



## Review

# 화성 표면 광물 탐사의 발전과 행성 환경 진화: 궤도 및 현장 탐사를 중심으로

이정은, 황희정\*

광주과학기술원 환경에너지공학과

## Martian mineral exploration: Insights from orbital spectroscopy and rover-based analyses

Grace Jung Eun Lee, Huijeong Hwang<sup>†</sup>

Department of Environment and Energy Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju 61005, Republic of Korea

Received: October 10, 2025 / Revised: November 22, 2025 / Accepted: November 24, 2025

\*Corresponding author: +82-62-715-2814 / E-mail: [huijeonghwang@gist.ac.kr](mailto:huijeonghwang@gist.ac.kr)

**요약:** 지난 반세기 동안 화성 탐사는 표면 광물 분석을 통해 화성의 고대 환경과 기후 변천사를 규명하는 데 결정적인 역할을 해왔다. 본 논평에서는 궤도 원격탐사와 착륙선·로버를 이용한 현장 탐사라는 두 가지 주요 탐사 방법을 중심으로 화성 표면의 광물학적 특성과 그 진화를 종합적으로 검토하고자 한다. 기존의 탐사들을 종합해보면, 화성 표면의 광물학적 진화는 필로시안(Phyllosian, 점토광물 우세)-테이키안(Theiikian, 황산염 우세)-시데리키안(Siderikian, 무수 산화철 우세)으로 이어지는 세단계의 광물학적 연대기로 정립될 수 있다. 이는 화성이 초기의 온난-습윤 환경에서 점차 산성-건조 환경으로 변화했음을 명확히 보여준다. 이러한 광물학적 연대기 정립은 화성의 물 순환, 대기 진화, 그리고 생명체 거주 가능성에 대한 근본적인 단서를 제공한다. 본 논평은 이러한 탐사 성과를 통합적으로 고찰하고, 여전히 남아 있는 주요 과학 난제를 조명한다. 나아가 향후 시료 귀환 임무와 현지자원활용을 위한 미래 광물 탐사의 중요성을 논의함으로써, 한국을 포함한 차세대 화성 광물 탐사의 방향 설정에 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

**주요어:** 화성 탐사, 화성 광물, 화성 궤도선, 화성 착륙선 및 로버, 실시간 화성 탐사

**ABSTRACT:** Over the past five decades, Mars exploration missions have fundamentally advanced our understanding of the Martian geological and climatic evolution through mineralogical investigations. Here, we provide the major findings from orbiter, lander, and rover to provide an integrated view of Martian surface mineralogy. Orbital spectroscopic analyses and rover-based measurements collectively establish a mineralogical chronology of Mars consisting of three sequential stages; Phyllosian (Phyllosilicate-dominated) - Theiikian (Sulfate-rich) - Siderikian (Anhydrous ferric oxide-dominated). This evolutionary sequence of Martian surface minerals indicates a long-term climatic transition from neutral aqueous to acidic dry environments, marking the progressive desiccation and oxidation of the Martian surface. Such mineralogical evidence provides crucial constraints on the hydrological cycle, atmospheric evolution, and potential habitability of Mars. Despite these findings about the Martian mineralogy, several key questions remain unresolved, including the duration and stability of early aqueous systems, the apparent paucity of extensive carbonate deposits, and the ambiguous origin of detected organic compounds on the Mars surface. Looking forward, upcoming sample-return missions and in-situ resource utilization programs are expected to resolve these long-standing issues by enabling high-precision laboratory analyses of Martian materials. Understanding the mineralogical record is therefore critical not only for constraining past climate and geochemical evolution of Mars but also for identifying potential resources to support future human exploration. Furthermore, this study discusses the importance of mineralogical exploration for future Mars missions, providing a fundamental scientific knowledge of Martian minerals for next-generation Mars exploration initiatives.

**Key words:** Mars exploration, Martian mineralogy, Mars orbiter, Mars lander and rover, in-situ investigation on Mars

## 1. 서론

화성 표면 광물에 대한 조사는 미국 항공 우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA)의 Mars Exploration Program (NASA, 2024) 및 MEPAG (Mars Exploration Program Analysis Group)가 설정한 장기 과학 목표의 핵심 요소이다. MEPAG Goals Document (Banfield *et al.*, 2018)에서는 생명, 기후, 지질, 유인탐사를 화성탐사의 4대 상위 목표로 정의하며, 이 중 지질·광물학적 분석을 화성 환경의 장기적 변천사를 규명하기 위한 필수적 연구 과제로 제시하였다. 특히 점토광물, 황산염, 산화철 등과 같은 변질·수화광물은 과거 물·암석 반응, 산성·중발 환경, 그리고 기후 변화 과정을 직접적으로 기록하고 있는 1차 지질 지표로 간주된다. 이러한 관점에서 표면 광물 탐사는 단순한 물질의 분류를 넘어, 미래 탐사 임무의 과학적 목표 설정과 우선순위를 결정하는 데 필수적인 정보를 제공해 왔다. 결과적으로 이러한 광물 탐사의 중요성은 화성 탐사의 지속성과 과학적 타당성을 뒷받침하는 주요 요인으로 평가된다.

1964년에 발사된 NASA의 *Mariner 4*호가 화성에 처음으로 도달한 이후로, 지난 반세기 동안 여러 차례의 화성 탐사 임무를 통해 화성 표면 광물의 존재, 상(phase), 그리고 분포에 대한 정보가 축적되어 왔다. 오늘날 차갑고 건조한 행성으로 알려진 화성은, 그 표면에 남겨진 광물 기록을 통해 과거에는 액체 상태의 물이 풍부했던 따뜻하고 습윤한 환경이었음을 시사한다. 화성 표면의 암석과 광물은 이러한 극적인 환경 변화를 이해할 수 있는 중요한 단서를 제공하며, 이는 화성의 형성과 진화, 기후 변화의 역사, 생명체 거주 가능성, 그리고 미래 탐사 전략 수립에 이르기까지 폭넓은 과학적 질문에 직접적인 통찰을 제공할 수 있다(그림 1).

NASA의 *Mariner 4* 임무는 최초로 화성 플라이바이(flyby)

에 성공하여 근접 촬영 사진을 획득함으로써 화성 탐사의 새로운 장을 열었다(Leighton *et al.*, 1965). 이어서 1971년 소련의 *Mars 2* 궤도선(orbiter)이 최초로 화성 궤도 진입에 성공하였으며, 1975년에 발사된 NASA의 *Viking 1*호는 화성 표면에 안착한 최초의 착륙선(lander)으로 화성의 토양 및 대기 분석을 수행하였다(Soffen and Snyder, 1976). 이후 1996년 *Mars Pathfinder* 임무에서는 최초의 로봇 탐사선(rovers) *Sojourner*가 화성 표면을 주행하며 지표 환경에 대한 현장 조사를 수행하였다.

21세기 들어 우주 탐사 기술의 발전은 곧 화성 과학의 심화로 이어졌다. *Mariner*와 *Viking* 임무의 영상 및 화학 분석이 화성 표면의 전반적인 특성을 밝혔다면, 유럽 우주국(European Space Agency, ESA)의 *Mars Express* (2003), NASA의 *Opportunity* (2003), *Mars Reconnaissance* (2005), *Curiosity* (2011), *InSight* (2018) 등은 고해상도 영상, 분광, X-선 분석 기법을 활용하여 성공적으로 화성의 지질 및 광물을 정밀하게 규명하였다. 2020년에는 아랍에미리트의 *Hope Orbiter*, 중국 *Tianwen-1* (궤도선, 착륙선, 로버), 미국 *Mars 2020* (*Perseverance* 로버와 *Ingenuity* 헬리콥터)이 화성 탐사에 참여하면서, 화성을 향한 국제적 관심과 연구가 꾸준히 이어지고 있음을 보여주었다(그림 2). 특히 *Perseverance* 로버의 샘플 채취 및 보관 임무는 향후 예정된 시료 귀환(Sample return) 프로그램으로 이어져, 화성 광물학 연구에 새로운 전기를 마련할 것으로 기대된다.

본 논평은 지금까지의 화성 탐사 성과를 종합하여 화성 표면의 광물에 대한 최신 이해를 제시하고자 한다. 이를 위해 화성 탐사 기법을 궤도 원격 탐사와 착륙선·로버에 의한 현장 탐사로 구분하고, 이 두 접근법이 축적해 온 화성광물에 대한 주요 성과가 어떻게 상호 보완적으로 발전해 왔는

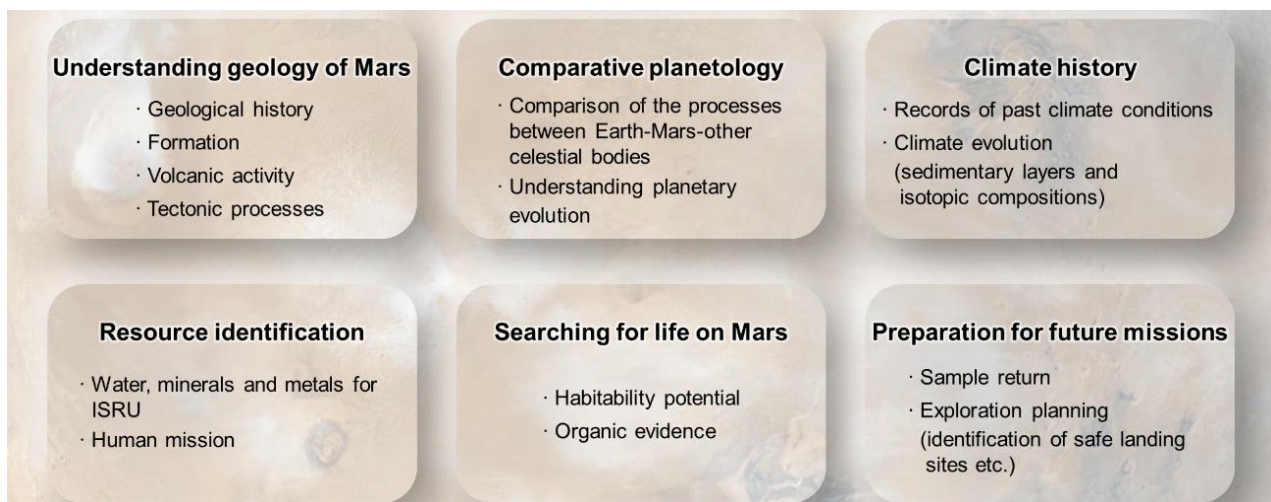


Fig. 1. Major scientific objectives of Mars rocks and minerals exploration. (Image credit: NASA/JPL/MSSS).

지를 검토한다. 최종적으로 이러한 광물학적 증거들을 통합하여, 화성의 물 순환과 기후 변천에 대한 거시적인 틀을 체계적으로 정리하고자 한다.

## 2. 화성 표면 광물 분석 방법론의 발전

지난 반세기 동안 화성 탐사는 기술적 진보에 힘입어 원격 관측에서 현장 분석, 나아가 근미래에는 시료 귀환으로 이어지는 연구체계를 구축하였다. 이러한 흐름 속에서 화성 탐사 방법은 크게 플라이바이, 궤도선, 착륙선, 로버로 구분되며, 각각은 데이터의 해상도, 공간 범위, 분석 정밀도 측면에서 상호 보완적인 역할을 수행하고 있다. 초기의 플라이바이 탐사는 화성에 대한 최초의 영상과 대기 및 지형 정보를 제공함으로써 향후 궤도선 및 착륙선 탐사의 토대를 마련하였다. 궤도선은 화성 주변 궤도에 장기간 체류하며 전 행성적 스케일에서 표면 및 대기 변화를 추적할 수 있어, 화성의 광역적인 지질학·기후학적 맥락을 제시하였다. 착륙선은 궤도선에서 얻어진 정보를 바탕으로 과학적으로 의미있는 특정 지점에 직접 착륙하여 토양과 암석에 대한 화학적·광물학적 조사를 수행하였으며, 이는 화성의 고유한 지질학적 특성을 규명하는데 중요한 전환점이 되었다. 이동성을 가진 로버는 화성의 다양한 지형을 탐사할 수 있었으며, 현장 분석과 원격 관측을 연결하는 매개체로서 화성의 수화광물, 유기분자, 잠재적 생명 흔적 탐지에 결정적인 기여를 하였다.

### 2.1. 전 행성 규모에서의 궤도 원격 탐사

화성 궤도 원격 탐사는 행성 전역을 대상으로 한 광역적

탐사 기법으로, 착륙선이나 로버가 가지는 국지적 한계를 보완하며, 화성의 지질·기후학적 특성을 총체적으로 규명하는 데 기여해왔다. 특히 가시광선(Visible, 350-780 nm)-근적외선(Near-Infrared, NIR, 780-2,500 nm) 영역의 분광 자료는 지상 표준 데이터와의 비교를 통해 점토광물, 탄산염, 황산염 등 주요 광물의 존재를 규명하였으며, 이는 고대 화성의 수환경과 변성·퇴적 과정을 복원하는데 중요한 단서를 제공하였다(Mustard *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2021). 또한 화성 궤도 관측은 표면 및 대기 영상화, 지형 분석, 열적 특성 및 태양풍-대기 상호작용 모니터링 등 다각도의 과학적 목표달성에도 기여하였다(Calvin *et al.*, 2021). 이러한 성과는 궁극적으로 화성의 광물학적 진화와 수환경의 흔적을 밝힘과 동시에, 향후 착륙선 및 로버 임무의 탐사 후보지 선정에도 과학적·공학적인 기반을 제공하였다.

#### 2.1.1. 저해상도 영상 및 분광 관측 - Mariner 임무

화성 원격 탐사의 출발점은 1964년 *Mariner 4* 임무였다. 이 플라이바이 탐사선은 22장의 화성 표면 영상을 지구로 전송하였으며, 약 3 km 해상도의 가시광선 영상에서 달과 유사한 충돌구 지형을 확인하였다(Leighton *et al.*, 1965). 이를 통해 화성의 지표가 지질학적으로 오래되었으며, 대규모 판구조 운동이나 해수에 의한 재가공이 거의 없었음을 추론할 수 있었다. 1971년에 발사된 *Mariner 9*는 최초로 화성 궤도에 진입한 탐사선으로, 화산, 협곡, 건천 등 대규모 지형 구조의 고해상도 영상 자료를 확보하였다. 탑재된 자외선 분광기(Ultraviolet Spectrometer, UVS)와 적외선 방사계(Infrared radiometer, IRR)는 화성 대기·표면의 산란과 열복사 특성을 규명하며, 지형 고도 추정, 먼지의 열

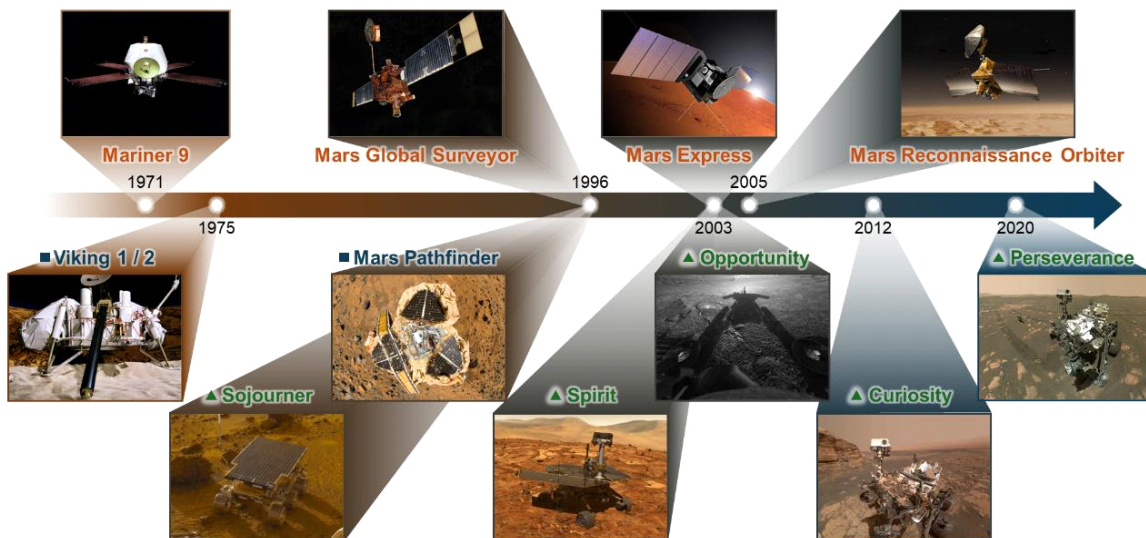


Fig. 2. Timeline of Mars spacecraft launches with representative images of orbiters (above the timeline), lander (■), and rover (▲) (bottom of the timeline). (Image credit: NASA, NASA/JPL-Caltech, NASA/JPL-Caltech/University of Arizona).

적 영향, 극지역의 수증기 존재를 제시하였다(Chase *et al.*, 1972; Hord *et al.*, 1972). 또한 적외선 간섭 분광기(Infrared Interferometer Spectrometer, IRIS)는 5-50  $\mu\text{m}$  파장에서 스펙트럼을 수집하여, 화성 대기의 주요 성분이 이산화탄소( $\text{CO}_2$ )임을 확인하고, 표면이  $\text{SiO}_2$ 가 풍부한 먼지로 피복되어 있음을 보여주었다(Hanel *et al.*, 1972a). IRIS와 IRR의 스펙트럼은 적철석(Hematite,  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), 마그헤마이트(Maghemite,  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ), 침철석(Goethite,  $\text{FeO}(\text{OH})$ ) 등  $\text{Fe}^{3+}$  산화물의 분광 특성과 일치하여, 화성 표면에 산화철이 풍부하게 존재함을 지시하였다(Singer, 1982). 화성 표면의 풍부한 산화철의 존재는 화성을 ‘붉은 행성’으로 규정짓는 과학적 근거를 마련하였다(Hanel *et al.*, 1972b).

그러나 *Mariner*의 영상 및 제한적 분광 자료는 화성 표면의 광물 조성을 규명하기에는 공간 해상도와 파장 범위 측면에서 근본적인 한계를 가졌다. 특히 지구에서 수행되는 광물 분석(SEM-EDS, XRD, EPMA 등)과 달리 원격 영상만으로는 광물의 특징적인 흡수대나 미세 구성 성분을 해석할 수 없었다. 이러한 한계는 행성 규모에서 광물학적 정보를 정량적으로 파악해야 한다는 필요성을 부각시켰으며, 이에 따라 향상된 열방출 분광 능력을 갖춘 *Mars Global Surveyor (MGS)*가 후속 임무로 도입되었다.

### 2.1.2. 중해상도 분광 매핑 - *Mars Global Surveyor*와 *Mars Express*

2000년대 이전의 궤도 탐사에서 수행된 VNIR (Visible and Near-Infrared) 반사 스펙트럼 측정은 수십 ~ 백 km 규모의 공간 해상도 한계로 인해 국지적인 광물 분포의 정밀 규명에는 어려움이 있었다. 이러한 제약을 극복하기 위해 1996년에 발사된 *MGS*는 Thermal Emission Spectrometer (TES)를 탑재하여 중해상도(약  $3 \times 6$  km)의 열방출 분광 자료를 확보하였다(Christensen *et al.*, 2001). TES 관측은 규산염과 철 산화물의 분포를 체계적으로 구분하고, 적도 지역의 현무암질 지표와 고위도 지역의 풍화 규산염 먼지를 식별하였다(Bandfield *et al.*, 2000). 또한 특정 지역에서 결정질 적철석의 스펙트럼을 검출하여 과거 물의 존재 흔적을 제시하였으며(Christensen *et al.*, 2000), 25  $\mu\text{m}$  부근의 흡수 분광 특성을 통해 극관의  $\text{H}_2\text{O}$  얼음과  $\text{CO}_2$  얼음을 구분함으로써 화성의 수권 연구를 한층 정밀하게 발전시켰다(Kieffer *et al.*, 2000). 이와 더불어 열적 관성 자료를 활용하여 표면 퇴적물의 입도와 결합 상태를 평가하였으며(Mellon *et al.*, 2000), 더불어 함께 탑재된 Mars Orbital Camera (MOC)는 수 m의 공간 해상도 영상을 제공함으로써 분광분석과 지형학적 맥락을 연결하고, 표면 과정의 상세한 지질학적 증거를 제시하는데 기여하였다(Malin and Edgett, 2001). 또한 TES의 열적 관성 자료는 표면 퇴적물의 입도와 결합

상태를 평가하는 데 기여하였다(Mellon *et al.*, 2000).

그러나 TES 역시 수 km 단위의 공간 분해능의 한계로 인해 *MGS* 임무에서는 점토광물과 같은 수화광물의 분포를 정밀하게 밝히는 데에는 어려움이 있었다. 지구 실험실과 달리 화성에서는 시료를 직접 채취하여 층서별로 분리·분석할 수 없기 때문에 점토광물 및 황산염 등과 같은 핵심 광물의 식별에는 더 높은 공간 분해능과 넓은 파장대의 VNIR 분광 자료가 요구되었다. 이러한 분석적 필요성에 따라, ESA는 2003년에 *Mars Express (MEx)*에 최대 약 350 m 해상도로 국지적 지역을 정밀 관측할 수 있으며, 0.35-5.1  $\mu\text{m}$  파장대를 포괄하여 OH- 및  $\text{H}_2\text{O}$  흡수 밴드를 정밀 탐지할 수 있는 핵심장비인 OMEGA (Visible and Infrared Mineralogical Mapping Spectrometer)를 탑재하여 발사하였다(Bibring *et al.*, 2004). 이 임무는 화성의 지질학적 진화, 수권, 대기, 지하 구조를 통합적으로 규명하는 것을 목표로 하였으며(Chicarro *et al.*, 2004), 이를 위해 OMEGA를 포함한 총 8개의 과학 장비가 탑재되었다. OMEGA는 전 행성적 규모에서 1.5-5 km의 해상도로 화성 표면의 약 90%를 매핑하는 동시에 특정 지역은 수백 m 수준으로 정밀 관측하였다(Bibring *et al.*, 2006). 그 결과 휘석(Pyroxene,  $(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$ )은 전 행성적으로 분포하고 감람석(Olivine,  $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ )은 특정 지역에 국지적으로 분포하는 것이 확인되었다(Mustard *et al.*, 2005). 이는 화성이 초기에는 장기간의 온난하고 습한 환경이었다가 이후 산성-건조한 환경으로 전환되었음을 시사한다. 또한 고대 노아기안(Noachian, 4.1-3.7 Ga) 지형에서는 Fe/Mg-스멕타이트(논트로나이트(Nontronite,  $(\text{Na}, \text{Ca}_{0.5})_{0.3}\text{Fe}^{3+}_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ), 사포나이트(Saponite,  $\text{Ca}_{0.25}(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ))와 고령석(Kaolinite,  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), 헤스페리안(Hesperian, 3.7-3.0 Ga) 지형에서는 황산염(Sulfates) 광물, 아마조니안(Amazonian, 3.0 Ga-현재) 지형에서는 무수 산화철(Anhydrous ferric oxides)이 우세하게 분포함이 밝혀졌다(Poulet *et al.*, 2005; Bibring *et al.*, 2006). 이러한 광물 자료를 토대로 하여 화성의 지질학적 변화를 세 가지 주요 시대(필로시안(Phyllosian, 점토광물 형성) → 테이키안(Theiikian, 황산염 형성) → 시데리키안(Siderikian, 무수 산화철 지배))로 구분하는 것이 제안되었다(그림 3) (Bibring *et al.*, 2006).

### 2.1.3. 고해상도 정밀 분광 탐사 - *Mars Reconnaissance Orbiter (MRO)*

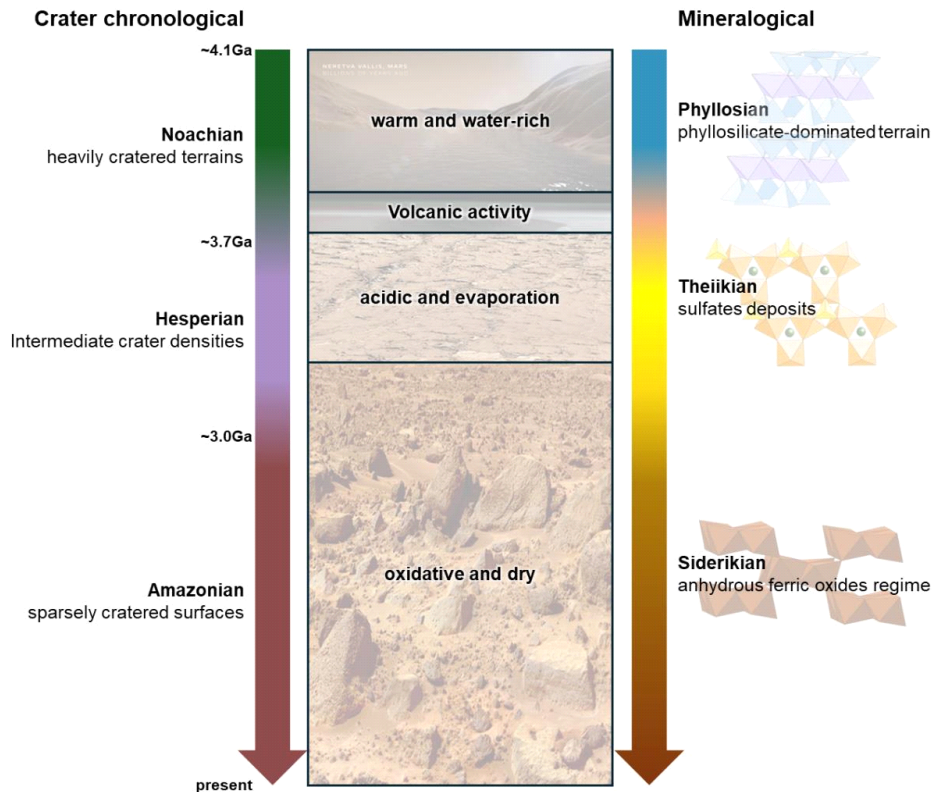
*MGS*와 *MEx*는 각각 TES와 OMEGA를 통해 화성 전역의 광물학적 지도를 구축하였으나 수백 m급 공간 해상도로는 유체 이동 경로, 미세한 변질 정도의 차이 등과 같은 광물 분포의 세밀한 변화를 해석하는 데에는 한계가 있었다. 지구에서 수행되는 야외 지질조사나 박편 단위의 층서

관찰에 비해 OMEGA 자료는 세부 지질 맥락 이해에 필수적인 공간 분해능을 제공하지 못하였다. 이를 극복하기 위해 NASA는 2005년 *MRO*를 발사하였으며, 0.36-3.9  $\mu\text{m}$  범위의 가시광선-근적외선(VNIR) 분광기인 CRISM (Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars)를 탑재하였다. CRISM은 화성 표면을 최대 18 m 해상도로 관측할 수 있었으며(Murchie *et al.*, 2007), 이는 이전 임무 대비 수십 배 향상된 고정밀 분광 지도 제작을 가능하게 하였다. 특히 CRISM은 OH- 및 H<sub>2</sub>O 관련 흡수 밴드를 활용하여 화성 전역에서 수백 개 이상의 점토광물 산지를 추가로 확인하였으며, 그 결과 OMEGA가 전 행성적 규모에서 확인한 층상규산염 광물의 분포를 정밀하게 보완하였다. 특히 Fe/Mg-스펙타이트, 녹니석(Chlorite, (Mg,Fe)<sub>3</sub>(Si,Al)<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>·(Mg,Fe)<sub>3</sub>(OH)<sub>6</sub>), 사문석(Serpentine, Mg<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)), 몬모릴로나이트(Montmorillonite, (Na,Ca)<sub>0.33</sub>(Al,Mg)<sub>2</sub>Si<sub>4</sub>O<sub>10</sub>(OH)·nH<sub>2</sub>O), 고령석 등 다양한 점토광물이 구체적으로 식별되었고(Bishop *et al.*, 2008), 이는 OMEGA가 제시한 필로시안 시대의 수환경이 실제로 다양한 점토광물이 층상 퇴적지에 공존함이 확인되면서 정밀하게 입증되었다(Bibring *et al.*,

2006; Bishop *et al.*, 2008; Carter *et al.*, 2013). 또한, 단백질(Opal, SiO<sub>2</sub>·nH<sub>2</sub>O), 비석(Zeolite), 황산염, 탄산염(Carbonates), 염화물(Cl salts) 등의 점토광물과 함께 산출되는 부수 광물(Associated minerals)도 규명하였다(Carter *et al.*, 2013). 나아가 CRISM은 *MRO*에 함께 탑재된 HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment) 및 CTX (Context Camera)와 같은 고해상도 영상 자료와 결합되어 특정 광물이 포함된 지층의 층서학적·지형학적 맥락을 해석하는 데 활용되었다(Murchie *et al.*, 2009; Ehlmann *et al.*, 2011).

### 2.2. 착륙선 및 로버를 이용한 현장 광물 탐사

궤도 원격 탐사가 분광 스펙트럼을 기반으로 화성 전역에 대한 광역적 정보를 제공한다면, 착륙선과 로버 탐사는 특정 지점에서의 현장 분석(*In-situ analysis*)을 수행하여 직접적인 시료 분석과 고해상도 관측 자료를 제공한다. 초기에 수행된 화성 현장 광물 탐사는 착륙선에 탑재된 장비를 이용해 표면 토양의 화학적 조성을 분석하는 수준에 머물렀다. 그러나 탐사 기술이 발전함에 따라 화성 광물학 연구는 비약적인 발전을 이루어 정밀한 광물 동정 및 미시적



**Fig. 3.** Comparison between the traditional crater chronology (left) and the mineralogical timescale (right) of Mars. The crater chronology is based on crater size-frequency distributions (Hartmann and Neukum, 2001), whereas the mineralogical timescale was proposed by Bibring *et al.* (2006), highlighting the transition from the phyllosilicate-dominated (Phyllosian) to sulfate-rich (Theiikian) and ferric oxide-dominated (Siderikian) stages. (Image credits: NASA, NASA/JPL-Caltech/ASU, NASA/JPL-Caltech/MSSS/IRAP, NASA/JPL).

수준에서의 성분 분석이 가능해졌으며, 이를 통해 궤도선이 측정한 원격 탐사 결과를 검증하고 확장시킬 수 있게 되었다. 더 나아가 화성의 고대 수환경, 퇴적 환경, 잠재적 생명체 거주 가능성에 대한 이해를 획기적으로 진전시켰으며, 향후 시료 귀환(Mars Sample Return, MSR) 임무의 기반을 마련하였다.

### 2.2.1. 현장 검증의 시작 - *Viking* 착륙선

*Mariner 9*의 궤도 관측을 통해 화성 표면이 규산염과 산화철이 풍부한 붉은 행성이라는 가설이 제기되었는데, 이러한 초기 가설은 1975년 NASA의 *Viking 1*과 *Viking 2* 착륙선이 수행한 최초의 화성 현장 화학 분석을 통해 구체적으로 검증되기 시작하였다. 착륙선에는 가시광선 카메라, X-선 형광분석기(X-ray Fluorescence spectrometer, XRF), 그리고 가스 크로마토그래피-질량분석기(Gas Chromatograph-Mass Spectrometer, GC-MS)가 탑재되어 있었다(Soffen and Snyder, 1976). 가시광선 카메라는 토양 입자의 형태와 표면 구조를 기록하였으며, XRF는 화성 토양 내의 주요 원소 조성을 규명하였다. 분석 결과, 토양은 규산염 성분이 우세하며 Fe, Mg, Ca, Ti 등이 유의미한 수준으로 존재하는 반면, K, Na 등의 알칼리 원소는 지구 평균에 비해 현저히 결핍된 것으로 나타났다(Clark *et al.*, 1976). 이는 화성 토양이 단순한 풍화 잔재물이 아니라 규산염, 황산염, 산화철 등이 혼합된 복합체임을 보여주었다(Baird *et al.*, 1977). 이후 Toulmin III *et al.* (1977)은 *Viking 1*과 2의 데이터를 종합하여 화성 토양의 지구화학적 모델을 제시하였고, 특히 황산염이 시멘트 역할을 하여 형성된 duricrust의 존재는 제한적이거나 마수분이 토양 화학 과정에 관여했음을 시사하였으며, 규산염 성분은 현무암질 기원일 가능성이 높다는 해석을 제시하였다. 한편 GC-MS는 ppb 수준의 민감도를 가졌음에도 불구하고 휘발성 유기 화합물을 전혀 발견하지 못하였는데(Bieman *et al.*, 1977), 이는 토양이 강한 산화 환경에 놓여 있음을 의미하였다(Klein, 1978). 종합하면 *Viking* 착륙선의 분석 결과는 화성 표면이 규산염, 황산염, 산화철의 복합체로 구성되어 있으며, 동시에 강산화적 환경과 부분적인 수분 작용의 영향을 받았음을 보여주었다. 이는 이후 착륙선과 로버의 탐사에서 화성 토양과 암석의 광물학적·화학적 연구를 수행하는 데 중요한 기준점이 되었다.

다만 *Viking* 착륙선의 분석은 고정된 지점에서의 원소 조성 확인에 국한되었으며, 광물 상 동정이나 결정 구조 분석과 같이 지구 실험실 수준의 정밀 분석은 불가능하였다. 또한, 이동성이 없어 지질학적 이질성이 큰 지역을 분석할 수 없었다. 이러한 분석적 제약은 이동형 탐사선을 이용한 현장 광물 탐사의 필요성을 부각시켰으며 *Sojourner* 로버의 도입으로 이어졌다.

### 2.2.2. 원소 조성 분석 - *Pathfinder*와 *Sojourner*

*Viking* 이후 약 20년 만인 1996년 NASA는 *Mars Pathfinder* 임무를 통해 화성 현장 탐사에 다시 도전하였다. 이 임무는 착륙선과 더불어 최초의 소형 로버 *Sojourner*를 투입하여 로버가 직접 이동하면서 화성 지표의 암석과 토양을 조사할 수 있는 새로운 탐사 시대를 열었다. *Pathfinder* 착륙선은 고정된 위치에서 대기와 기상 조건을 관측하는 반면, *Sojourner*는 인근 암석과 토양을 현장에서 분석하여 궤도 관측에서 제시된 화성 표면 조성을 직접 검증할 수 있었다.

*Sojourner*는 APXS (Alpha Proton X-ray Spectrometer), 3대의 카메라, 대기 구조 측정 장비를 탑재하여 암석과 토양의 화학 조성을 정밀하게 분석하였다. 착륙지인 Ares Vallis는 범람원 지형으로 다양한 기원의 암석과 퇴적물이 분포하는 지역이었으며, 이는 과거 수환경의 흔적을 조사하기에 적합한 장소였다. APXS 분석 결과, 착륙 지점 내의 6개의 토양 시료의 조성은 큰 변화를 보이지 않고 균질한 특성을 나타내었다. 전체적인 조성은 *Viking* 착륙선이 분석한 토양과 유사하게 규산염이 우세하고 Fe, Mg, Ca, Al, Ti 등이 주요 원소로 검출되었다. 그러나 보다 정밀한 비교에서 *Pathfinder* 토양은 *Viking* 토양에 비해 염소(Cl)가 상대적으로 높고, 규소(Si)와 황(S)은 상대적으로 낮게 보고되었다(Wänke *et al.*, 2001). 또한 *Pathfinder* 토양은 *Viking* 토양과 달리 Ti와 Fe 사이에 뚜렷한 상관관계가 나타나지 않았으며, 이는 단순한 현무암 풍화 산물 이상의 복합적 광물 혼합체임을 시사하였다. 또한, 분광 및 자기적 특성 분석 결과, 토양과 대기 중 먼지는 비정질 혹은 나노 크기의 무수 산화철이 주요 성분으로 확인되었으며, 이는 화성 토양의 붉은 색과 강한 산화 환경을 설명하는 핵심 요인으로 제시되었다(Bell III *et al.*, 2000). 결과적으로 *Pathfinder*와 *Sojourner*는 원소 조성 수준에서 화성의 환경 진화를 탐구할 수 있음을 입증하였다. 그러나 APXS 중심의 분석은 광물 상 동정이나 산화 상태의 세부 구분, 변질·수화광물의 파악과 같은 정밀 광물학적 해석에는 제약이 있었다. 지구에서 수행되는 Raman, Mössbauer, XRD 분석과 달리 이러한 기술적 제약은 화성 광물 이해에 공백을 남겼다. 이에 따라 이후에 착륙한 *Spirit*과 *Opportunity*에 Mössbauer 분광기와 Mini-TEs를 탑재하여 철 산화물과 황산염의 산화 및 결정학적 정보를 제공할 수 있도록 하였다(Squyres *et al.*, 2004).

### 2.2.3. X-선 회절 분석 - *Curiosity*

보다 정확한 광물 탐사를 위하여 화성 표면 토양의 X-선 회절 측정 수행의 필요성이 촉발되었으며, 이에 따라 NASA는 2012년 Mars Science Laboratory (MSL) 임무를 통해 화성 광물 탐사의 새로운 장을 열었다. 게일 충돌구(Gale Crater)

에 착륙한 *Curiosity* (MSL rover)는 MAHLI (Mars Hand Lens Imager) 등의 카메라와 APXS, ChemCam (Chemistry & Camera), CheMin (Chemistry & Mineralogy X-ray Diffraction) 등의 분석기, 그리고 RAD (Radiation Assessment Detector), DAN (Dynamic Albedo of Neutrons) 등의 환경 센서를 탑재하여 현장 탐사를 수행하였다(Blake *et al.*, 2012; Edgett *et al.*, 2012). 특히 MAHLI는 수  $\mu\text{m}$  규모의 접사 영상을 제공하여 시료의 미세 조직과 텍스처를 문맥화하였으며, 이는 CheMin 분석 전·후의 상태를 판독하는 데 기여하였다. CheMin은 Co K $\alpha$ 선을 사용하는 소형 X-선 회절기로, 시료 셀을 진동시켜 입자의 정렬을 최소화한 뒤 2차원 검출과 리트벤트 정련법을 통해 결정질 광물의 정성·정량 분석 및 비정질 분을 추정을 가능하게 하였다(Blake *et al.*, 2012, 2024). 이는 화성 탐사에서 최초로 현장에서 직접 X-선 회절을 통해 결정 구조를 규명할 수 있게 한 장비였다. *Curiosity*는 Rocknest 풍정토를 CheMin에 투입하여 화성에서 최초의 XRD 결과를 얻었다(그림 4). 분석 결과, 토양은 주로 안데신(Andesine, (Na,Ca)(Si,Al) $_4$ O $_8$ ), 포스테라이트(Forsterite, Mg $_2$ SiO $_4$ ), 보통휘석(Augite, (Ca,Na)(Mg,Fe,Al,Ti)(Si,Al) $_2$ O $_6$ )으로 구성되었으며, 자철석(Magnetite, Fe $_3$ O $_4$ ), 석영(Quartz, SiO $_2$ ) 등 소량의 부성분이 확인되었다. 또한, 전체 시료 중 상당 비율(약 30~40 wt%)이 비정질 성분임이 보고되었다(Bish *et al.*, 2013).

이후 Yellowknife Bay 지역에서 채취한 John Klein 및 Cumberland 이암(mudstone) 시료 분석에서는 삼팔면체형 스멕타이트(Smectite)가 수십 wt% 수준으로 검출되었으며, Ca-황산염(바사나이트(Bassanite, 2CaSO $_4$ ·H $_2$ O), 무수석고(Anhydrite, CaSO $_4$ )), 자철석, 황화철(Pyrite, FeS $_2$ ) 및 비정질 물질이 공존하는 것으로 확인되었다(Vaniman *et al.*, 2014).

특히 스멕타이트는 시료 간 층간수 함량에 차이를 보이기 때문에 고대의 저온·저에너지 수환경에서 퇴적 및 변질이 이루어졌음을 시사하였다. 또한 황산염 광물은 석고(Gypsum, CaSO $_4$ ·2H $_2$ O)-바사나이트-무수석고로 이어지는 가역적 수화·탈수 고리를 기록하고 있었으며(Rapin *et al.*, 2016; Vaniman *et al.*, 2018), 이는 과거 화성의 수리·기후 동역학을 이해하는데 중요한 단서를 제공하였다. 최근에는 MAHLI와 Mastcam을 통해 순수한 원소 황 결정이 화성 암석 내에서 최초로 확인되었으며(NASA/JPL, 2024; <https://www.nasa.gov/missions/mars-science-laboratory/curiosity-rover/nasas-curiosity-rover-discovers-a-surprise-in-a-martian-rock/> (July 18, 2024)), 이는 황산염 및 철 산화 광물과 결합하여 복잡한 유체-광물 진화 과정을 보여주는 새로운 사례로 평가된다.

### 2.2.4. 최신 다중분광 및 유기물 탐사 - *Perseverance*

*Curiosity*의 CheMin이 화성 시료의 결정 구조와 광물 조성을 현장에서 직접 규명하며 광물학 연구의 정밀도를 높였다면, 2020년에 발사된 *Perseverance* (Mars 2020 rover)는 이를 토대로 다중분광, 라만, 형광 기법을 통합한 분석과 유기물 탐색, 시료 채취 및 저장까지 수행함으로써 화성 탐사를 단순 관측에서 미래의 시료 귀환 기반 연구로 확장시키는 전환점을 마련하고 있다(Farley *et al.*, 2020). *Perseverance*는 과거에 묻어 고여 있던 호수 및 하천 퇴적 구조가 보존된 장소인 예제로(Jezero) 충돌구의 고대 하천 삼각주 지역을 탐사 대상으로 한다. 이곳은 수화 광물(Fe/Mg 점토, 탄산염, 규산염 등)이 다량 분포하는 것으로 알려져 있어 고대 생명체 흔적 탐색에 최적의 환경을 제공한다(Ehlmann *et al.*, 2008; Horgan *et al.*, 2020).

*Perseverance*는 총 7개(Mastcam-Z, MEDA, MOXIE, PIXL,

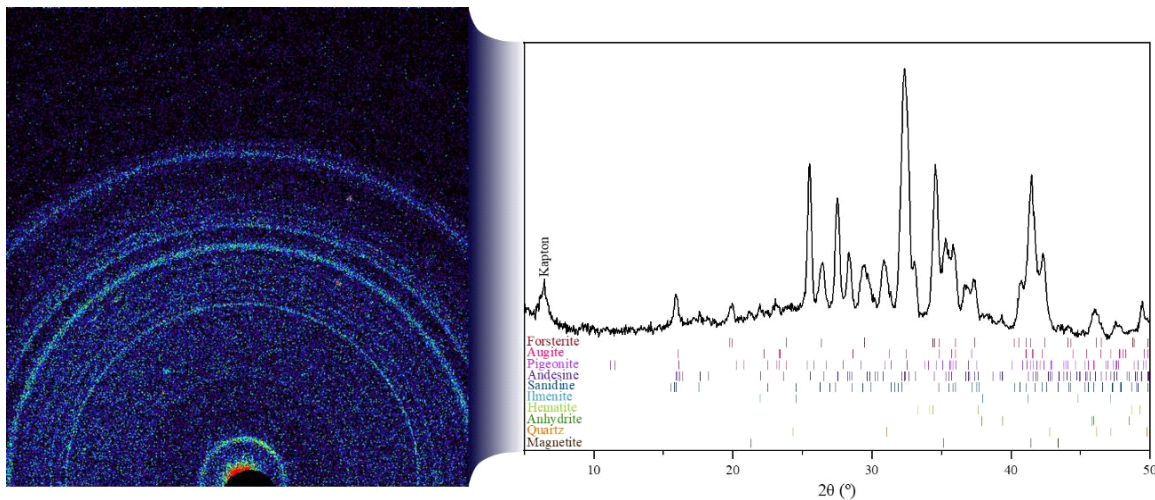


Fig. 4. The 1<sup>st</sup> collected 2D XRD image of Martian soil (Left) (credit: NASA). Converted 1D XRD pattern and subsequently used for mineral identification (Right).

**Table 1.** Launch years and major instruments of Mars exploration missions.

Year	Operator	Mission	Spacecraft	Mission Type	Major Instrument
1964	NASA	Mariner 4	Mariner 4	Flyby	Imaging System
1971	NASA	Mariner 9	Mariner 9	Orbiter	Imaging System, UVS, IRIS, IRR
1975	NASA	Viking 1 / 2	Viking 1 / 2	Lander	Visible camera, XRF, GC-MS
1996	NASA	Mars Global Surveyor	Mars Global Surveyor	Orbiter	MOC, TES
1996	NASA	Mars Pathfinder	Mars Pathfinder	Lander	IMP, ASI/MET
			Sojourner	Rover	APXS, Three Cameras
2003	ESA	Mars Express	Mars Express	Orbiter	OMEGA
2003	NASA	Spirit	Spirit	Rover	Mini-TES, MB
2003	NASA	Opportunity	Opportunity	Rover	Mini-TES, MB
2005	NASA	Mars Reconnaissance Orbiter	Mars Reconnaissance Orbiter	Orbiter	CRISM, HiRISE, CTX, MARCI, MCS, SHARAD, Engineering Instruments, Science Facility Experiments
2012	NASA	Mars Science Laboratory	Curiosity	Rover	Mastcam, MAHLI, MARDI, APXS, ChemCam, CheMin, SAM, RAD, DAN
2020	NASA	Mars 2020	Perseverance	Rover	SuperCam, SHERLOC, PIXL, MOXIE

RIMFAX, SHERLOC, SuperCam)의 주요 과학 장비를 탑재하였다. SuperCam은 LIBS (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy), 라만 분광기(532 nm), 형광 분광기(TRL), VNIR 분광기 등 네 가지 분광 기법을 통합하여 화성 토양 광물의 화학 조성 규명을 목표로 한다(Maurice *et al.*, 2021). 특히 라만 분광기는 탄산염, 황산염, 규산염과 같은 수화광물의 진단에 핵심적인 정보를 제공하며, 잠재적 유기물 탐지에도 활용되고 있다. SHERLOC (Scanning Habitable Environments with Raman & Luminescence for Organics and Chemicals)은 248.6 nm의 심자외선(Deep Ultraviolet, DUV) 라만/형광 분광기로, 미세 스케일에서 방향족 및 지질학적 유기물을 탐색하고, WATSON (Wide Angle Topographic Sensor for Operations and eNginering) 카메라와 결합해 암석 표면의 미세한 텍스처와 유기물 분포를 지도화할 수 있다(Bhartia *et al.*, 2021). 또한 PIXL (Planetary Instrument for X-ray Lithochemistry)은 마이크로포커스 XRF와 고해상도 이미징을 결합한 장비로, 이를 통해 암석 내 수십  $\mu\text{m}$  규모의 미세 원소 분포를 정밀하게 지도화하여(Allwood *et al.*, 2020), 탄산염과 규산염과 같은 특정 광물의 분포를 명확하게 파악할 수 있게 한다. 더 나아가, PIXL의 정밀 분석을 통하여 잠재적 생명체 활동 흔적을 기록하고 있을 수 있는 미세한 광물-유기물 상호관계를 밝히는 데 핵심적인 역할을 수행할 것이다. MOXIE (Mars Oxygen In-Situ Resource Utilization Experiment)는 화성 대기 중  $\text{CO}_2$ 로부터 산소를 생산하는 실험을 수행하여, 향후 유인 탐사 준비와 연계된다.

기존 탐사들과 비교하여 *Perseverance* 탐사의 가장 차별화된 임무는 샘플 캐싱(Sample caching) 시스템의 운용

이다. 로버는 코어 드릴로 채취한 암석 시료를 튜브에 밀봉하며, 이는 향후 화성 샘플 귀환 임무를 통해 지구로 보내질 예정이다(Silverman and Lin, 2020; Wiens *et al.*, 2020). 이는 원격탐사 및 현장 분석을 뛰어넘어 지구 연구실 수준의 고해상도 분석을 목표로 하는 화성 탐사 최초의 시도이다. 종합하면, *Perseverance*는 SuperCam-SHERLOC-PIXL을 통해 광물학적 다양성과 잠재적 유기물의 존재를 정밀하게 탐사하고 있으며, 샘플 귀환을 대비한 데이터 축적까지 수행함으로써, 화성 탐사의 패러다임을 원격 분석에서 시료 회수 기반 정밀 연구로 전환하는 중요한 전환점을 마련하고 있다.

### 3. 광물 분포로 재구성한 화성의 기후 변천

화성 표면에서 산출되는 광물은 행성의 장기적인 물-암석 반응, 기후 변화, 산화-산성화 과정의 누적된 기록을 반영한다. 초기 현무암질 지표에서 기원한 1차 규산염 광물뿐만 아니라 중성-약알칼리 조건의 수환경에서 형성된 스�멕타이트, 산성-증발 환경 하에서 침전된 자로사이트(Jarosite,  $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ) 및 Mg/Ca-황산염, 그리고 후기 건조-산화 환경에서 형성된 적철석 등 다양한 광물군이 시-공간적으로 상이하게 분포한다. 이러한 광물학적 분포는 다양한 지형-지질 환경 및 기후 조건과 밀접하게 연관되어 있으며, 행성 표면의 기후-수환경 진화사를 재구성하는 직접적인 자료를 제공한다.

화성 표면 광물 탐사의 발전은 탐사 임무의 연대기적 전개와 밀접하게 맞물려 있다(표 1). 화성 표면의 암석과 토

양은 “무엇이 언제 있었는가”를 광물의 형태로 과거 환경의 종류와 시기를 기록하는 아카이브 역할을 한다. 이러한 관점에서 MEx에 탑재된 OMEGA 분광계는 행성 전역의 광물 분포를 지도화 하여 화성 환경 변화에 대한 거시적 프레임틀을 제시하였다. OMEGA의 관측 결과는 노아키안 시대의 고지대에 점토광물이 광역적으로 생성되고, 이후 헤스페리안 시대에는 광범위한 황산염 퇴적층이 형성되며, 마지막으로 아마조니안 시대에는 건조 환경에서 생성된 무수 철 산화물의 형성이 지배적이었음을 보여주며, 이를 토대로 필로시안-테이키안-시데리키안 세 시대의 광물 연대기로 개념화하는데 기여하였다(Bibring *et al.*, 2006). 이 연대기는 화성의 기후가 초기의 습윤·온난 환경에서 산성·증발 환경을 거쳐, 현재와 같은 산화·건조 상태로 변했음을 시사한다. 이후 MRO 탐사선에 탑재된 CRISM 분광계는 OMEGA보다 월등히 높은 공간 해상도를 바탕으로, 이러한 거시적 광물 연대기를 개별 지질 단위의 층서적 맥락으로 촘촘히 연결하는데 기여하였다. CRISM의 정밀 관측은 각 시대별 대표 광물과 특정 지형 및 층서 간의 상관관계를 더욱 정교화 하여 화성 환경의 진화 과정을 구체적으로 이해하는 기틀을 마련하였다(Mustard *et al.*, 2008).

### 3.1. 화성 표면 광물

지구와 화성은 모두 규산염 지각으로 구성되기 때문에 감람석, 휘석, 장석(Feldspar,  $(K,Na,Ca)(Al,Si)_4O_8$ )과 같은 1차 규산염 광물, 점토광물, 황산염, 탄산염, 산화철 등 기본적인 광물학 체계는 공통적으로 나타난다. 그러나 화성은 낮은 수화성, 저온, 산화적 환경이 장기간 지속된 결과, Rocknest 풍정토에서 보고된 27-40 wt%의 비정질 성분이 광범위하게 산출되는 특징을 보인다(Bish *et al.*, 2013; Ehlmann and Edwards, 2014). 화성은 지구와 달리 장기적인 유체 순환이 부족하여 변질광물의 시·공간적 연속성이 제한적이며, 광물 분포는 기후 변화에 따라 시기별로 구분된다는 점에서 차이가 있다.

#### 3.1.1. 점토광물(Phyllosilicates)

초기 화성의 대표 광물은 Fe/Mg-스멕타이트와 Al-스멕타이트(베이델라이트(Beidellite,  $(Na,Ca_{0.5})_{0.3}Al_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$ )), 고령석 등의 점토광물이다. 점토광물은 중성~약알칼리의 완충된 유체가 높은 물/암석비로 1차 규산염 광물과 반응 시 안정적으로 생성되는 2차 광물이다(Chevrier and Mathé, 2006). 분광 스펙트럼으로는 1.9  $\mu m$ 의 물 흡수대와 2.29-2.31  $\mu m$  (M-OH) 흡수대가 함께 보이는 게 전형적이고, 이 신호는 화성에서 주로 노아키안 기반암과 층상 퇴적체에서 널리 분포함을 보였다(Mustard *et al.*, 2008). 또한, 제일 분화구에서 Curiosity 로버가 직접 시추한 Sheepbed 이

암은 CheMin을 통해 점토가 약 20% 포함되어 있음이 확인되었고, 초기 균열을 메운 시멘트의 원소비는 아카가네이트(Akaganeite,  $FeO(OH,Cl)$ )와 부합하였다. 이러한 현장 기록은 염소 이온을 포함한 저온의 유체가 공극을 따라 이동하였으며, pH가 중성에 가까운 상태에서 장기간 물-암석의 접촉이 있었음을 보여준다. 결국 초기에는 완충된(중성에 가까운) 수권과 지속적인 지하수/호수 환경이 실제로 작동했음을 시사한다(Gellert *et al.*, 2015).

#### 3.1.2. 황산염(Sulfates)과 염(Cl salts)

OMEGA는 석고/반수석고(Hemihydrate gypsum,  $CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$ ), 키세라이트(Kieserite,  $MgSO_4 \cdot H_2O$ ) 등의 황산염의 분포를 매핑하였으며, 마리네리스 계곡(Valles Marineris), 메리디아니 대지(Terra Meridiani) 등 밝은 층상 지형에서 이들 광물이 집중적으로 분포함을 밝혔다(Gendrin *et al.*, 2005). 특히 메리디아니 대지의 현장 조성은 황이 풍부하고 염소와 브로민(Br) 또한 일반적인 화성 암석보다 높은 농도로 검출되어 증발에 의한 염 성분이 농축된 환경임을 시사하였다. 실제로 APXS, Mössbauer, Mini-TES의 조합은 자로사이트와 Mg/Ca-황산염, 비정질 규산염이 같은 층서 안에서 공존함을 여러 차례 확인하였다(Jolliff *et al.*, 2006). 또한, Endurance 층돌구 화학층서(chemostratigraphy)는 심부로 갈수록 Mg-황산염의 감소와 염소의 약 3배 증가를 보여 물의 간헐적 유입-증발-염화의 반복을 제시하였다(Gellert *et al.*, 2015). 이는 짧은 시간동안 산성의 얇은 물이 간헐적으로 존재하다가 증발이 지배하는 환경이었다는 해석과 부합한다(Wyatt and McSween, 2006). 이러한 산성·증발 환경의 기원으로는 화산성 기체( $SO_2$  등)에 의한 산성화와 증발 분화구에서의 침전·탈수·재수화 경로가 함께 논의된다(Tosca *et al.*, 2008). 행성 규모로 보면, 물의 총량과 지속성이 줄어들고, 간헐적인 얇은 물-증발 사이클이 넓은 지역을 지배한 단계였다고 볼 수 있다(Jolliff *et al.*, 2006; Wyatt and McSween, 2006).

#### 3.1.3. 탄산염(Carbonates)

탄산염은 초기의 물-이산화탄소 상호작용이 잘 완충된 수권을 반영하는 광물로, 닐리 포세(Nili Fossae) 등에서 CRISM이 Mg-탄산염의 분광 신호를 매핑하였다. 탐지된 탄산염 광물은 점토와 감람석과 함께 산출되며, 이는 초기 중성의 물에서 이산화탄소가 광물로 고정(탄산화)되었음을 보여준다(Ehlmann *et al.*, 2008). 실제로 컬럼비아 언덕(Columbia Hills)의 코만치(Comanche) 노두에서 Fe/Mg-탄산염이 16-34 wt%가 존재하는 것으로 보고되어 국지적으로는 중성에 가까운 물과 이산화탄소의 완충이 실현되었음을 뒷받침하였다(Morris *et al.*, 2010). 그러나 전 행성 규모에서 탄산염의

신호가 황산염에 비해 상대적으로 약하게 관측되며, 이는 이후 물의 산성·증발화 속에서 탄산염이 용해되거나 다른 증발성 광물에 피복·매몰되어 탐지되기 어려워졌기 때문으로 설명된다(Jolliff *et al.*, 2006; Wyatt and McSween, 2006). 정리하면, 탄산염은 초기 중성 수권과 광물 탄산화를 기록하지만 현재까지 관찰된 것은 국지적인 경우가 대부분이므로 행성 규모의 이산화탄소 대기가 광범위하게 암석 속에 고정되었다고 보기는 어렵다(Ehlmann *et al.*, 2008).

### 3.1.4. 산화철(Fe oxides/(oxy)hydroxides)

메리디아니 평원(Meridiani Planum)에서 TES는 회색 결정질 적철석이 약 500×300 km 규모로 불규칙하게 분포함을 보여주었다. TES 데이터와 다양한 기원에서 생성된 실험실 적철석 스펙트럼을 비교한 결과 적철석이 침철석의 저온 탈수(약 100-300°C)에 의해 형성되었을 가능성이 가장 크다고 지시한다(Glotch *et al.*, 2004; Wyatt and McSween, 2006). 또한 이 거대 적철석이 자로사이트와 Ca/Mg-황산염과 같은 층서 안에서 공존한다는 사실은 산화적인 얇은 지하수의 순환·증발이 장기간 동안 천천히 반복되었음을 의미한다. 현장 Mössbauer는 자로사이트와 적철석의 동시 산출, Mini-TES는 비정질 규산염과 황산염, 장석의 혼합을 보여 선택적 용탈·잔류, 산성·산화적인 얇은 물의 이동과 증발이라는 해석과 부합한다. 또한, 메리디아니 평원의 표면에는 건조 수축과 같은 건조·산화 레짐(regime)의 근현대적 징후(다각형(polygonal) 텍스처, 풍화 껍질 등)도 관찰되었다(Jolliff *et al.*, 2006).

## 3.2. 화성 광물을 통한 화성 기후 변천

광물학적 증거를 종합하면, 화성은 노아기안에 온난·습윤에 가까운 환경을 가졌고, 시간이 흐르며 헤스페리안에는 산성·증발 환경으로 전환되었으며, 아마조니안에는 건조·산화 환경이 지배적이었다. 이러한 흐름은 습윤·완충(높은 물/암석비)에서 산성·증발(낮은 물/암석비)을 거쳐 냉 건조·산화(극저 수활성)로 전환된 비가역적 전이로 이해할 수 있다(Bibring *et al.*, 2006). 초기의 점토 중심 환경은 지속적인 지하수/호수가 존재하고 중성 pH가 유지되었음을 시사하고 이는 생명체의 거주 가능성의 전제 조건인 완충된 물의 실재를 보여주었다(Grotzinger *et al.*, 2015). 중성의 황산염 중심 환경에서는 산성의 물이 간헐적으로 돌고 증발되면서 수활성이 낮아 생물학적 제약이 커졌을 가능성이 높다(Gendrin *et al.*, 2005; Tosca *et al.*, 2008). 후기 산화철 중심의 환경은 저수분·저온·산화적 표층의 풍화가 천천히 장기간 누적되었고, 거대 적철석 및 건조 균열 등의 말라가는 표면을 보여주었다(Jolliff *et al.*, 2006). 한편, 탄산염은 궤도(Nili Fossae 지역) 및 현장(Comanche 지역)에서의 검

출을 통해 초기 이산화탄소-물 완충 수권의 실재를 증명했지만, 전 행성적 규모에서는 제한적이었으며 이후 산성·건조 조건에서 부분적으로 사라졌을 가능성이 높다(Jolliff *et al.*, 2006; Wyatt and McSween, 2006; Ehlmann *et al.*, 2008). 정리하면, 화성은 초기에는 생명 친화적인 환경을 제공했을 가능성이 높으나 시간이 지남에 따라 산성·산화·건조 환경이 우세해지면서 거주 가능성이 점차 좁아진 행성으로 진화하였다(Mustard *et al.*, 2008).

## 4. 결론: 화성 탐사 및 향후 과제

지난 반세기 동안의 화성탐사는 점토광물-황산염-철 산화물로 이어지는 광물학적 연대기를 통해, 화성이 초기 습윤 환경에서 건조한 산화 환경으로 변모했음을 체계적으로 밝혀왔다. 하지만 이러한 거시적 이해에도 불구하고, (1) 초기 수권의 정확한 지속 기간, (2) 대규모 탄산염 퇴적의 부재, (3) 행성적 산성화의 구체적인 메커니즘, 그리고 (4) 탐지된 유기물의 기원과 같은 핵심적인 문제들은 여전히 미해결 과제로 남아있다. 이 문제들은 고대 화성의 기후 모델과 생명체 거주 가능성의 폭과 깊이를 결정하는 근본적인 질문이다.

이러한 근본적인 과학적 질문들은 궤도 및 현장 탐사만으로는 완전히 해결하기 어렵다. 이에 대한 해답은 결국 화성 시료 귀환을 통해 지구의 정밀 분석 장비를 이용하여 시료를 직접 연구하는 데에 있다. 귀환된 시료는 동위원소 분석을 포함한 정밀한 분석을 통해 초기 물 환경의 특성과 지속 기간을 규명하고, 유기물의 생물학적 기원 여부를 판단할 결정적 단서를 제공할 것으로 기대된다.

한편, 2-3장에서 논의된 화성 표면 광물의 분포와 특성은 단순히 과거 환경을 기록하는 지질학적 지표를 넘어 향후 유인 탐사를 현지자원활용(In-Situ Resources Utilization, ISRU) 관점에서도 중요한 의미를 갖는다. 예를 들어, CRISM 및 CheMin 분석을 통해 확인된 점토광물과 황산염은 구조수·층간수를 포함하는 수화광물로서 향후 물 추출을 위한 핵심 자원으로 논의되고 있다(Sanders and Kleinhenz, 2022). 또한, TES 및 Mössbauer 자료에서 보고된 적철석, 마그네사이트와 같은 산화철 광물은 토양 환원 공정 등을 통해 산소 생산 기술과 연계될 수 있는 잠재적 원료로 평가된다(Ehlmann and Edwards, 2014; Hoffman *et al.*, 2022). 이처럼 광물학적 탐사 성과는 과거 기후-수환경 진화사를 재구성하는 학술적 의미를 넘어서 향후 기지 입지 선정, 자원 확보 전략 수립, ISRU 시스템 설계에 필요한 지질학적·공학적 기반 자료를 제공한다.

본 논평은 기존 화성 탐사들을 통한 화성 표면 광물학 연구의 성과를 종합하여 행성의 환경 진화사를 재구성하고,

현시점에서 가장 중요한 미해결 과제들을 제시하였다. 이는 향후 화성 탐사의 패러다임을 바꿀 시료 귀환 임무의 과학적 필요성을 강조하는 동시에, 미래의 화성 기지 건설과 유지를 위한 핵심 자원(물, 산소, 건축 자재 등)의 잠재적 공급원으로서 광물 분포를 이해하는 것이 중요함을 시사한다. 따라서 화성의 과거를 이해하는 순수 과학 연구와 미래를 개척하는 자원 탐사는 상호 보완적으로 이루어져야 하며, 이는 현재 우주탐사 로드맵을 통해 참여를 확대하고 있는 한국을 포함한 국제 공동 연구에 중요한 학술적, 실용적 토대를 제공할 것이다.

### 감사의 글

이 성과는 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원 창업벤처 녹색 융합 특성화대학원 사업 및 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-00557111).

### REFERENCES

- Allwood, A.C., Wade, L.A., Foote, M.C., Elam, W.T., Hurowitz, J.A., Battel, S., Dawson, D.E., Denise, R.W., Ek, E.M., Gilbert, M.S., King, M.E., Liebe, C.C., Parker, T., Pedersen, D.A.K., Randall, D.P., Sharrow, R.F., Sondheim, M.E., Allen, G., Arnett, K., Au, M.H., Basset, C., Benn, M., Bousman, J.C., Braun, D., Calvet, R.J., Clark, B., Cinquini, L., Conaby, S., Conley, H.A., Davidoff, S., Delaney, J., Denver, T., Diaz, E., Doran, G.B., Ervin, J., Evans, M., Flannery, D.O., Gao, N., Gross, J., Grotzinger, J., Hannah, B., Harris, J.T., Harris, C.M., He, Y., Heirwegh, C.M., Hernandez, C., Hertzberg, E., Hodyss, R.P., Holden, J.R., Hummel, C., Jadusingh, M.A., Jørgensen, J.L., Kawamura, J.H., Kitiyakara, A., Kozaczek, K., Lambert, J.L., Lawson, P.R., Liu, Y., Luchik, T.S., Macneal, K.M., Madsen, S.N., McLennan, S.M., McNally, P., Meras, P.L., Muller, R.E., Napoli, J., Naylor, B.J., Nemere, P., Ponomarev, I., Perez, R.M., Pootrakul, N., Romero, R.A., Rosas, R., Sachs, J., Schaefer, R.T., Schein, M.E., Setterfield, T.P., Singh, V., Song, E., Soria, M.M., Stek, P.C., Tallarida, N.R., Thompson, D.R., Tice, M.M., Timmermann, L., Torossian, V., Treiman, A., Tsai, S., Uckert, K., Villalvazo, J., Wang, M., Wilson, D.W., Worel, S.C., Zamani, P., Zappe, M., Zhong, F. and Zimmerman, R., 2020, PIXL: Planetary Instrument for X-Ray Lithochemistry. *Space Science Reviews*, 216, 134-266, doi:10.1007/s11214-020-00767-7.
- Baird, A.K., Castro, A.J., Clark, B.C., Toulmin III, P., Rose Jr, H., Keil, K. and Gooding, J.L., 1977, The Viking X Ray Fluorescence Experiment: Sampling Strategies and Laboratory Simulations. *Journal of Geophysical Research*, 82, 4595-4624, doi:10.1029/JS082i028p04595.
- Banfield, J.L., Hamilton, V.E. and Christensen, P.R., 2000, A Global View of Martian Surface Compositions from MGS-TES. *Science*, 287, 1626-1630, <http://www.jstor.org/stable/3074645>.
- Banfield, D., Johnson, S.S., Stern, J., Brain, D., Withers, P., Wordsworth, R., Ruff, S., Uingst, R.A., Bleacher, J., Whitley, R., Beaty, D.W., Diniega, S. and Zurek, R., 2018, Mars Science Goals, Objectives, Investigations, and Priorities: 2018. 81 p. white paper posted October, 2018 by the Mars Exploration Program Analysis Group (MEPAG) at <https://mepag.jpl.nasa.gov/reports.cfm>.
- Bell III, J.F., McSween Jr, H.Y., Crisp, J.A., Morris, R.V., Murchie, S.L., Bridges, N.T., Johnson, J. R., Britt, D.T., Golombek, M.P., Moore, H.J., Ghosh, A., Bishop, J.L., Anderson, R.C., Brückner, J., Economou, T., Greenwood, J.P., Gunnlaugsson, H.P., Hargraves, R.M., Hviid, S., Knudsen, J.M., Madsen, M.B., Reid, R., Rieder, R. and Soderblom, L., 2000, Mineralogic and compositional properties of Martian soil and dust: Results from Mars Pathfinder. *Journal of Geophysical Research*, 105, 1721-1755, doi:10.1029/1999JE001060.
- Bhartia, R., Beegle, L.W., DeFlores, L., Abbey, W., Razzell Hollis, J., Uckert, K., Monacelli, B., Edgett, K.S., Kennedy, M.R., Sylvia, M., Aldrich, D., Anderson, M., Asher, S.A., Bailey, Z., Boyd, K., Burton, A.S., Caffrey, M., Calaway, M.J., Calvet, R., Cameron, B., Caplinger, M.A., Carrier, B.L., Chen, N., Chen, A., Clark, M.J., Clegg, S., Conrad, P.G., Cooper, M., Davis, K.N., Ehlmann, B., Facto, L., Fries, M.D., Garrison, D.H., Gasway, D., Ghaemi, F.T., Graff, T.G., Hand, K.P., Harris, C., Hein, J.D., Heinz, N., Herzog, H., Hochberg, E., Houck, A., Hug, W.F., Jensen, E.H., Kah, L.C., Kennedy, J., Krylo, R., Lam, J., Lindeman, M., McGlown, J., Michel, J., Miller, E., Mills, Z., Minitti, M.E., Mok, F., Moore, J., Nealon, K.H., Nelson, A., Newell, R., Nixon, B.E., Nordman, D.A., Nuding, D., Orellana, S., Pauken, M., Peterson, G., Pollock, R., Quinn, H., Quinto, C., Ravine, M.A., Reid, R.D., Riendeau, J., Ross, A.J., Sackos, J., Schaffner, J.A., Schwochert, M., Shelton, M.O., Simon, R., Smith, C.L., Sobron, P., Steadman, K., Steele, A., Thiessen, D., Tran, V.D., Tsai, T., Tuite, M., Tung, E., Wehbe, R., Weinberg, R., Weiner, R.H., Wiens, R.C., Williford, K., Wollonciej, C., Wu, Y.-H., Yingst, R.A. and Zan, J., 2021, Perseverance's Scanning Habitable Environments with Raman and Luminescence for Organics and Chemicals (SHERLOC) Investigation. *Space Science Reviews*, 217, 58-173, doi:10.1007/s11214-021-00812-z.
- Bibring, J.P., Langevin, Y., Mustard, J.E., Poulet, F., Arvidson, R., Gendrin, A., Gondet, B., Mangold, N., Pinet, P., Forget, F. and the OMEGA team, 2006, Global Mineralogical and Aqueous Mars History Derived from OMEGA/Mars Express Data. *Science*, 312, 400-404, doi:10.1126/science.1122659.
- Bibring, J.P., Soufflot, A. and Berthé, M., 2004, OMEGA: Observatoire pour la Minéralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activité. *European Space Agency*, SP-1240, 37-49.
- Biemann, K., Oro, J., Toulmin III, P., Orgel, L.E., Nier, A.O., Anderson, D.M., Simmonds, P.G., Flory, D., Diaz, A.V., Rushneck, D.R., Biller, J.E. and Lafleur, A.L., 1977, The Search for Organic Substances and Inorganic Volatile Compounds in the Surface of Mars. *Journal of Geophysical Research*, 82, 4641-4658, doi:10.1029/JS082i028p04641.
- Bish, D.L., Blake, D.F., Vaniman, D.T., Chipera, S.J., Morris, R.V., Ming, D.W., Treiman, A.H., Sarrazin, P., Morrison, S.M., Downs, R.T., Achilles, C.N., Yen, A.S., Bristow, T.F., Crisp, J.A., Morookian,

- J.M., Farmer, J.D., Rampe, E.B., Stolper, E.M., Spanovich, N. and MSL Science Team, 2013, X-ray Diffraction Results from Mars Science Laboratory: Mineralogy of Rocknest at Gale Crater. *Science*, 341, 1238932, doi:10.1126/science.1238932.
- Bishop, J.L., Noe Dobrea, E.Z., McKeown, N.K., Parente, M., Ehlmann, B.L., Michalski, J.R., Milliken, R.E., Poulet, F., Swayze, G.A., Mustard, J.F., Murchie, S.L. and Bibring, J.-P., 2008, Phyllosilicate Diversity and Past Aqueous Activity Revealed at Mawrth Vallis, Mars. *Science*, 321, 830-833, doi:10.1126/science.1159699.
- Blake, D., Tu, V., Bristow, T., Rampe, E., Vaniman, D., Chipera, S., Sarrazin, P., Morris, R., Morrison, S., Yen, A., Downs, R., Hazen, R., Treiman, A., Ming, D., Downs, G., Achilles, C., Castle, N., Peretyazhko, T., De Marais, D., Craig, P., Lafuente, B., Tutolo, B., Hausrath, E., Simpson, S., Walroth, R., Thorpe, M., Meusbürger, J., Pandey, A., Gailhanou, M., Dera, P., Berger, J., Thompson, L., Gellert, R., McAdam, A., O'Connell-Cooper, C., Sutter, B., Morookian, J.M., Fraeman, A., Grotzinger, J., Siebach, K., Madsen, S. and Vasavada, A., 2024, The Chemistry and Mineralogy (CheMin) X-ray Diffractometer on the MSL Curiosity Rover: A Decade of Mineralogy from Gale Crater, Mars. *Minerals*, 14, 568-612, doi:10.3390/min14060568.
- Blake, D., Vaniman, D., Achilles, C., Anderson, R., Bish, D., Bristow, T., Chen, C., Chipera, S., Crisp, J., Des Marais, D., Downs, R.T., Farmer, J., Feldman, S., Fonda, M., Gailhanou, M., Ma, H., Ming, D.W., Morris, R.V., Sarrazin, P., Stolper, E., Treiman, A. and Yen, A., 2012, Characterization and Calibration of the CheMin Mineralogical Instrument on Mars Science Laboratory. *Space Science Reviews*, 170, 341-399, doi:10.1007/s11214-012-9905-1.
- Calvin, W.M., Putzig, N.E., Dundas, C.M., Bramson, A.M., Horgan, B.H.N., Seelos, K.D., Sizemore, H.G., Ehlmann, B.L., Morgan, G.A., Holt, J.W., Murchie, S.L. and Patterson, G.W., 2021, The Mars Orbiter for Resources, Ices, and Environments (MORIE) Science Goals and Instrument Trades in Radar, Imaging, and Spectroscopy. *The Planetary Science Journal*, 2, 76, doi:10.3847/PSJ/abe4db.
- Carter, J., Poulet, F., Bibring, J.-P., Mangold, N. and Murchie, S., 2013, Hydrous minerals on Mars as seen by the CRISM and OMEGA imaging spectrometers: Updated global view. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118, 831-858, doi:10.1029/2012JE004145.
- Chase Jr, S.C., Hattenbeler, H., Kieffer, H.H., Miner, E., Münch, G. and Neugebauer, G., 1972, Infrared Radiometry Experiment on Mariner 9. *Science*, 175, 308-309, doi:10.1126/science.175.4019.308.
- Chevrier, V. and Mathé, P.E., 2006, Mineralogy and evolution of the surface of Mars: A review. *Planetary and Space Science*, 55, 289-314, doi:10.1016/j.pss.2006.05.039.
- Chicarro, A., Martin, P. and Trautner, R., 2004, The Mars Express Mission: An Overview. European Space Agency, SP-1240, 3-13.
- Christensen, P.R., Bandfield, J.L., Clark, R.N., Edgett, K.S., Hamilton, V.E., Hoefen, T., Kieffer, H.H., Kuzmin, R.O., Lane, M.D., Malin, M.C., Morris, R.V., Pearl, J.C., Pearson, R., Roush, T.L., Ruff, S.W. and Smith, M.D., 2000, Detection of crystalline hematite mineralization on Mars by the Thermal Emission Spectrometer: Evidence for near-surface water. *Journal of Geophysical Research*, 105, 9623-9642, doi:10.1029/1999JE001093.
- Christensen, P.R., Bandfield, J.L., Hamilton, V.E., Ruff, S.W., Kieffer, H.H., Titus, T.N., Malin, M.C., Morris, R.V., Lane, M.D., Clark, R.L., Jakosky, B.M., Mellon, M.T., Pearl, J.C., Conrath, B.J., Smith, M.D., Clancy, R.T., Kuzmin, R.O., Roush, T., Mehall, G.L., Gorelick, N., Bender, K., Murray, K., Dason, S., Greene, E., Silverman, S. and Greenfield, M., 2001, Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer experiment: Investigation description and surface science results. *Journal of Geophysical Research*, 106, 23823-23872, doi:10.1029/2000JE001370.
- Clark, B.C., Baird, A.K., Rose, H.J. JR., Toulmin III, P., Keil, K., Castro, A.J., Kelliher, W.C., Rowe, C.D. and Evans, P.H., 1976, Inorganic Analyses of Martian Surface Samples at the Viking Landing Sites. *Science*, 194, 1283-1288, doi:10.1126/science.194.4271.1283.
- Edgett, K.S., Yingst, R.A., Ravine, M.A., Caplinger, M.A., Maki, J.N., Ghaemi, F.T., Schaffner, J.A., Bell, J.F., III, Edwards, L.J., Herkenhoff, K.E., Heydari, E., Kah, L.C., Lemmon, M.T., Minitti, M.E., Olson, T.S., Parker, T.J., Rowland, S.K., Schieber, J., Sullivan, R.J., Sumner, D.Y., Thomas, P.C., Jensen, E.H., Simmonds, J.J., Sengstacken, A.J., Willson, R.G. and Goetz, W., 2012, Curiosity's Mars Hand Lens Imager (MAHLI) Investigation. *Space Science Reviews*, 170, 259-317, doi:10.1007/s11214-012-9910-4.
- Ehlmann, B.L. and Edwards, C.S., 2014, Mineralogy of the Martian Surface. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42, 291-315, doi:10.1146/annurev-earth-060313-055024.
- Ehlmann, B.L., Mustard, J.F., Fassett, C.I., Schon, S.C., Head III, J.W., Des Marais, D.J., Grant, J.A. and Murchie, S.L., 2008, Clay minerals in delta deposits and organic preservation potential on Mars. *Nature Geoscience*, 1, 355-358, doi:10.1038/ngeo207.
- Ehlmann, B.L., Mustard, J.F., Murchie, S.L., Bibring, J.-P., Meunier, A., Fraeman, A.A. and Langevin, Y., 2011, Subsurface water and clay mineral formation during the early history of Mars. *Nature*, 479, 53-60, doi:10.1038/nature10582.
- Farley, K.A., Williford, K.H., Stack, K.M., Bhartia, R., Chen, A., de la Torre, M., Hand, K., Goreva, Y., Herd, C.D.K., Hueso, R., Liu, Y., Maki, J.N., Martinez, G., Moeller, R.C., Nelessen, A., Newman, C.E., Nunes, D., Ponce, A., Spanovich, N., Willis, P.A., Beegle, L.W., Bell, J.F., III, Brown, A.J., Hamran, S.-E., Hurowitz, J.A., Maurice, S., Paige, D.A., Rodriguez-Manfredi, J.A., Schulte, M. and Wiens, R.C., 2020, Mars 2020 Mission Overview. *Space Science Reviews*, 216, 142-183, doi:10.1007/s11214-020-00762-y.
- Gellert, R., Clark III, B.C. and the MSL and MER Science Teams, 2015, In Situ Compositional Measurements of Rocks and Soils with the Alpha Particle X-ray Spectrometer on NASA's Mars Rover. *Elements*, 11, 39-44, doi:10.2113/gselements.11.1.39.
- Gendrin, A., Mangold, N., Bibring, J.-P., Langevin, Y., Gondet, B., Poulet, F., Bonello, G., Quantin, C., Mustard, J., Arvidson, R. and LeMouélic, S., 2005, Sulfates in Martian Layered Terrains: The OMEGA/Mars Express View. *Science*, 307,

- 1587-1591, doi:10.1126/science.1109087.
- Glotch, T.D., Morris, R.V., Christensen, P.R. and Sharp, T.G., 2004, Effect of precursor mineralogy on the thermal infrared emission spectra of hematite: Application to Martian hematite mineralization. *Journal of Geophysical Research*, 109, E07003, doi:10.1029/2003JE002224.
- Grotzinger, J.P., Crisp, J.A., Vasavada, A.R. and the MSL Science Team, 2015, Curiosity's Mission of Exploration at Gale Crater, *Mars. Elements*, 11, 19-26, doi:10.2113/gselements.11.1.19.
- Hanel, R.A., Conrath, B.J., Hovis, W.A., Kunde, V.G., Lowman, P.D., Pearl, J.C., Prabhakara, C., Schlachman, B. and Levin, G.V., 1972a, Infrared Spectroscopy Experiment on the Mariner 9 Mission: Preliminary Results. *Science*, 175, 305-308, doi:10.1126/science.175.4019.305.
- Hanel, R., Conrath, B., Hovis, W., Kunde, V., Lowman, P., Maguire, W., Pearl, J., Pirraglia, J., Prabhakara, C. and Schlachman, B., 1972b, Investigation of the Martian Environment by Infrared Spectroscopy on Mariner 9. *Icarus*, 17, 423-442, doi:10.1016/0019-1035(72)90009-7.
- Hartmann, W.K. and Neukum, G., 2001, Cratering chronology and the evolution of Mars. *Space Science Reviews*, 96, 165-194, doi:10.1023/A:1011945222010.
- Hoffman, J.A., Hecht, M.H., Rapp, D., Hartvigsen, J.J., SooHoo, J.G., Aboobaker, A.M., McClean, J.B., Liu, A.M., Hinterman, E.D., Nasr, M., Hariharan, S., Horn, K.J., Meyen, F.E., Okkels, H., Steen, P., Elangovan, S., Graves, C.R., Khopkar, P., Madsen, M.B., Voecks, G.E., Smith, P.H., Skafte, T.L., Araghi, K.R. and Eisenman, D.J., 2022, Mars Oxygen ISRU Experiment (MOXIE) —Preparing for human Mars exploration. *Science advances*, 8, eabp8636, doi:10.1126/sciadv.abp8636.
- Hord, C.W., Barth, C.A., Stewart, A.I. and Lane, A.L., 1972, Mariner 9 Ultraviolet Spectrometer Experiment: Photometry and Topography of Mars. *Icarus*, 17, 443-456, doi:10.1016/0019-1035(72)90010-3.
- Horgan, B.H.N., Anderson, R.B., Dromart, G., Amador, E.S. and Rice, M.S., 2020, The mineral diversity of Jezero crater: Evidence for possible lacustrine carbonates on Mars. *Icarus*, 339, 113526, doi:10.1016/j.icarus.2019.113526.
- Jolliff, B.L., McLennan, S.M. and the Athena Science Team, 2006, Evidence for Water at Meridiani. *Elements*, 2, 163-167, doi:10.2113/gselements.2.3.163.
- Kieffer, H.H., Titus, T.N., Mullins, K.F. and Christensen, P.R., 2000, Mars south polar spring and summer behavior observed by TES: Seasonal cap evolution controlled by frost grain size. *Journal of Geophysical Research*, 105, 9653-9699, doi:10.1029/1999JE001136.
- Klein, H.P., 1978, The Viking Biological Experiments on Mars. *Icarus*, 34, 666-674, doi:10.1016/0019-1035(78)90053-2.
- Leighton, R.B., Murray, B.C., Sharp, R.P., Allen, J.D. and Sloan, R.K., 1965, Mariner IV Photography of Mars: Initial Results. *Science*, 149, 627-630, doi:10.1126/science.149.3684.627.
- Liu, B., Liu, D., Liu, J., Zhang, Q., Huang, H., Xu, R., Wang, R., Liu, C., He, Z. and Li, C., 2021, Ground Validation Experiment and Spectral Detection Capability Evaluation of Mars Mineralogical Spectrometer (MMS) Aboard HX-1 Orbiter. *Space Science Reviews*, 218, doi:10.1007/s11214-021-00858-z.
- Malin, M.C. and Edgett, K.S., 2001, The Mars Global Surveyor Mar Orbiter Camera: Interplanetary Cruise through Primary Mission. *Journal of Geophysical Research*, 106, 23429-23570, doi:10.1029/2000JE001455.
- Maurice, S., Wiens, R.C., Bernardi, P., Caïs, P., Robinson, S., Nelson, T., Gasnault, O., Reess, J.-M., Deleuze, M., Rull, F., Manrique, J.-A., Abbaki, S., Anderson, R.B., André, Y., Angel, S.M., Arana, G., Battault, T., Beck, P., Benzerara, K., Bernard, S., Berthias, J.-P., Beyssac, O., Bonafous, M., Bousquet, B., Boutillier, M., Cadu, A., Castro, K., Chapron, F., Chide, B., Clark, K., Clavé, E., Clegg, S., Cloutis, E., Collin, C., Cordoba, E.C., Cousin, A., Dameury, J.-C., D'Anna, W., Daydou, Y., Debus, A., Deflores, L., Dehouck, E., Delapp, D., De Los Santos, G., Donny, C., Doressoundiram, A., Dromart, G., Dubois, B., Dufour, A., Dupieux, M., Egan, M., Ervin, J., Fabre, C., Fau, A., Fischer, W., Forni, O., Fouchet, T., Frydenvang, J., Gauffre, S., Gauthier, M., Gharakanian, V., Gilard, O., Gontijo, I., Gonzalez, R., Granena, D., Grotzinger, J., Hassen-Khodja, R., Heim, M., Hello, Y., Hervet, G., Humeau, O., Jacob, X., Jacquiod, S., Johnson, J.R., Kouach, D., Lacombe, G., Lanza, N., Lapauw, L., Laserna, J., Lasue, J., Le Deit, L., Le Mouélic, S., Le Comte, E., Lee, Q.-M., Legett IV, C., Leveille, R., Lewin, E., Leyrat, C., Lopez-Reyes, G., Lorenz, R., Lucero, B., Madariaga, J.M., Madsen, S., Madsen, M., Mangold, N., Manni, F., Mariscal, J.-F., Martinez-Frias, J., Mathieu, K., Mathon, R., McCabe, K.P., McConnochie, T., McLennan, S.M., Mekki, J., Melikechi, N., Meslin, P.-Y., Micheau, Y., Michel, Y., Michel, J.M., Mimoun, D., Misra, A., Montagnac, G., Montaron, C., Montmessin, F., Moros, J., Mousset, V., Morizet, Y., Murdoch, N., Newell, R.T., Newsom, H., Nguyen Tuong, N., Ollila, A.M., Orttner, G., Oudda, L., Pares, L., Parisot, J., Parot, Y., Pérez, R., Pheav, D., Picot, L., Pilleri, P., Pilorget, C., Pinet, P., Pont, G., Poulet, F., Quantin-Nataf, C., Quertier, B., Rambaud, D., Rapin, W., Romano, P., Roucayrol, L., Royer, C., Ruellan, M., Sandoval, B.F., Sautter, V., Schoppers, M.J., Schröder, S., Seran, H.-C., Sharma, S.K., Sobron, P., Sodki, M., Sournac, A., Sridhar, V., Standarovsky, D., Storms, S., Striebig, N., Tatat, M., Toplis, M., Torre-Fdez, I., Toulemont, N., Velasco, C., Veneranda, M., Venhaus, D., Virmontois, C., Viso, M., Willis, P. and Wong, K.W., 2021, The SuperCam Instrument Suite on the Mars 2020 Rover: Science Objectives and Mast-Unit Description. *Space Science Reviews*, 217, 47-155, doi:10.1007/s11214-021-00807-w.
- Mellon, M.T., Jakosky, B.M., Kieffer, H.H. and Christensen, P.R., 2000, High-Resolution Thermal Inertia Mapping from the Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer. *Icarus*, 148, 437-455, doi:10.1006/icar.2000.6503.
- Morris, R.V., Ruff, S.W., Gellert, R., Ming, D.W., Arvidson, R.E., Clark, B.C., Golden, D.C., Siebach, K., Klingelhöfer, G., Schröder, C., Fleischer, I., Yen, A.S. and Squyres, S.W., 2010, Identification of Carbonate-Rich Outcrops on Mars by the Spirit Rover. *Science*, 329, 421-424, doi:10.1126/science.1189667.
- Murchie, S., Arvidson, R., Bedini, P., Beisser, K., Bibring, J.-P., Bishop, J., Boldt, J., Cavender, P., Choo, T., Clancy, R.T., Darlington, E.H., Des Marais, D., Espiritu, R., Fort, D., Green, R., Guinness, E., Hayes, J., Hash, C., Heffernan, K., Hemmler, J., Heyler, G., Humm, D., Hutcheson, J., Izenberg, N., Lee, R.,

- Lees, J., Lohr, D., Malaret, E., Martin, T., McGovern, J.A., McGuire, P., Morris, R., Mustard, J., Pelkey, S., Rhodes, E., Robinson, M., Roush, T., Schaefer, E., Seagrave, G., Seelos, F., Silverglate, P., Slavney, S., Smith, M., Shyong, W.-J., Strohhahn, K., Taylor, H., Thompson, P., Tossman, B., Wirzburger, M. and Wolff, M., 2007, Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM) on Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). *Journal of Geophysical Research*, 112, E05S03, doi: 10.1029/2006JE002682.
- Murchie, S., Mustard, J.F., Ehlmann, B.L., Milliken, R.E., Bishop, J.L., McKeown, N.K., Noe Dobrea, E.Z., Seelos, F.P., Buczkowski, D.L., Wiseman, S.M., Arvidson, R.E., Wray, J.J., Swayze, G., Clark, R.N., Des Marais, D.J., McEwen, A.S. and Bibring, J.-P., 2009, A synthesis of Martian aqueous mineralogy after 1 Mars year of observations from the Mars Reconnaissance Orbiter. *Journal of Geophysical Research*, 114, E00D06, doi:10.1029/2009JE003342.
- Mustard, J.F., Murchie, S.L., Pelkey, S.M., Ehlmann, B.L., Milliken, R.E., Grant, J.A., Bibring, J.-P., Poulet, F., Bishop, J., Noe Dobrea, E., Roach, L., Seelos, F., Arvidson, R.E., Wiseman, S., Green, R., Hash, C., Humm, D., Malaret, E., McGovern, J.A., Seelos, K., Clancy, T., Clark, R., D. D. Marais, N., Knudson, A., Langevin, Y., Martin, T., McGuire, P., Morris, R., Robinson, M., Roush, T., Smith, M., Swayze, G., Taylor, H., Titus, T. and Wolff, M., 2008, Hydrated silicate minerals on Mars observed by the Mars Reconnaissance Orbiter CRISM instrument. *Nature*, 454, 305-309, doi:10.1038/nature07097.
- Mustard, J.F., Poulet, F., Gendrin, A., Bibring, J.-P., Langevin, Y., Gondet, B., Mangold, N., Bellucci, G. and Altieri, F., 2005, Olivine and Pyroxene Diversity in the Crust of Mars. *Science*, 307, 1594-1597, doi:10.1126/science.1109098.
- NASA, Mars Exploration: Science Goals, 2024, <https://science.nasa.gov/planetary-science/programs/mars-exploration/science-goals/> (July 18, 2024).
- NASA/JPL, 2024, <https://www.nasa.gov/missions/mars-science-laboratory/curiosity-rover/nasas-curiosity-rover-discovers-a-surprise-in-a-martian-rock/> (July 18, 2024).
- Poulet, F., Bibring, J.-P., Mustard, J.F., Gendrin, A., Mangold, N., Langevin, Y., Arvidson, R.E., Gondet, B., Gomez, C. and the Omega Team, 2005, Phyllosilicates on Mars and implications for early martian climate. *Nature*, 438, 623-627, doi:10.1038/nature04274.
- Rapin, W., Meslin, P.-Y., Maurice, S., Vaniman, D., Nachon, M., Mangold, N., Schröder, S., Gasnault, O., Forni, O., Wiens, R.C., Martínez, G.M., Cousin, A., Sautter, V., Lasue, J., Rampe, E.B. and Archer, D., 2016, Hydration state of calcium sulfates in Gale crater, Mars: Identification of bassanite veins. *Earth and Planetary Science Letters*, 452, 197-205, doi:10.1016/j.epsl.2016.07.045.
- Sanders, G.B. and Kleinhenz, J.E., 2022, NASA Envisioned Future Priorities for In Situ Resource Utilization. 73<sup>rd</sup> International Astronautical Congress (IAC), Paris, France, 18-22 September 2022. IAC-22-D3-2A-x67971-Sanders.pdf
- Silverman, M. and Lin, J., 2020, Mars 2020 Rover Adaptive Caching Assembly: Caching Martian Samples for Potential Earth Return. 45th Aerospace Mechanisms Symposium, Houston, Texas, May 13-15, 2020, JPL Open Repository, <https://hdl.handle.net/2014/52365>.
- Soffen, G.A. and Snyder, C.W., 1976, The First Viking Mission to Mars. *Science*, 193, 759-766, doi:10.1126/science.193.4255.759.
- Squyres, S.W., Arvidson, R.E., Bell III, J.F., Brückner, J., Cabrol, N.A., Calvin, W., Carr, W.H., Christensen, P.R., Clark, B.C., Crumpler, L., Des Marais, D.J., d'Uston, C., Economou, T., Farmer, J., Farrand, W., Folkner, W., Golombek, M., Gorevan, S., Grant, J.A., Greeley, R., Grotzinger, J., Haskin, L., Herkenhoff, K.E., Hviid, S., Johnson, J., Klingelhöfer, G., Knoll, A.H., Landis, G., Lemmon, M., Li, R., Madsen, M.B., Malin, M.C., McLennan, S.M., McSween, H.Y., Ming, D.W., Moersch, J., Morris, R.V., Parker, T., Rice Jr., J.W., Richter, L., Rieder, R., Sims, M., Smith, M., Smith, P., A. Soderblom, L.A., Sullivan, R., Wänke, H., Wdowiak, T., Wolff, W. and Yen, A. 2004, The Opportunity Rover's Athena Science Investigation at Meridiani Planum, Mars. *Science*, 306, 1698-1703, doi:10.1126/science.1106171.
- Tosca, N.J., Knoll, A.H. and McLennan, S.M., 2008, Water Activity and the Challenge for Life on Early Mars. *Science*, 320, 1204-1207, doi:10.1126/science.1155432.
- Toulmin III, P., Baird, A.K., Clark, B.C., Keil, K., Rose, H.J. JR., Christian, R.P., Evans, P.H. and Kelliher, W.C., 1977, Geochemical and Mineralogical Interpretation of the Viking Inorganic Chemical Results. *Journal of Geophysical Research*, 82, 28, 4625-4634, doi:10.1029/JS082i028p04625.
- Vaniman, D.T., Bish, D.L., Ming, D.W., Bristow, T.F., Morris, R.V., Blake, D.F., Chipera, S.J., Morrison, S.M., Treiman, A.H., Rampe, E.B., Rice, M., Achilles, C.N., Grotzinger, J.P., McLennan, S.M., Williams, J., Bell, J.F., III, Newsom, H.E., Downs, R.T., Maurice, S., Sarrazin, P., Yen, A.S., Morookian, J.M., Farmer, J.D., Stack, K., Milliken, R.E., Ehlmann, B.L., Sumner, D.Y., Berger, G., Crisp, J.A., Hurowitz, J.A., Anderson, R., Des Marais, D.J., Stolper, E.M., Edgett, K.S., Gupta, S., Spanovich, N. and MSL Science Team, 2014, Mineralogy of a Mudstone at Yellowknife Bay, Gale Crater, Mars. *Science*, 343, 1243480, doi:10.1126/science.1243480.
- Vaniman, D.T., Martínez, G.M., Rampe, E.B., Bristow, T.F., Blake, D.F., Yen, A.S., Ming, D.W., Rapin, W., Meslin, P.-Y., Morookian, J.M., Downs, R.T., Chipera, S.J., Morris, R.V., Morrison, S.M., Treiman, A.H., Achilles, C.N., Robertson, K., Grotzinger, J.P., Hazen, R.M., Wiens, R.C. and Sumner, D.Y., 2018, Gypsum, bassanite, and anhydrite at Gale crater, Mars. *American Mineralogist*, 103, 1011-1020, doi:10.2138/am-2018-6346.
- Wänke, H., Brückner, J., Dreibus, G., Rieder, R. and Ryabchikov, I., 2001, Chemical composition of rocks and soils at the Pathfinder site. *Space Science Reviews*, 96, 317-330, doi:10.1023/A:1011961725645.
- Wiens, R.C., Maurice, S., Robinson, S.H., Nelson, A.E., Cais, P., Bernardi, P., Newell, R.T., Clegg, S., Sharma, S.K., Storms, S., Deming, J., Beckman, D., Ollila, A.M., Gasnault, O., Anderson, R.B., André, Y., Angel, S.M., Arana, G., Auden, E., Beck, P., Becker, J., Benzerara, K., Bernard, S., Beyssac, O., Borges, L., Bousquet, B., Boyd, K., Caffrey, M., Carlson, J., Castro, K., Celis, J., Chide, B., Clark, K., Cloutis, E., Cordoba, E.C., Cousin, A., Dale, M., Deflores, L., Delapp, D., Deleuze, M.,

Dirmyer, M., Donny, C., Dromart, G., Duran, M.G., Egan, M., Ervin, J., Fabre, C., Fau, A., Fischer, W., Forni, O., Fouchet, T., Fresquez, R., Frydenvang, J., Gasway, D., Gontijo, I., Grotzinger, J., Jacob, X., Jacquino, S., Johnson, J.R., Klisiewicz, R.A., Lake, J., Lanza, N., Laserna, J., Lasue, J., LeMouélic, S., Legett, C.IV, Leveille, R., Lewin, E., Lopez-Reyes, G., Lorenz, R., Lorigny, E., Love, S.P., Lucero, B., Madariaga, J.M., Madsen, M., Madsen, S., Mangold, N., Manrique, J.A., Martinez, J.P., Martinez-Frias, J., McCabe, K.P., McConnochie, T.H., McGlown, J.M., McLennan, S.M., Melikechi, N., Meslin, P.-Y., Michel, J.M., Mimoun, D., Misra, A., Montagnac, G., Montmessin, F., Mousset, V., Murdoch, N., Newsom, H., Ott, L.A., Ousnamer, Z.R., Pares, L., Parot, Y., Pawluczyk, R., Peterson, C.G., Pilleri,

P., Pinet, P., Pont, G., Poulet, F., Provost, C., Quertier, B., Quinn, H., Rapin, W., Reess, J.-M., Regan, A.H., Reyes-Newell, A.L., Romano, P.J., Royer, C., Rull, F., Sandoval, B., Sarrao, J.H., Sautter, V., Schoppers, M.J., Schröder, S., Seitz, D., Shepherd, T., Sobron, P., Dubois, B., Sridhar, V., Toplis, M.J., Torre-Fdez, I., Trettel, I.A., Underwood, M., Valdez, A., Valdez, J., Venhaus, D. and Willis, P., 2020, The SuperCam Instrument Suite on the NASA Mars 2020 Rover: Body Unit and Combined System Tests. *Space Science Reviews*, 217, 4-91, doi:10.1007/s11214-020-00777-5.

Wyatt, M.B. and McSween Jr, H.Y., 2006, The Orbital Search for Altered Materials on Mars. *Elements*, 2, 145-150, doi:10.2113/gselements.2.3.145.

**Appendix 1.** Acronyms.

APXS	Alpha Proton X-ray Spectrometer
ASI/MET	Atmospheric Structure Instrument/Meteorology Package
ChemCam	Chemistry & Camera
CheMin	Chemistry & Mineralogy X-ray Diffraction
CRISM	Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars
DAN	Dynamic Albedo of Neutron
DUV	Deep Ultraviolet
ESA	European Space Agency
GC-MS	Gas Chromatograph-Mass Spectrometer
IMP	Imager for Mars Pathfinder
IR	Infrared
IRIS	Infrared Interferometer Spectrometer
IRR	Infrared Radiometer
ISRU	In-Situ Resource Utilization
LIBS	Laser-Induced Breakdown Spectroscopy
MAHLI	Mars Hand Lens Imager
MARDI	Mars Descent Imager
Mastcam	Mast-mounted camera system
MB	Mössbauer Spectrometer
MEDA	Mars Environmental Dynamics Analyzer
MEx	Mars Express
MGS	Mars Global Surveyor
Mini-TES	Miniature Thermal Emission Spectrometer
MOC	Mars Orbital Camera
MOXIE	Mars Oxygen ISRU Experiment
MRO	Mars Reconnaissance Orbiter
MSL	Mars Science Laboratory
MSR	Mars Sample Return
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NIR	Near-Infrared
OMEGA	Visible and Infrared Mineralogical Mapping Spectrometer
PIXL	Planetary Instrument for X-ray Lithochemistry
RAD	Radiation Detector
SAM	Sample Analysis at Mars
SHERLOC	Scanning Habitable Environments with Raman & Luminescence for Organics & Chemicals
TES	Thermal Emission Spectrometer
TRL	time-resolved Luminescence
UVS	Ultraviolet Spectrometer
VNIR	Visible and Near-Infrared
WATSON	Wide Angle Topographic Sensor for Operations and eEngineering
XRF	X-ray Fluorescence