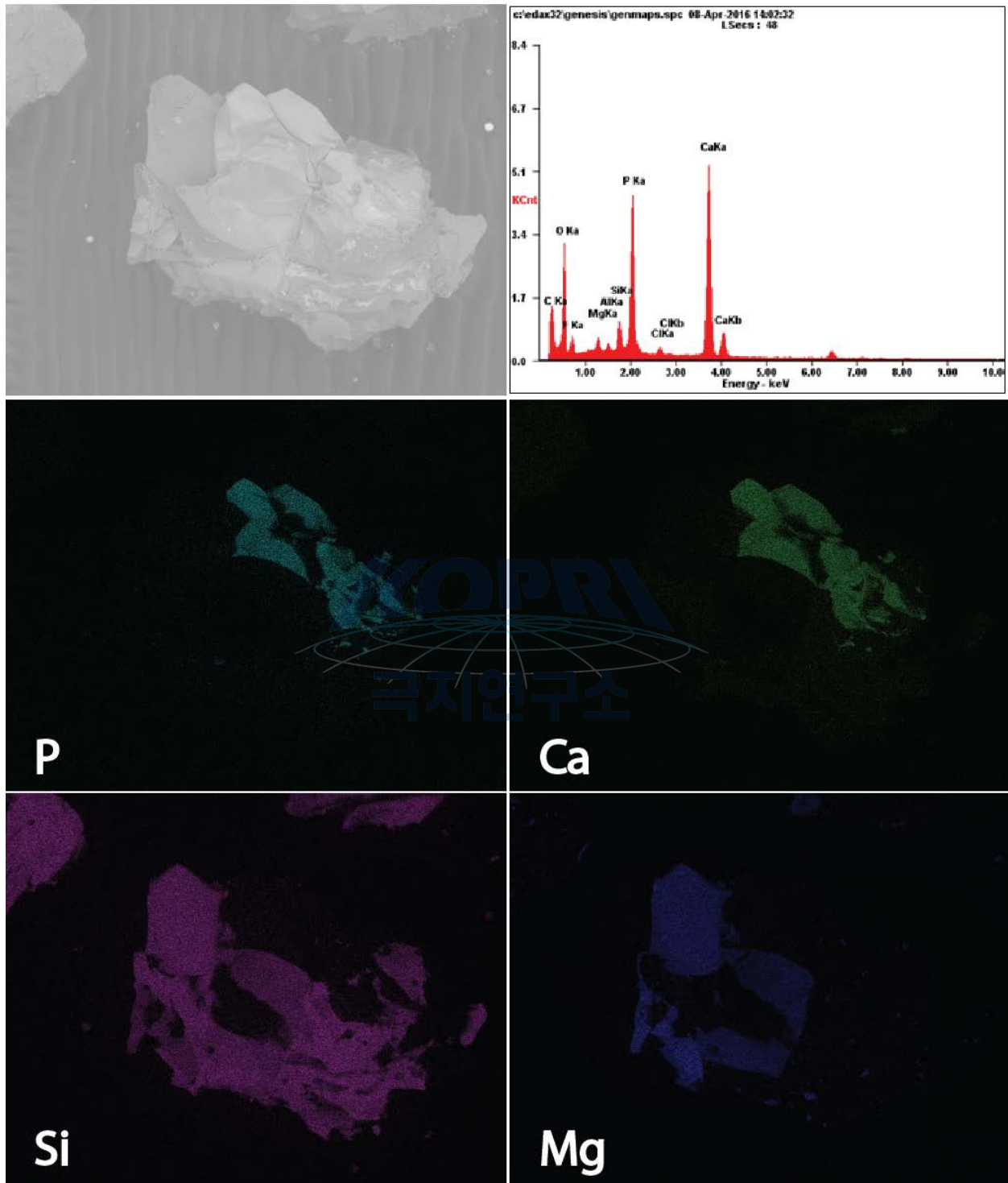
A6-1-one



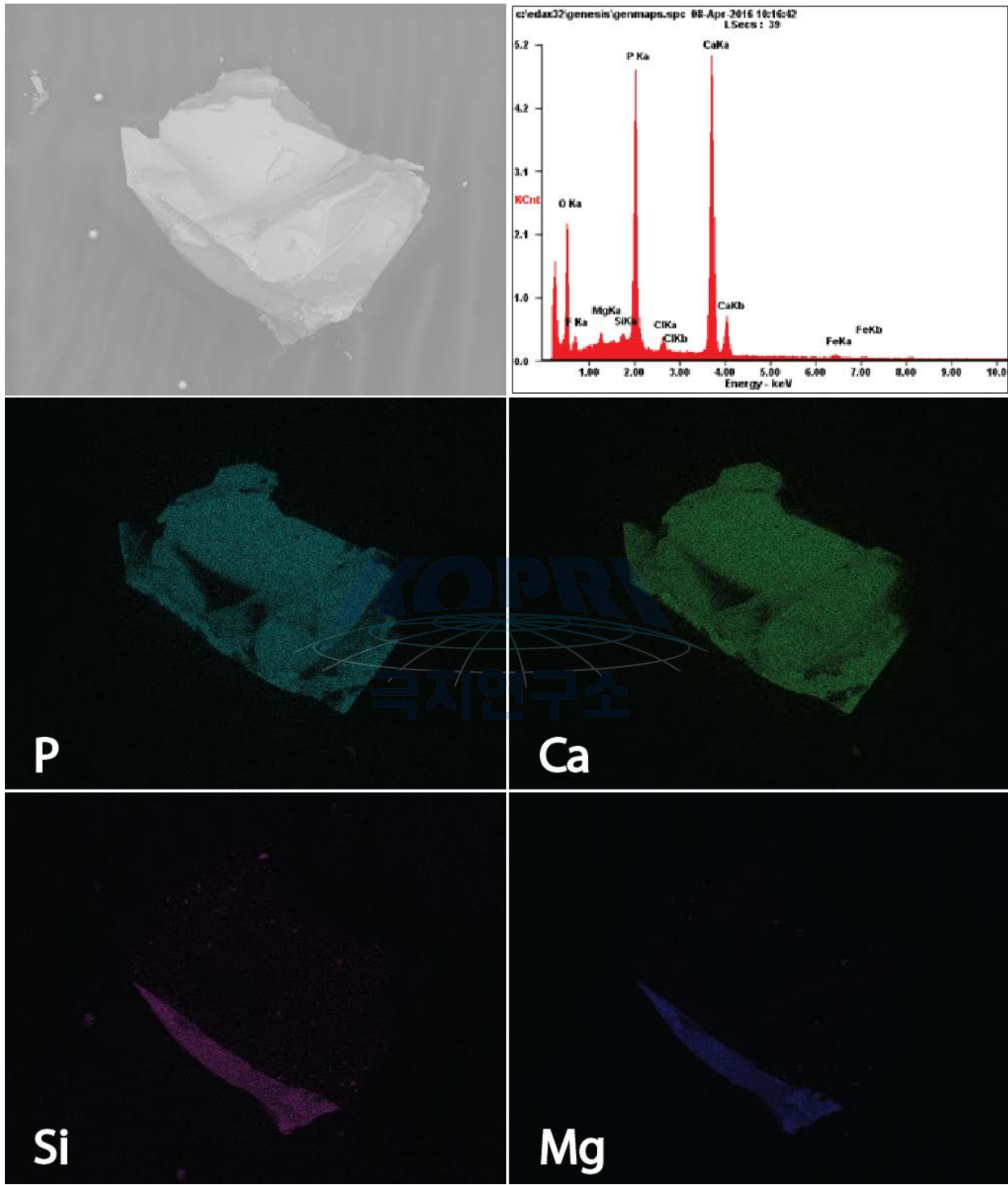
A6-5-one



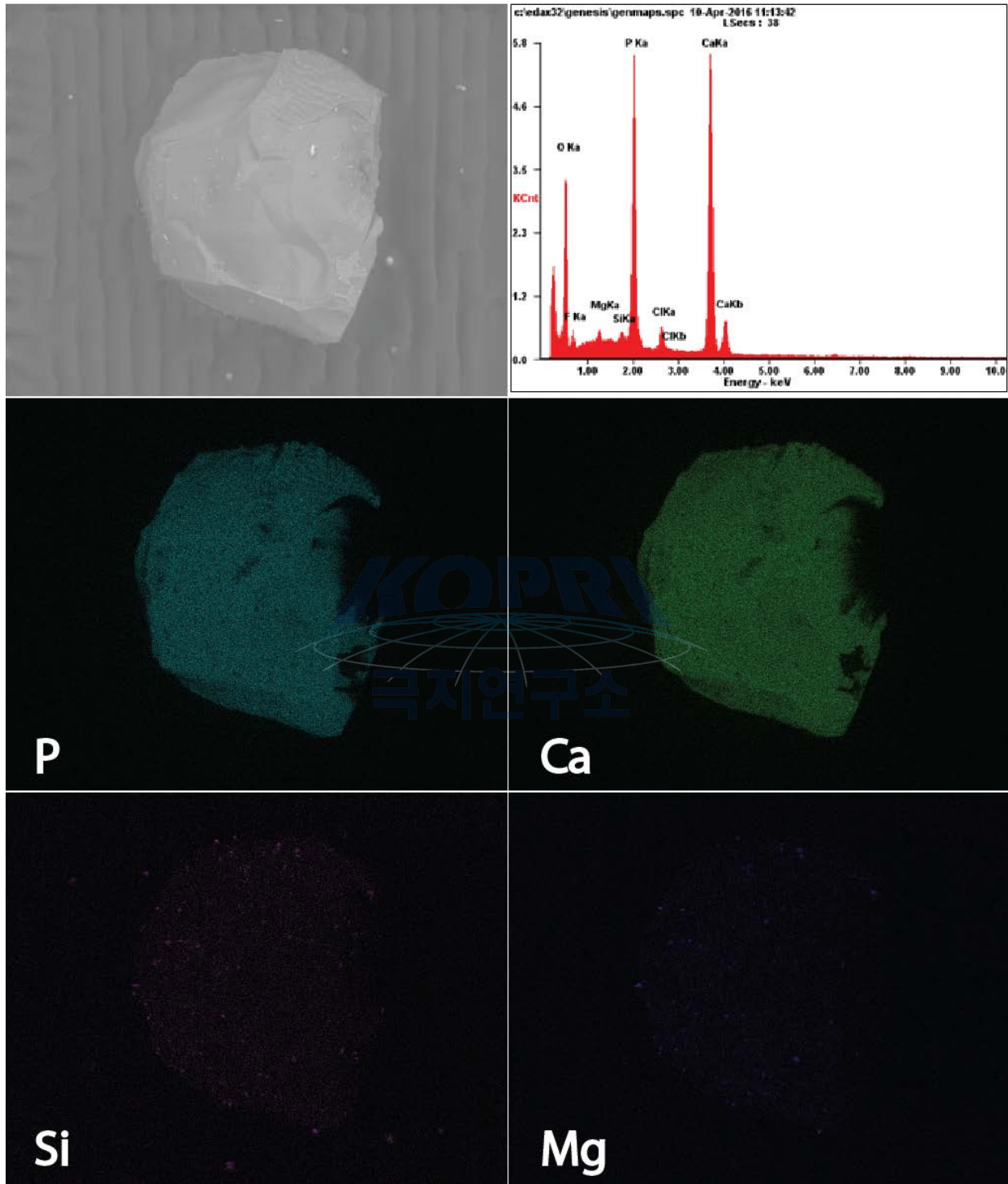
A6-5-two



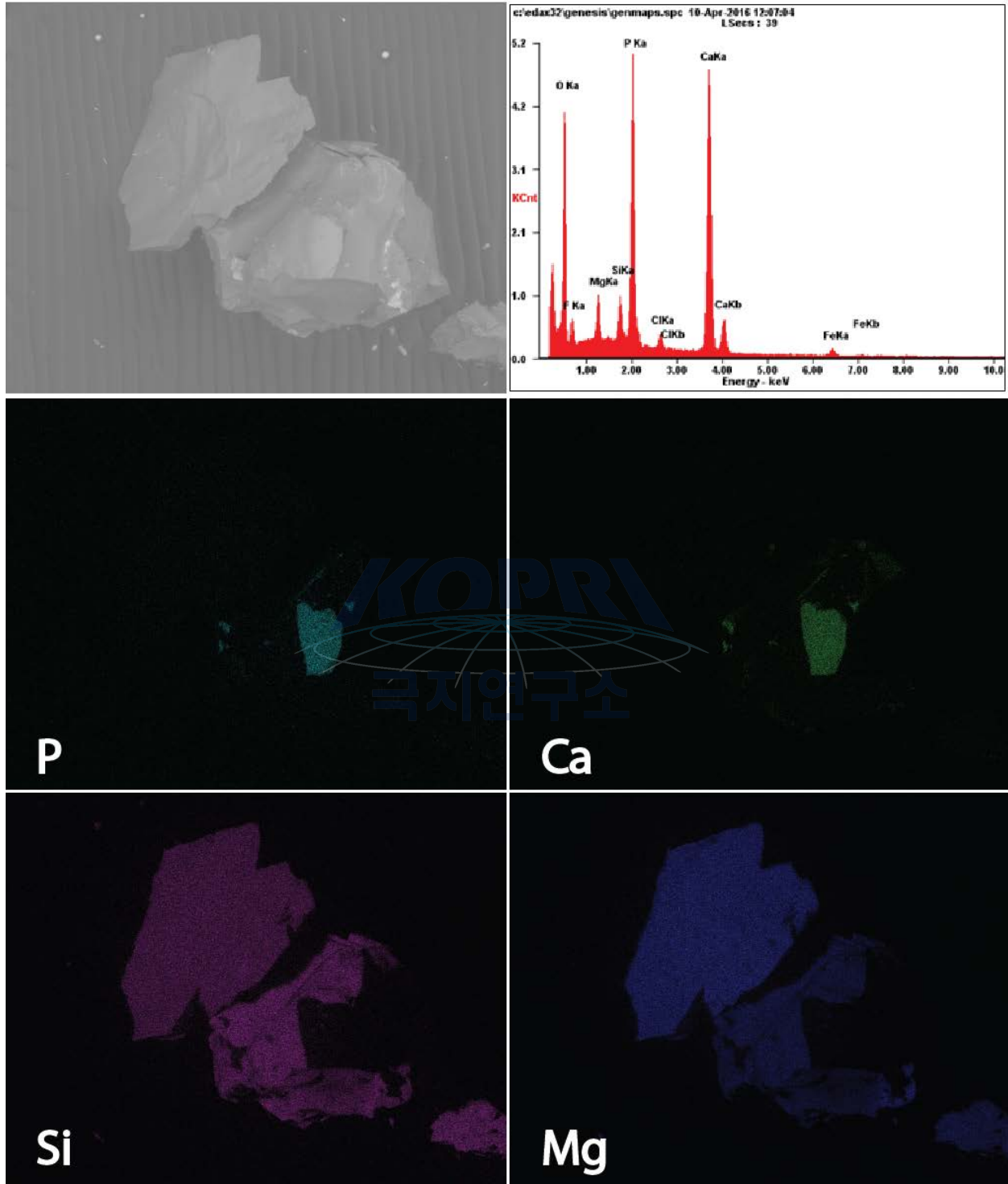
A7-4-one



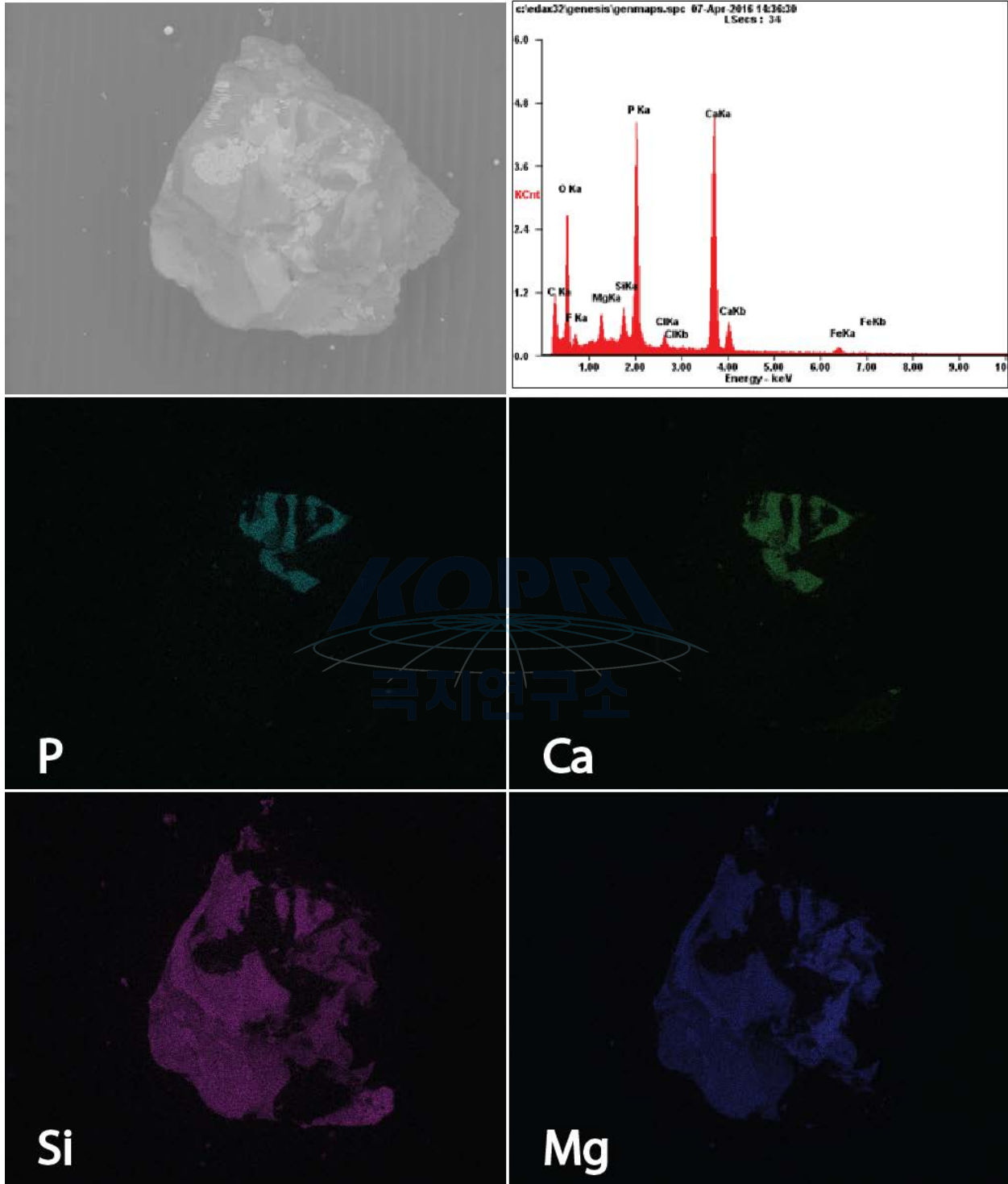
A7-6-one



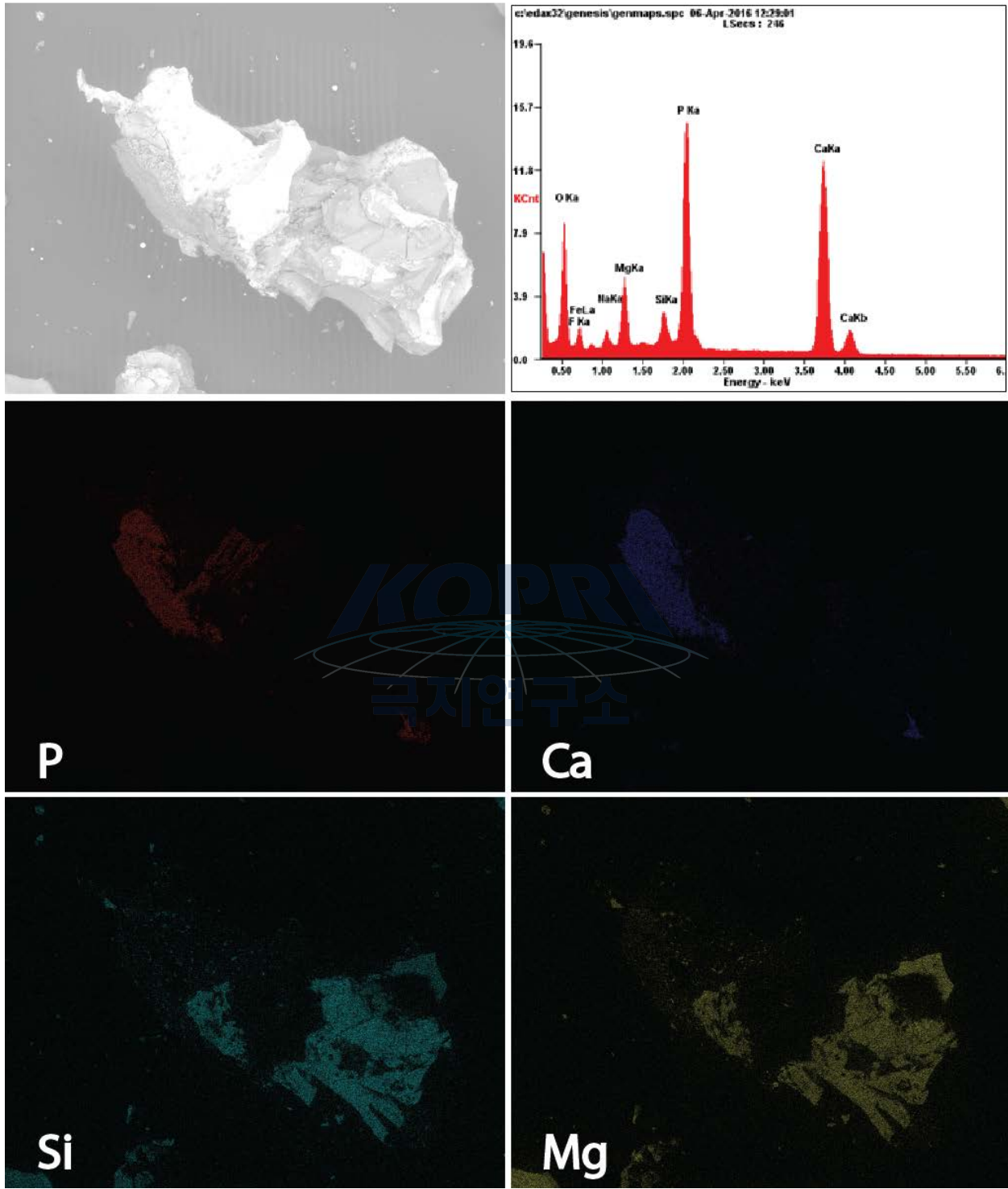
A7-6-two



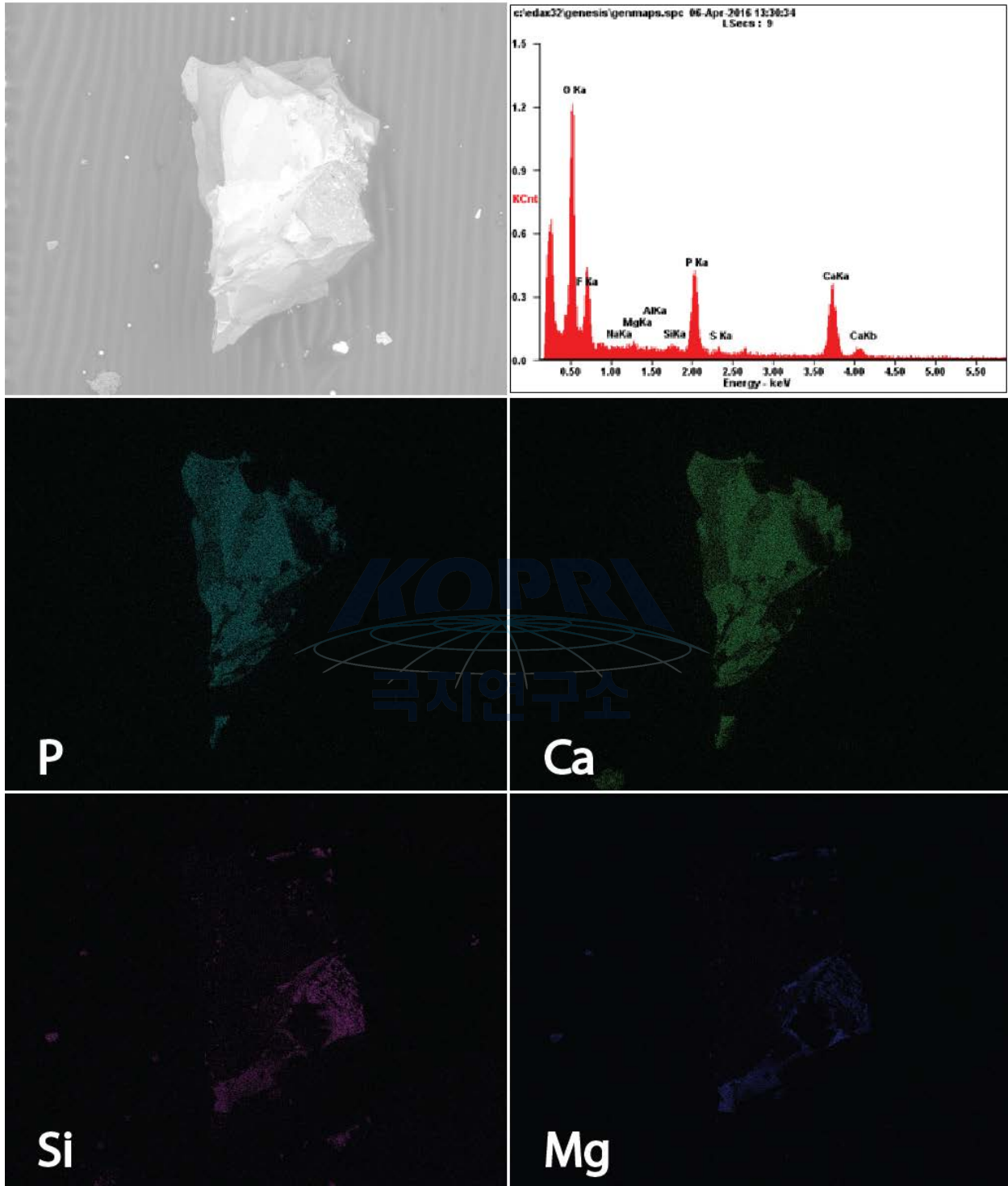
A8-3-one



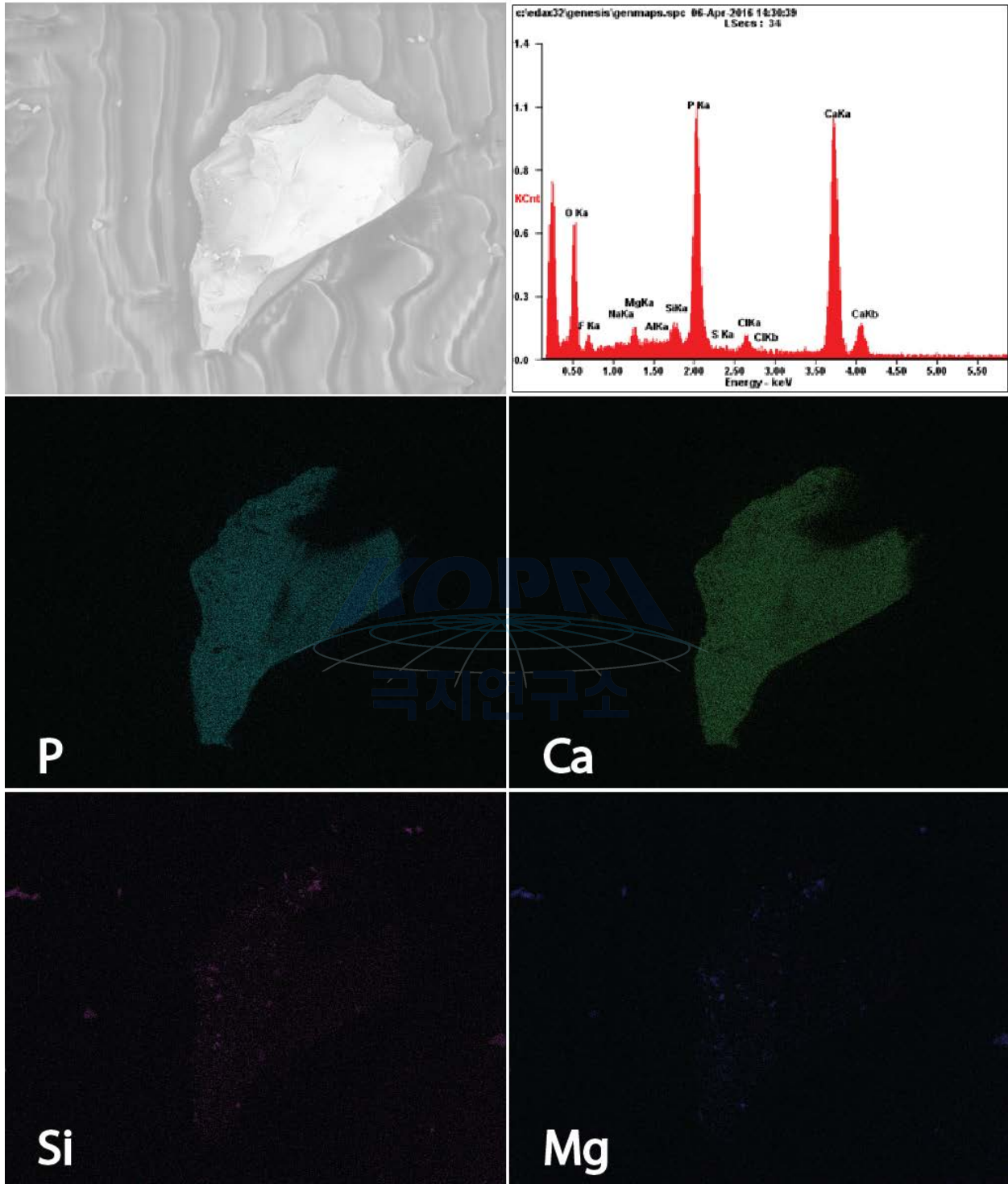
A9-2-one



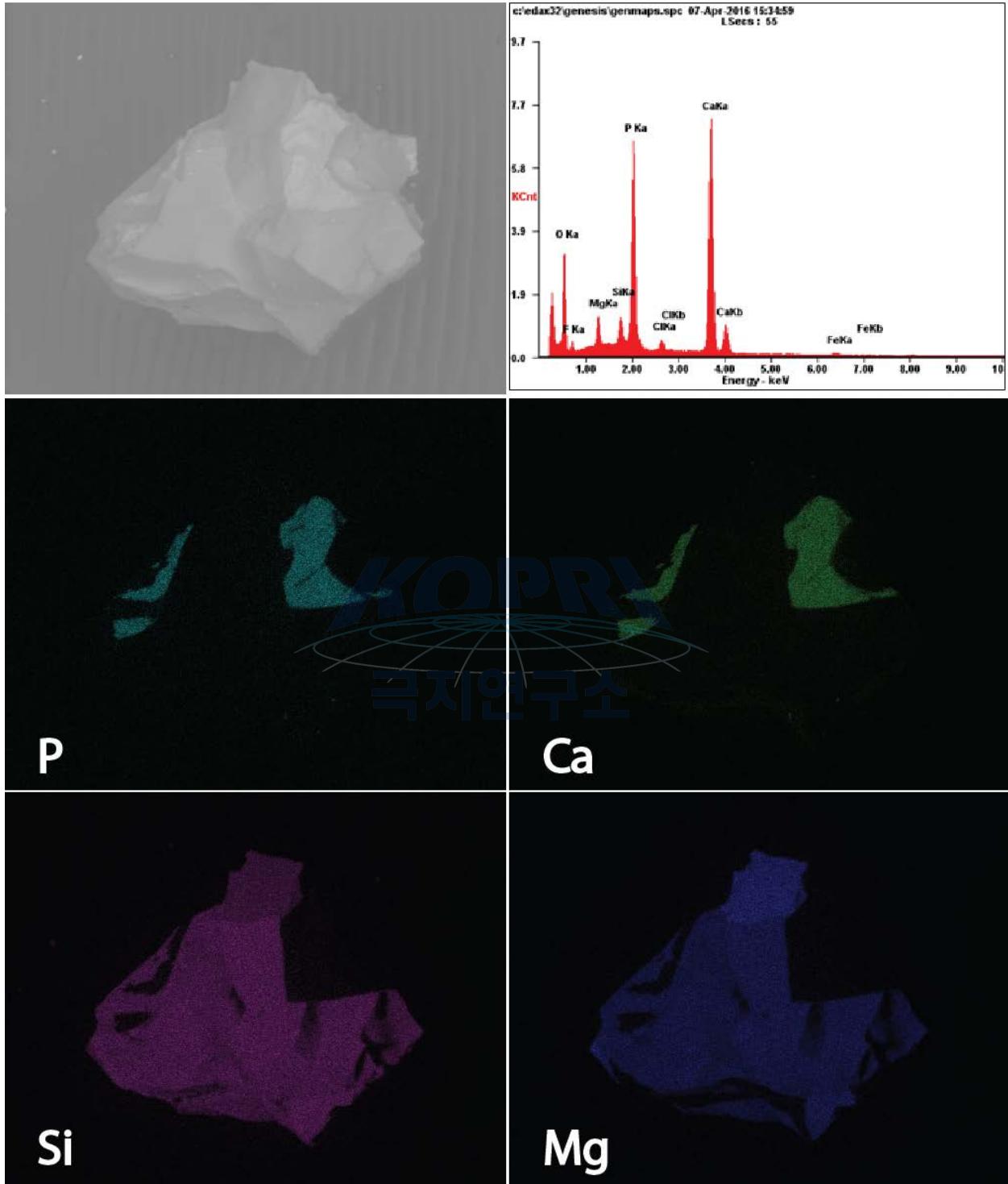
A10-1-one



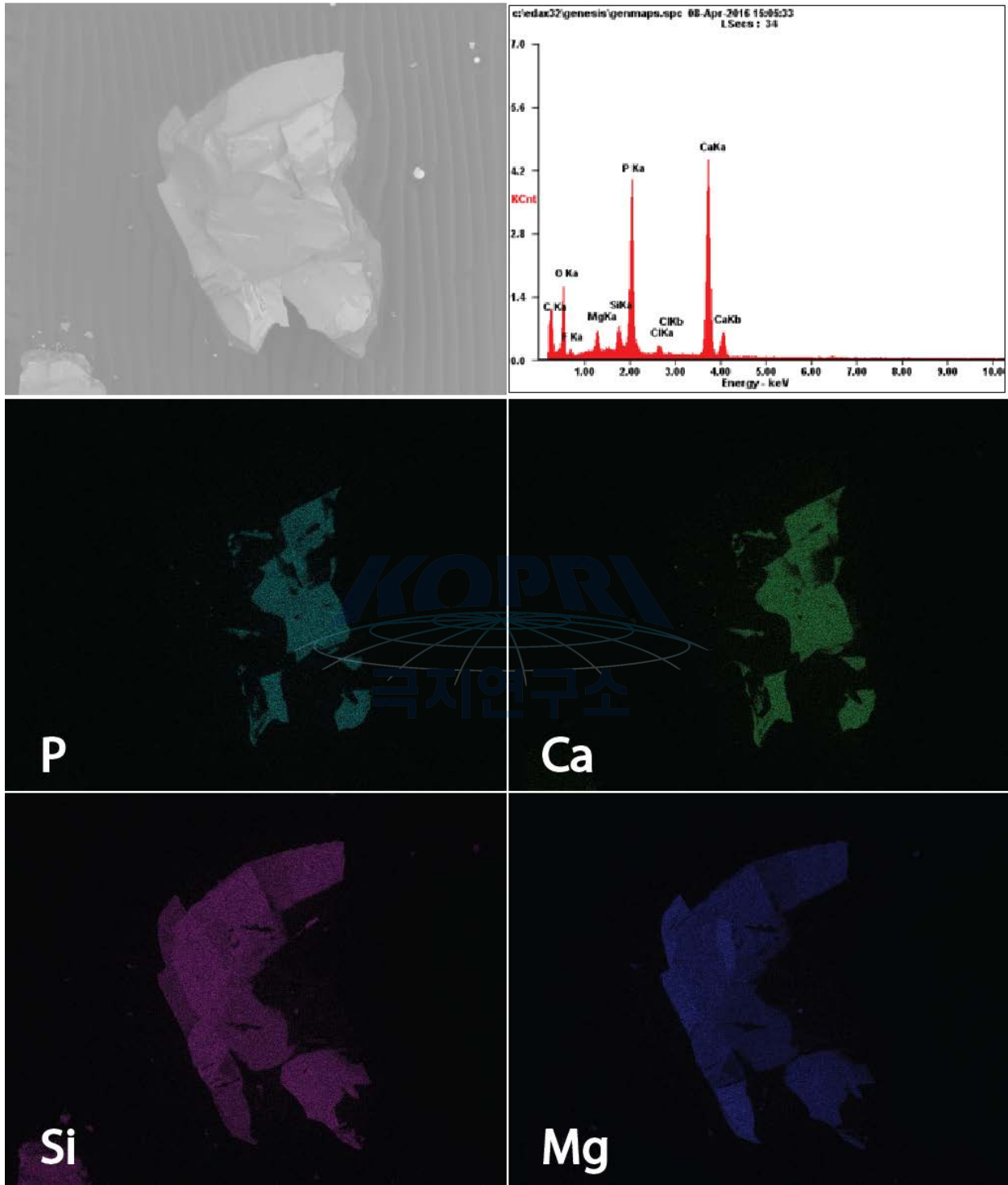
A10-1-two



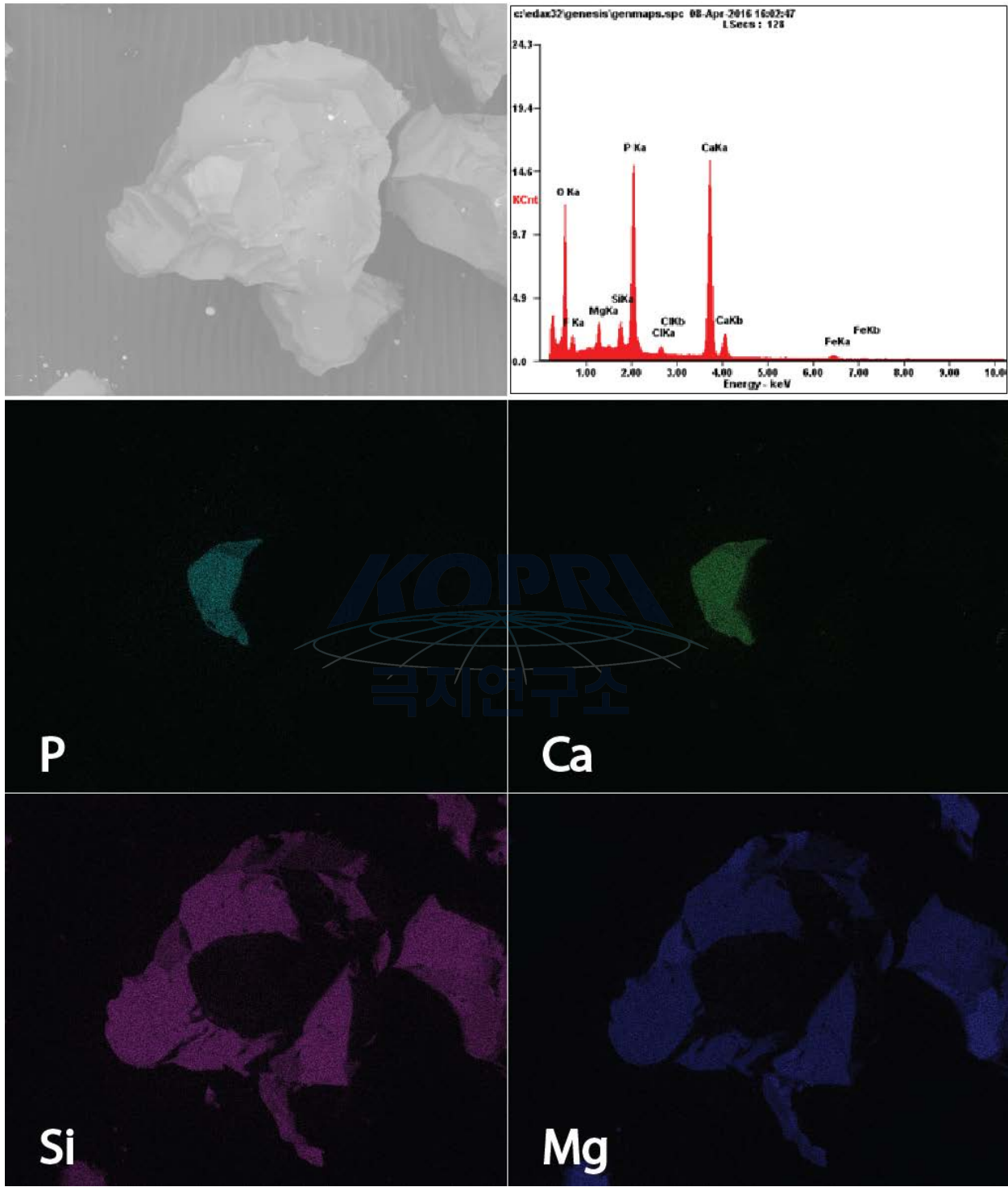
A10-3-one



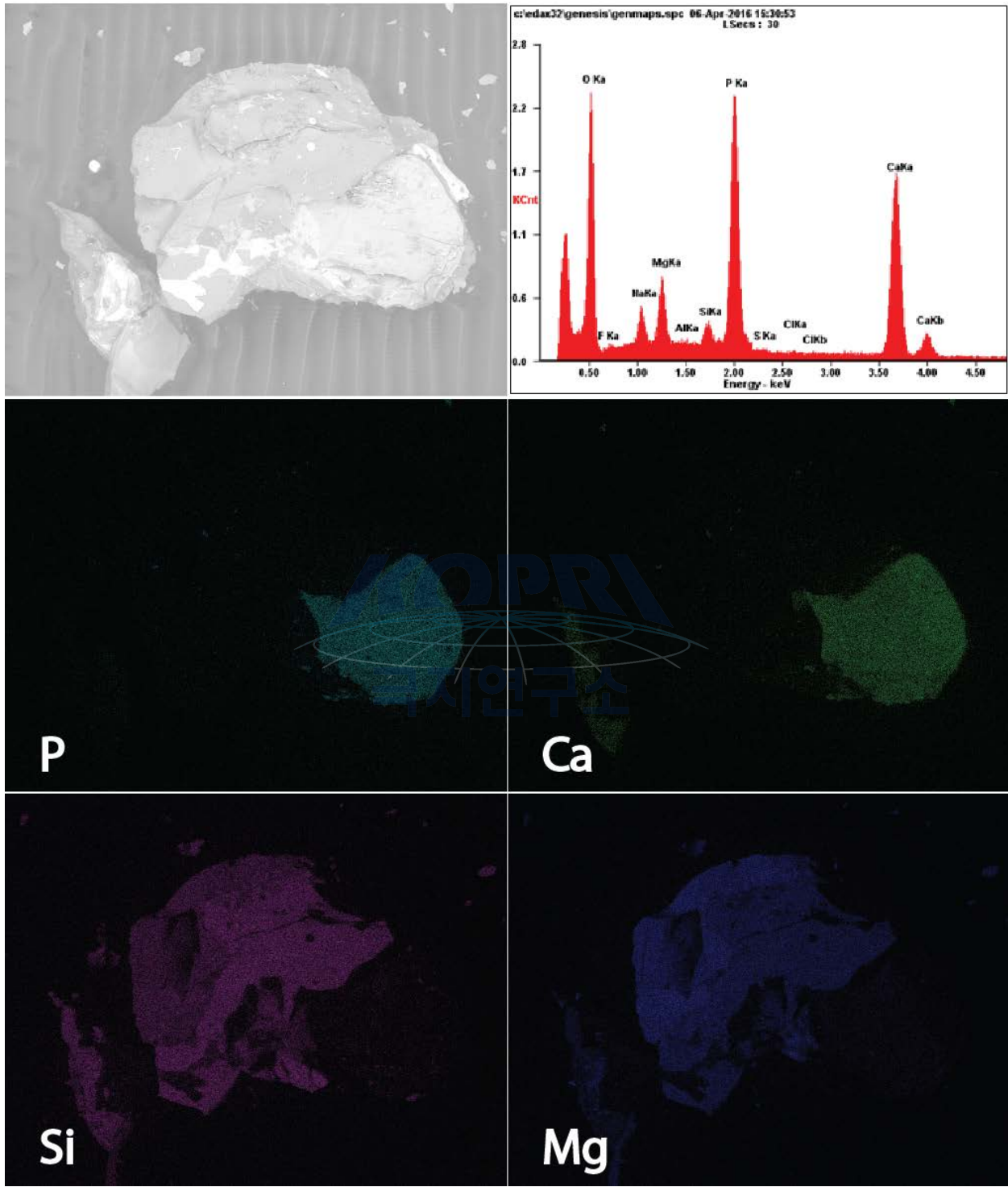
A10-5-one



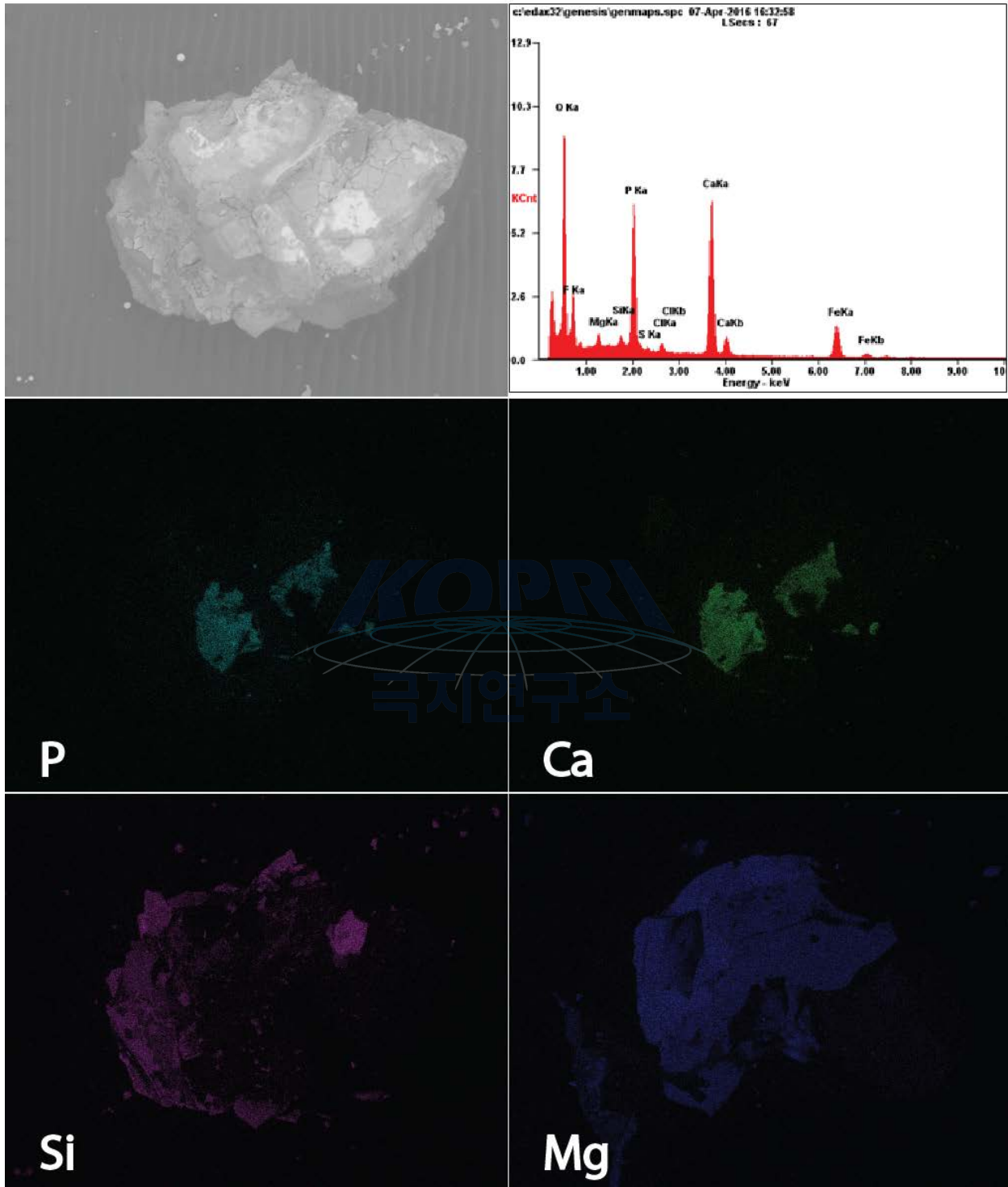
A10-5-two



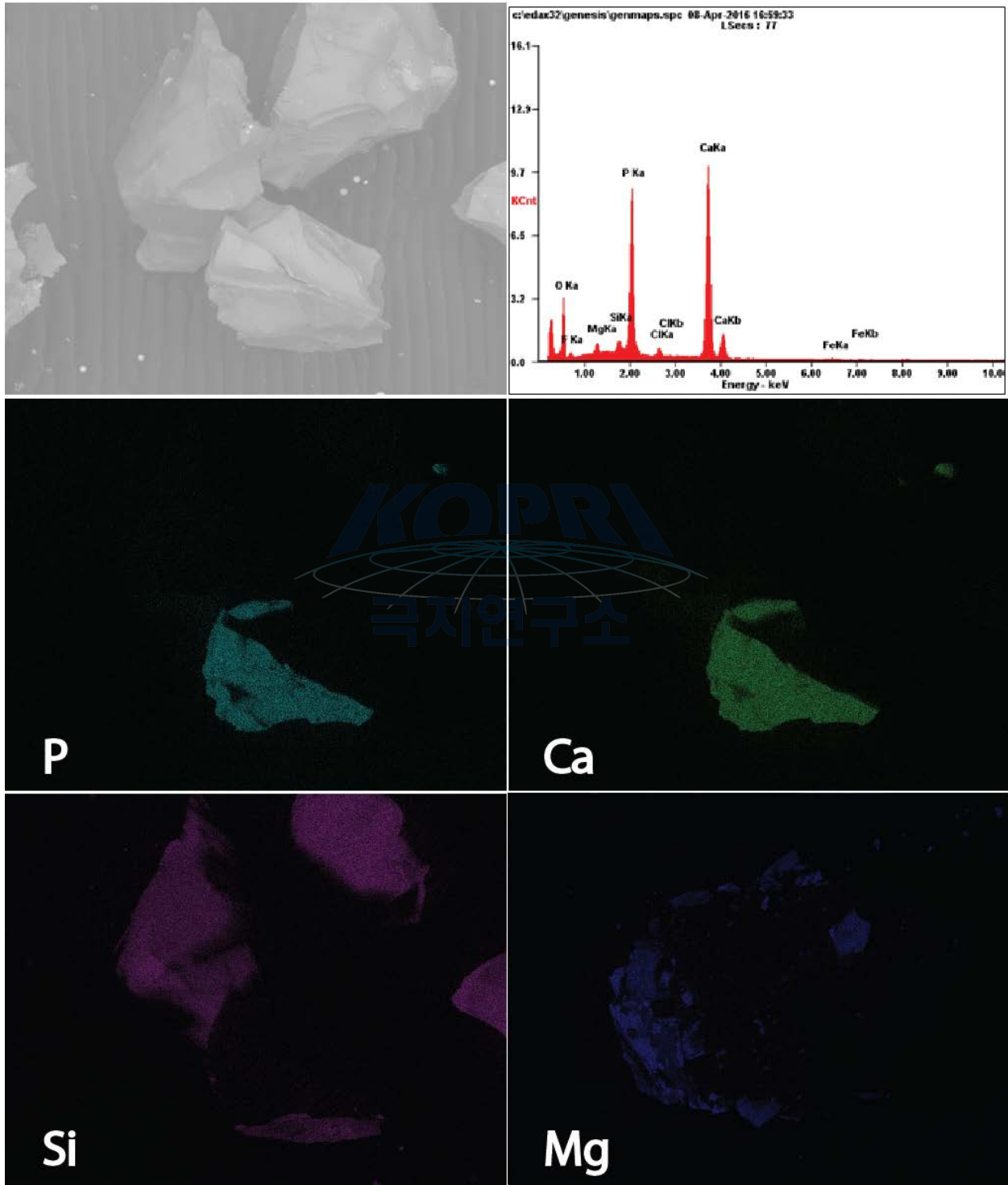
A11-1-one



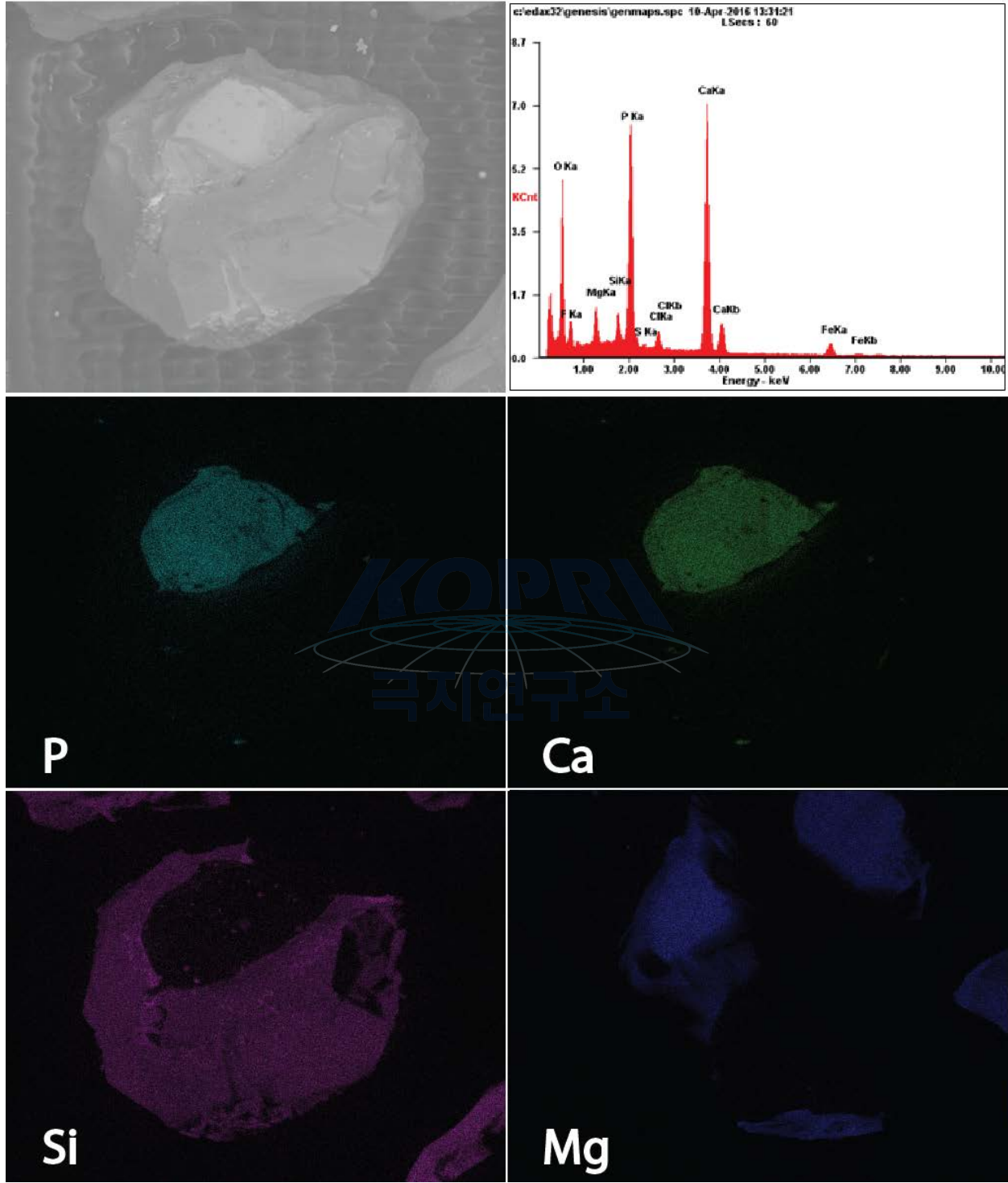
A11-3-one



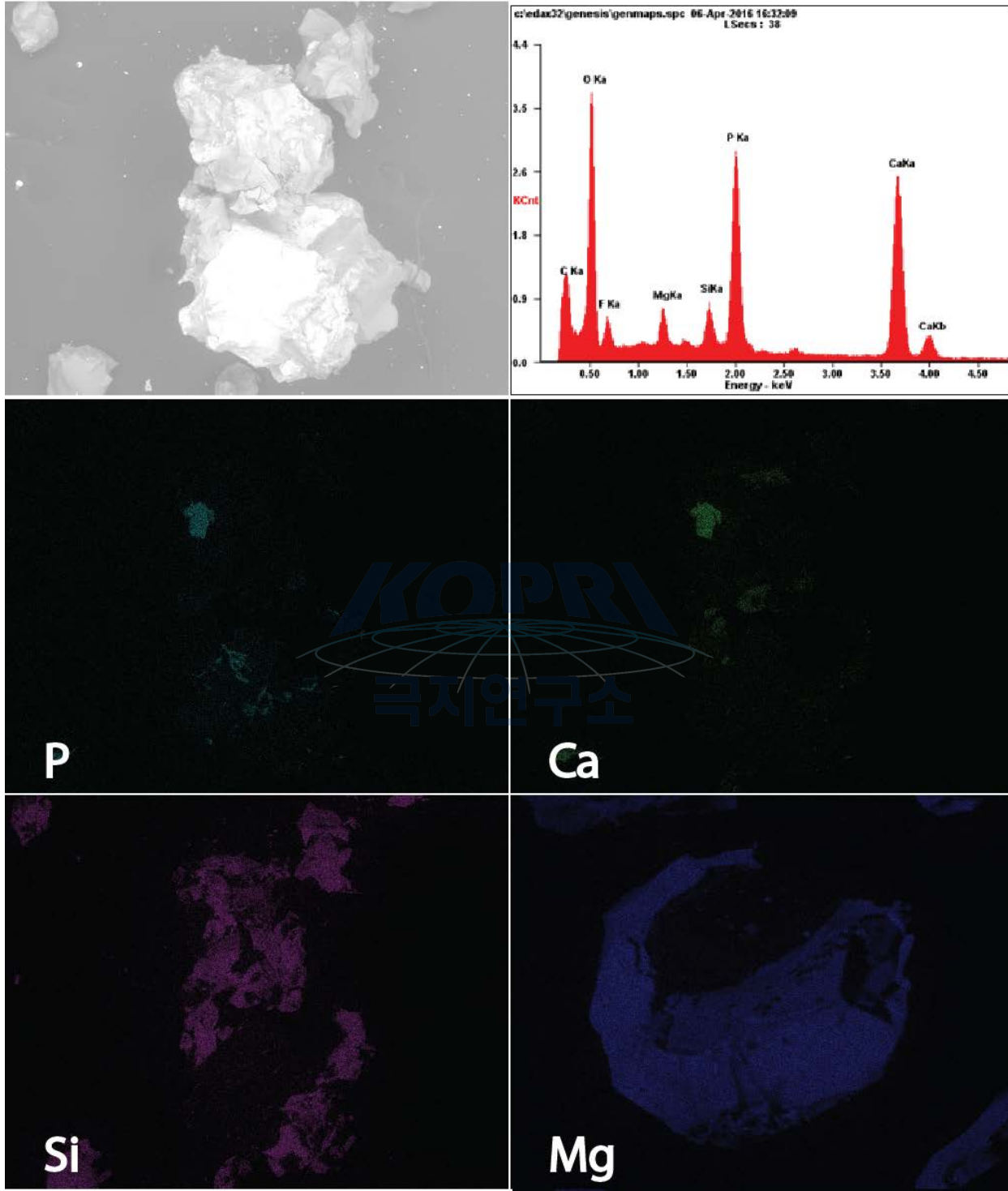
A11-5-one



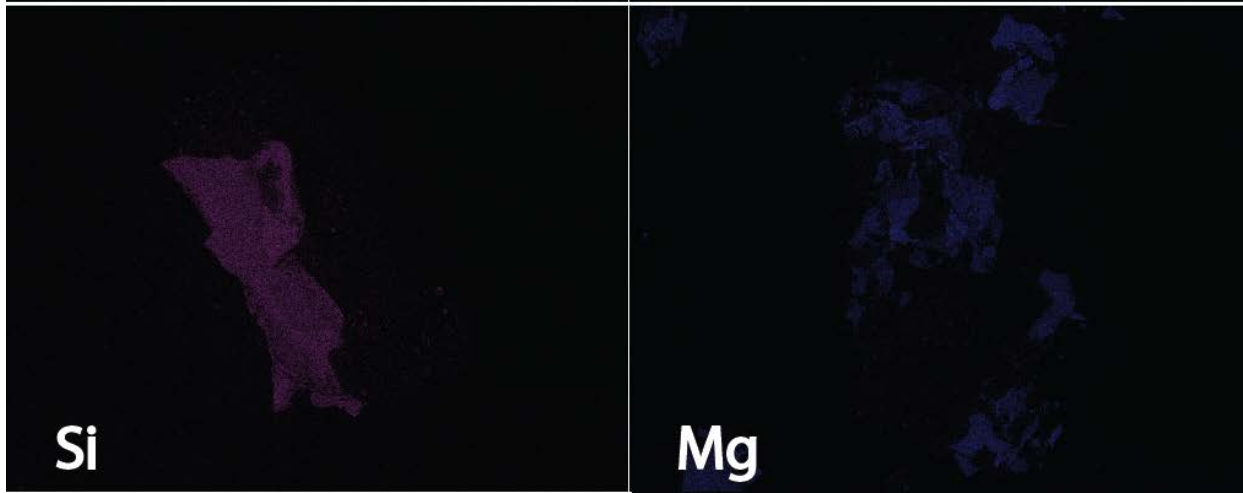
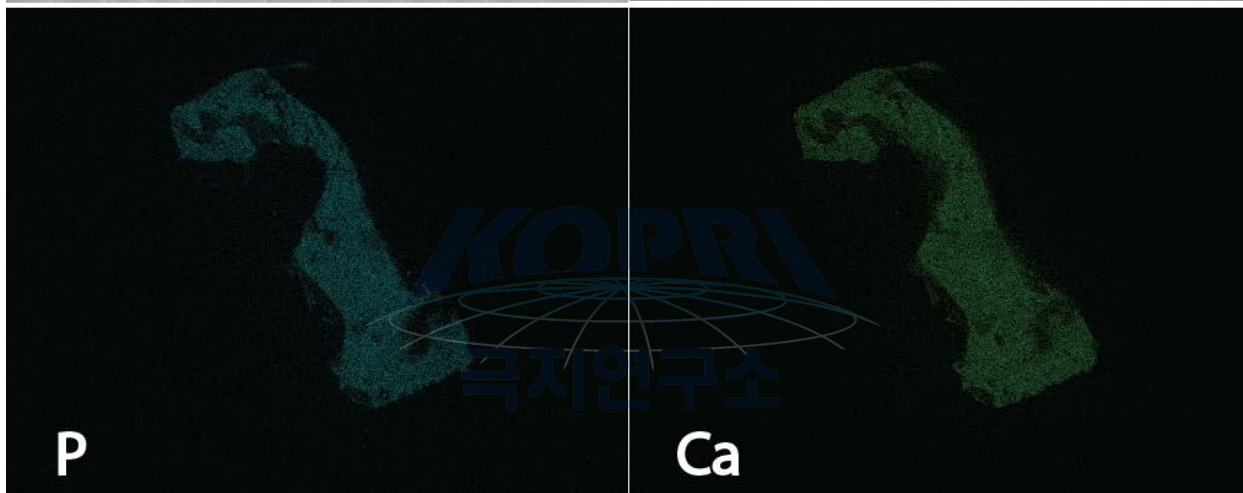
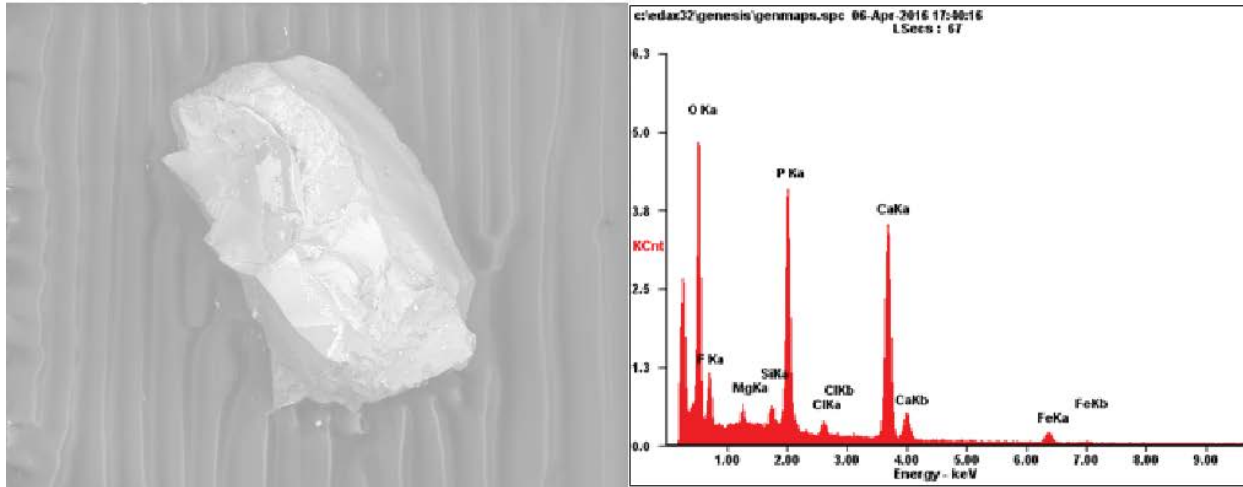
A11-6-one



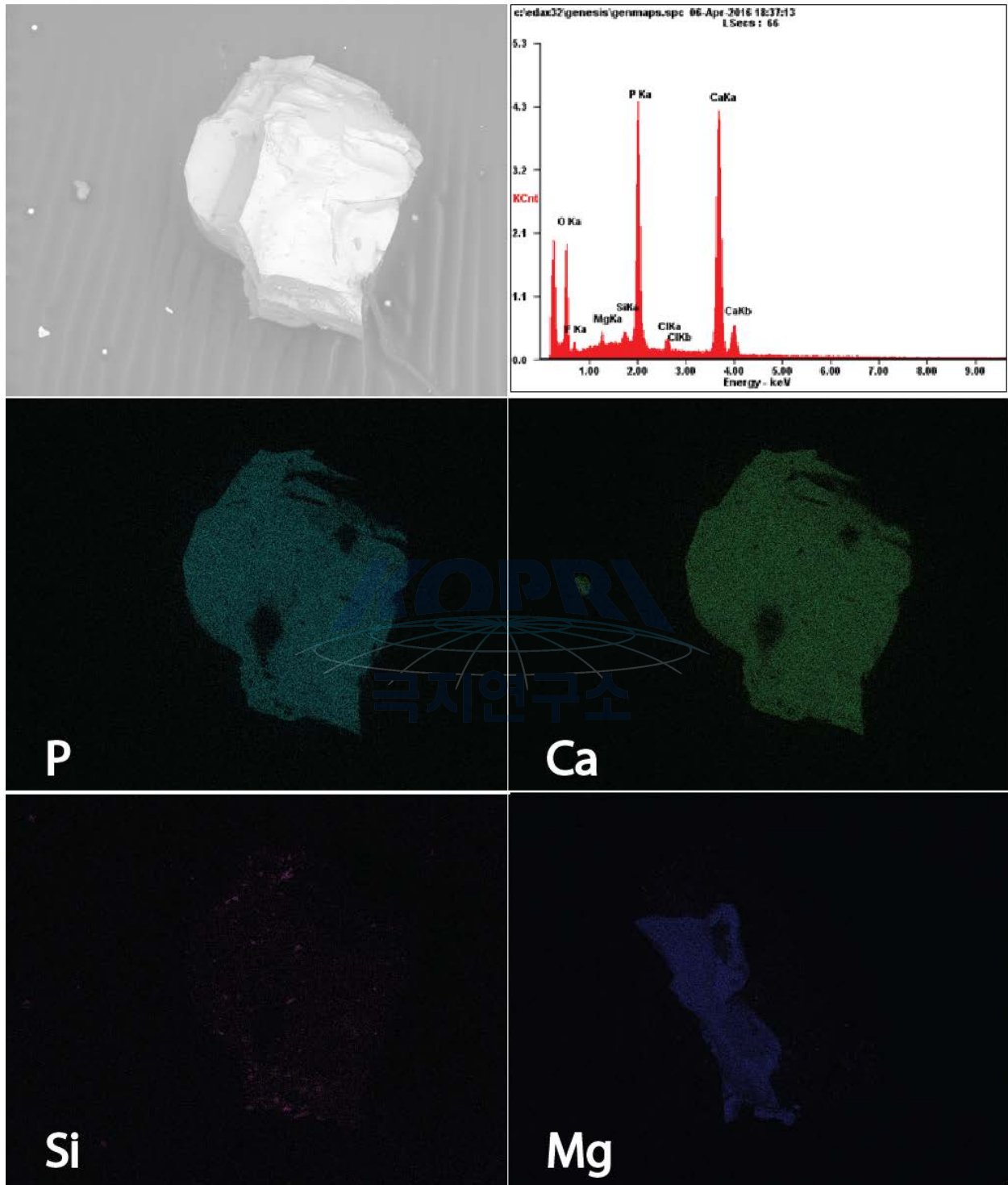
A12-1-one



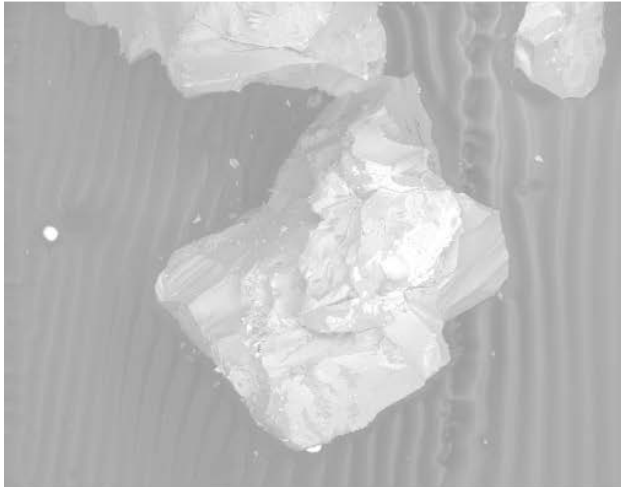
A12-1-two



A13-1-one



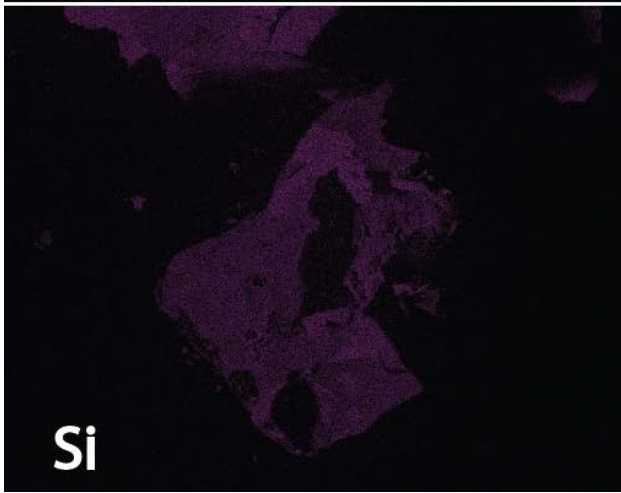
A13-1-two



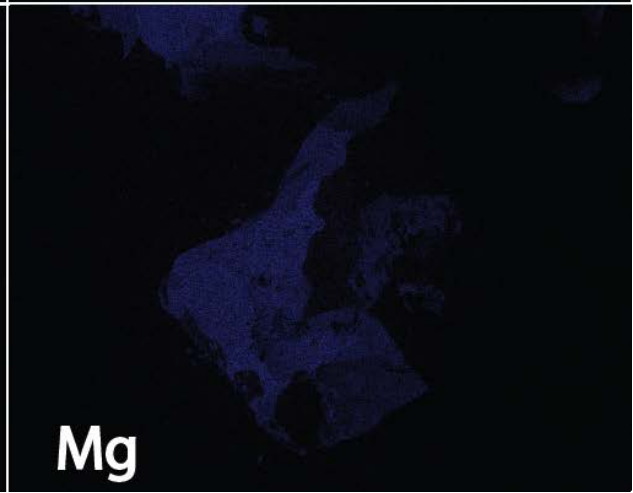
P



Ca

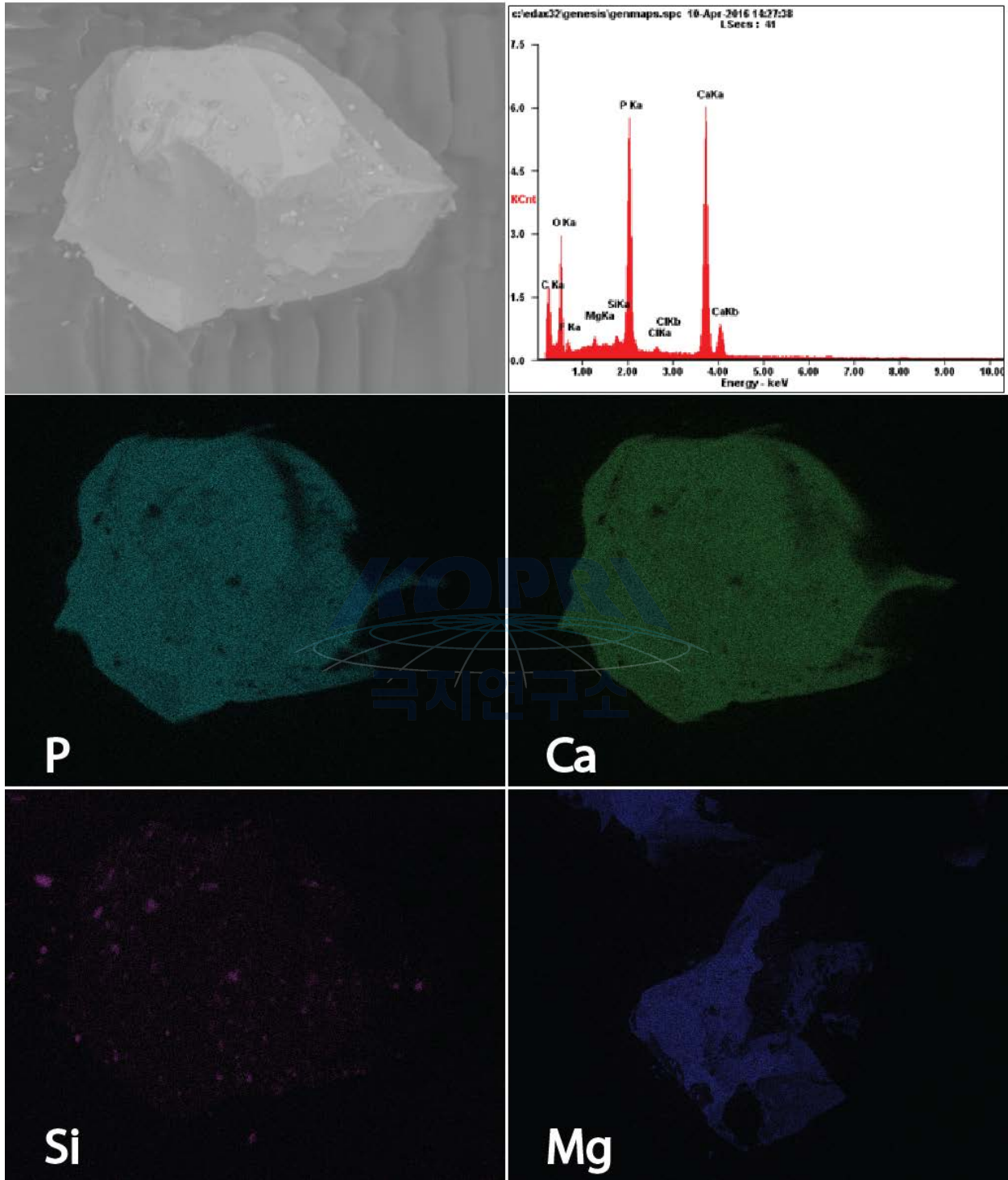


Si



Mg

A14-6-one



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.