원전용 내방사선 탄성소재의 이해

윤 성 운
충남대학교
유기재료공학과
석사과정

박 지 성
충남대학교
유기재료공학과
석사과정

진 형 민
충남대학교
유기재료공학과
조교수

1. 서론

현재 인류가 직면하고 있는 기후변화 위기로 인해 탄소 배출을 줄이기 위한 노력들이 범국가적인 차원에서 진행되고 있다. 대표적인 정책방향은 유럽연합의 그린 택소노미(Green Taxonomy)로 2050년까지 탄소 배출량과 흡수량의 균형을 이룬 탄소 넷제로(Net Zero)를 실현하기 위해 친환경에 해당하는 산업을 분류하였으며, 2022년 원자력발전을 그린 택소노미에 포함시키면서 원자력 발전에 대한 기대가 다시 떠오르고 있다. 한국형 그린 택소노미인 K-택소노미에도 지난 9월 원자력발전을 포함시켰으며 적극적인 원전 수출전략을 통해 경제성장의 동력으로 삼는다는 목표를 가지고 있다.

2022년 4월 기준 전세계 33개국에서 441기의 발전용 원자로를 운영중이며, 총 설비 용량은 393.5 GW로 전세계 전체 에너지 총생산의 10.35%를 담당하고 있다. 국제원자력기구(IAEA)의 원전 전망보고서에 따르면 앞서 언급한 전지구적 기후변화 위기와 맞물려 2050년까지 설비용량이 최대 현재의 두배인 792 GW까지 증가할 것으로 예측하였다.[1] 국내의 경우 2022년 현재 총 24기의 원전이 가동중이며, 전체 설비용량은 23.2 GW로 국내 전력생산의 19.2%을 차지하고 있으나 2030년까지 공격적인 원전비중

확대를 통해 국내 총 발전용량의 30% 이상까지 확대한다는 계획을 가지고 있다. 후쿠시마 사태 이후 원전에 대해 소극적이었던 일본도 현재 기존 원전의 운전기간 연장과 추가 원전 건설을 검토 중에 있다.[2]

이와 더불어 최근 소형 모듈화를 통해 기존 대형 원전 시스템 대비 안정성과 유연성을 획기적으로 높인 소형 모듈형 원자로(small modular reaction, SMR)가 차세대 원자력 에너지 기술로 많은 기대를 받고 있다. 2022년 현재 전세계 원전 주요국을 중심으로 총 70여종의 SMR원전이 개발중이며, 2030년 전후 본격 상용화가 전망된다. 영국 국립원자력연구소의 추산에 따르면 2035년까지 약 650 – 850 기의 SMR원전이 건설 될 것으로 예상되며, 시장규모는 연간 150조원으로 추산된다.[3]

원전 시스템 내에서 탄성소재 부품은 실링부품(가스켓, 오링 등), 다이아프램, 호스, 케이블 피복재, 각종 밸트류, 차폐부품 등 다양한 곳에서 활용되는 필수 부품으로, 원자로 1기 당 약 7,000 – 15,000개의 실링부품이 들어갈 정도로 매우 중요한 위치를 차지하고 있다.[4] 한동안 주춤 했었던 원자력발전에 대한 수요가 기후변화 문제와 에너지 자원화 등의 문제로 인해 최근 들어 다시금 증가하는 국면이며, 이와 더불어 SMR원전에 대한 수요도 폭발적인 증가가 예상되므로, 자연스레 원전에서 사용되는 탄성소재 부품에 대한 수요도 증가될 것으로 예상된다. 따라서 내방사선 및 내열성이 우수한 원전용 내방사선 탄성소재에 대한 연구개발에 요구되고 있다. 이에 본 고에서는 원전에서 사용되는 탄성소재 및 탄성소재 부품에 대해 소개하고, 원전용 탄성소재에서 필수적인 요소인 내방사선 원리에 대해 소개하고자 한다.

2. 원자력 산업과 탄성소재

원자력발전 시스템은 크게 1차, 2차, 3차계통으로 구분할 수 있으며 1차계통은 원자로와 직접 연결되어 있는 기기 및 설비, 2차계통은 터빈 발전기에 관련된 기기와 설비, 그리고 3차계통은 2차계통 복수기로부터 바다로 열을 방출하는 설비를 말한다. 1차계통은 원자로와 직접 연결되어 있어 통상적으로 방사성 핵종이 검출될 수 있는 영역이며, 2차계통은 방사선 노출은 무시할 수 있는 수준이나, 사고 시 과량을 방사선에 노출될 수 있는 영역이다. 한국원자력안전기술원에서 발간하는 원전 규제 지침에 따라 고분자 재료는 방사성 유체를 포함하는 1차 계통에서는 사용될 수 없으며, 2차계통 및 3차계통에서 탄성부품이 사용된다.

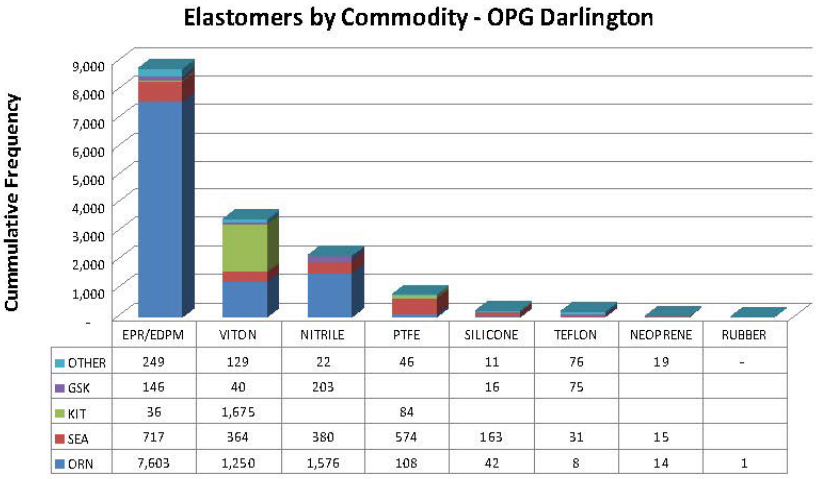
원전은 안전성과 신뢰성이 보장되어야 하는 산업이기 때문에 차등적인 품질 활

동을 수행한다. 원전에서 사용되는 보조기기 및 부품의 경우 그 중요도에 따라 안전성등급(Q등급, safety-related class), 안전성영향등급(A등급, augmented quality class), 일반산업등급(S등급, non-safety related class)으로 나뉜다.[5] S등급과 A등급의 경우 한수원유자격공급자가 일반적인 절차를 거쳐 납품이 가능하지만, 가장 높은 등급인 Q등급의 경우 추가적인 기기검증 및 진위여부확인(원재료 단계부터) 등 엄격한 검증절차를 거쳐야 하므로 진입장벽과 납품단가가 높다고 할 수 있다.[6]

Figure 1. 원전에서 사용되는 대표적인 탄성소재부품

2.1 원전 내 탄성소재부품의 활용처

원전 내에서 활용되는 대표적인 탄성부품으로는 가스켓, 오-링, 실과 같은 실링부품이 대표적이며, 펌프, 밸브, 노즐댐 등에 활용되는 다이아프램, 압력 호스용 내부재, 케이블 피복재, 도어실, 수조게이트실, 각종 밸트류, 차폐부품, 개인방호구 등이 있다(Figure 1).[7] 캐나다 원전운영사인 OPG社 달링턴(Darlington) 원전 내에서 사용되는 탄성부품을 분류한 자료를 보면 가장 많이 사용되는 탄성 소재로는 우수한 내방사선 성능을 갖는 EPM/EPDM 계열인 것을 알 수 있으며, 다음으로는 높은 내열성을 갖는 불소고무(Viton, FKM)인 것을 알 수 있다(Figure 2). 부품 별로는 오-링(ORN)이 가장 높은 비율을 차지하는 것을 알 수 있으며, 그 다음으로는 실(SEA)과 가스켓(GSK)이 많이 사용되는 것을 알 수 있다. 즉 오-링, 가스켓, 실 등의 실링부품이 가장 높은 빈도로 사용되는 것을 확인할 수 있으며, 원자로 1기당 약 9,000개 이상의 탄성 실링부품이 활용됨을 보여준다.



	EPR/EDPM	VITON	NITRILE	PTFE	SILICONE	TEFLON	NEOPRENE	RUBBER
OTHER	249	129	22	46	11	76	19	-
GSK	146	40	203		16	75		
KIT	36	1,675		84				
SEA	717	364	380	574	163	31	15	
ORN	7,603	1,250	1,576	108	42	8	14	1

Figure 2. 캐나다 OPG社 달링턴(Darlington) 원전 내 탄성소재부품 사용 통계[4]

3. 내방사선 탄성소재 이론 소개

원자력발전소 내부에서는 다양한 종류의 방사선 및 고온에 노출될 수 있으며, 이에 따라 원전에서 사용되는 부품들은 적절한 내방사선 성능이 요구된다. 탄성소재는 일반적으로 방사선에 노출 시 가교(crosslinking)반응과 사슬분해(chain scission) 반응, 산화(oxidation) 반응이 경쟁적으로 발생하게 되며 일반적으로는 가교반응이 우세하게 발생하여 점차 경화되어 탄성 특성을 잃게 된다.[8] 이에 따라 방사선 노출되더라도 물성의 변화가 적은 내방사선 특성이 가장 중요한 부품 성능의 지표가 되며 이를 위한 적절한 탄성모재의 선택과 복합화가 가장 중요하다. 일반적으로 내방사선 탄성소재는 탄성모재에 내방사선 특성 향상을 위한 충전재(카본블랙, 무기나노입자 등), 방사선과 고온에서 산화를 막기위한 산화방지제, 가황제 및 가황 촉진제를 적절하게 배합하여 만든다.[9-11] 본 챕터에서는 방사선의 간단한 소개, 탄성소재와 방사선의 상호작용, 그리고 소재 별 내방사선 성능 비교, 그리고 내방사선 성능이 가장 우수한 EPDM 소재에 대해서 소개하고자 한다.

3.1. 방사선의 종류 및 특징

방사선이란 공간 혹은 매질 내에서의 에너지의 이동 또는 흐름으로 크게 어떤 매질을 직접 또는 간접적으로 전리 시킬 수 있는 능력을 가진 방사선인 전리방사선(ionizing radiation), 그 보다는 에너지가 낮아 전리 시킬 수 있는 능력이 없는 비전리방사선(nonionizing radiation)으로 나눌 수 있으며, 일반적으로 통용되는 방사선이라 함은 전리방사선을 지칭한다고 할 수 있다(Figure 3). 한편 방사선은

그 형태에 따라 입자방사선과 전자기방사선으로 나눌 수 있으며, 입자방사선은 양성자, 중성자와 같은 질량을 가진 입자 형태의 방사선을, 전자기방사선은 엑스선, 감마선과 같은 전자기파 형태의 방사선을 의미한다. 원자로 내부에서는 핵분열 과정에서 감마선, 중성자선, 베타선 등 다양한 형태의 방사선이 방출되지만 알파선, 베타선 등은 주로 원자로 내부에서 흡수되며, 투과도가 높은 감마선이 주로 원자로 외부로 방출된다. 따라서 원전 부품의 내방사선 특성은 주로 감마선에 대한 내방사선을 의미한다.[12]

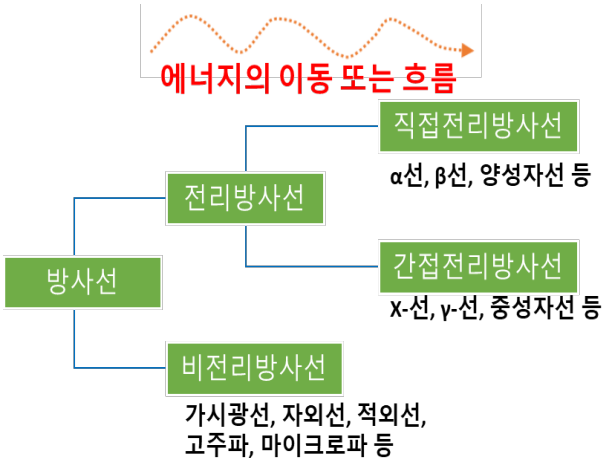


Figure 3. 방사선의 분류

3.2 방사선과 탄성소재의 상호작용

일반적으로 탄성소재를 포함한 고분자에 강한 에너지를 지닌 방사선이 조사되면 자유라디칼 형성(free radical formation), 이온화(ionization), 여기(excitation), 이온중화(ion neutralization)을 포함하는 주반응(primary reaction)이 발생하게 된다. 주반응에서 발생한 자유라디칼에 의해 발생하는 2차적인 반응을 2차반응(secondary reaction)이라고 하며, 2차반응에 의해 가교, 사슬분해, 산화, 그래프팅 등이 발생하게 된다. 이들 중 가교반응과 사슬분해 반응이 가장 지배적으로 발생하며 이 두 반응 중 어떠한 반응이 우세하느냐에 따라서 거시적인 소재의 변화방향이 결정된다(Figure 4)[8].

가교반응과 사슬분해 반응의 속도를 정량적으로 표현하기 위해서 G-value를 고려할 수 있다. G-value는 단위 방사선 에너지 당 화학반응을 일으키는 분자의 수를 나타내는 값으로, G(X)는 가교반응에 대한 속도, G(S)는 사슬분해반응에 대한 속도를 나타낸다. 따라서 이 둘의 비율인 G(S)/G(X) 값을 결정하면 거시적인

반응을 확인할 수 있으며, G(S)/G(X)이 1보다 작은 경우는 가교반응이 우세, 1보다 큰 경우는 분해반응이 우세, G(S), G(X) 값 자체가 작은 경우는 내방사선 성능이 우수하다고 평가할 수 있다. 일반적으로 고무상태(rubbery state)에서는 유리상태(glassy state) 혹은 결정질 상태(crystalline state)에 비해 분자의 유동성이 높아 방사선 조사로 형성된 라디칼들이 서로 만나 결합을 형성할 확률이 높아 주로 가교 반응이 우세하다. 그러므로 일반적인 탄성소재는 방사선에 노출 시 가교반응에 의한 경화가 발생하게 된다. 따라서 방사선 노출 시 가교반응을 최소화하여 경화를 지연시키는 것이 적절한 내방사선 탄성소재 개발을 위한 주요한 전략이다.[8]

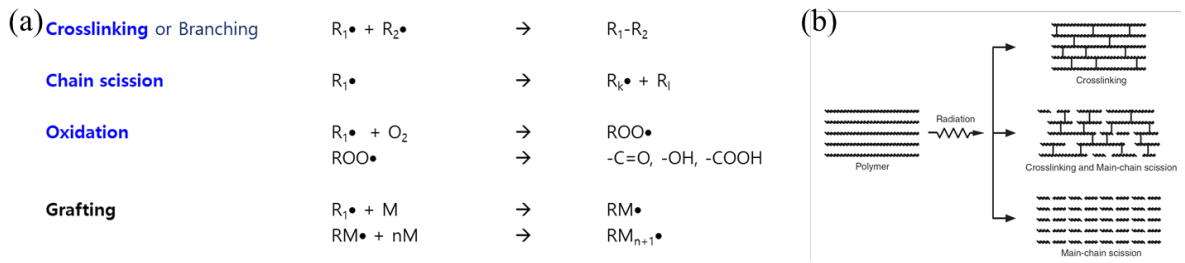


Figure 4. (a) 방사선에 의한 고분자의 2차반응 및 (b) 이에 따른 사슬형상의 변화

3.3 탄성소재 별 내방사선 특성 비교

내방사선 특성이라 함은 방사선에 노출되더라도 본래의 성능을 유지할 수 있는 능력이다. 앞서 유리전이온도가 낮은 탄성소재의 경우 방사선 노출 시 가교반응이 우세하기 때문에 경화가 발생하게 되며, 이에 따라 경도 값은 증가하며 파단신율은 감소하게 된다. 따라서 기관마다 다르지만 일반적으로 초기 대비 파단신율이 50%까지 감소하는 방사선 조사량을 내방사선 성능 지표로 활용한다. Figure 5은 탄성소재 별 내방사선 성능을 비교한 데이터로 EP(ethylene propylene rubber) 계열과 폴리우레탄(polyurethane rubber) 계열이 높은 내방사선 특성을 갖는 것을 알 수 있다.[6] 실제로 내방사선을 요하는 탄성부품에 가장 많이 쓰이는 소재는 EPDM과 FKM계열으로, 높은 내방사선 성능이 요구되는 부품은 주로 EPDM 계열이, 고내열성이 좀더 요구되는 부품은 주로 FKM 계열이 사용된다.

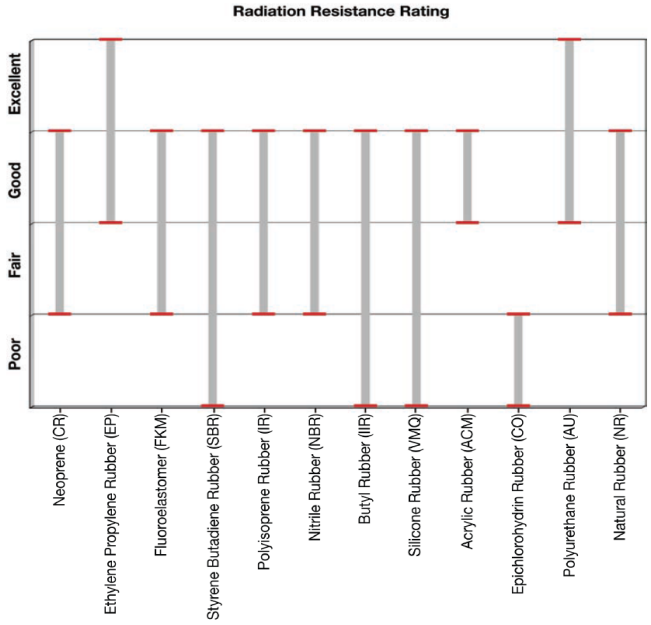


Figure 4-25
Radiation Resistance Comparison of Common Elastomers (Data from Section 3)

Figure 5. 탄성소재 별 내방사선 성능 비교[7]

3.4 EPDM의 내방사선 특성

EPDM은 가장 높은 내방사선 특성을 가지며, 우수한 내열 성능도 가지기 때문에 원전에서 사용되는 실링부품, 다이아프램 등에 가장 많이 사용되고 있다.[13] EPDM이 높은 내방사선 특성을 보이는 이유는 주사슬 내에 불포화결합이 없어 방사선이 조사되더라도 자유라디칼의 형성이 적기 때문이다.[8, 14, 15] 따라서 상대적으로 가교반응이 적게 일어나게 되며 물성의 변화가 적어 우수한 내방사선 능력을 보이게 된다. 특히 가교의 종류, 가교도, 첨가제 비율 등의 변수에 의해 내방사선 성능이 결정된다. 다이엔(diene)이 중합되지 않은 EPM의 경우 불포화결합이 없기 때문에 가장 높은 내방사선 성능을 기대할 수 있으며, 다이엔의 공중합 비율이 증가할수록 상대적으로 자유라디칼의 형성이 용이해지므로 내방사선 성능은 저하되는 경향성을 보인다.

다이엔 단량체의 종류에 따라서도 내방사선 성능이 달라진다. 일반적으로 고리형 구조의 단량체가 더 우수한 내방사선 특성을 보이며, 이에 따라 다이엔 단량체로 DCP(Dicyclopentiadiene)와 EN(Ethylidene norbornene)을 비교 시, DCP로 중합한 EPDM이 더 우수한 내방사선 특성을 보이게 된다. 따라서 적절한 단량체 선택과 가교공정과 여타 물성을 고려한 적절한 공중합 공정 설계가 우수한 내방사선 특성 발현을 위해 상당히 중요하다.

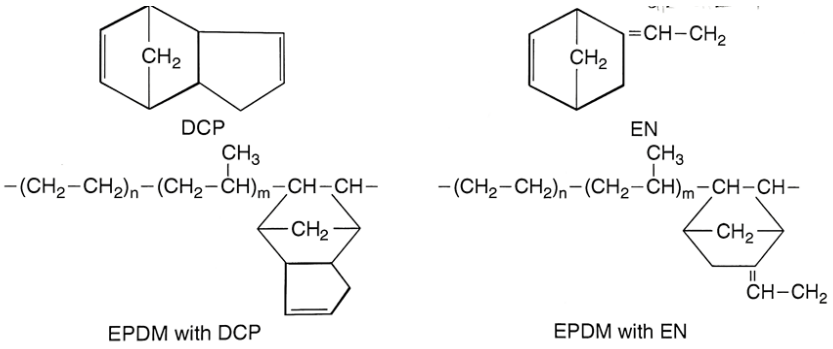


Figure 6. 다이엔 단량체에 따른 EPDM 구조 비교

4. 결론

본 고에서는 원전에서 사용되는 내방사선 탄성부품 소재에 대한 현황을 소개하고, 내방사선 원리에 대한 이론을 소개하고자 하였다. 앞서 살펴본 봐와 같이 탄성부품은 원전 산업에서 필수불가결한 중요한 요소로 향후 원전산업의 성장과 함께 그 수요도 계속해서 증가할 것으로 예측할 수 있다. 그러나 높은 진입장벽과 한정된 수요처로 인해 현재 국내 원전에서 사용되는 탄성부품의 90% 이상은 수입에 의존하고 있는 상황이다.[16] 한편 향후 비약적인 성장이 예상되는 SMR원전의 경우 모듈화로 인한 단순화된 설비 디자인으로 인해 2차계통의 가동온도 및 방사선 노출이 종래 대형원전에 비해 높아질 것으로 예상되기 때문에 탄성부품의 내방사선 및 내열성의 고도화도 요구되고 있다.[17] 따라서 탄성부품의 경쟁력 확보 및 차세대 SMR 원전 수요를 충족하기 위해서는 내방사선 탄성소재 개발을 위한 관심과 함께 체계적인 연구개발을 위한 지원방안에 대한 고민이 필요한 시점이다.

참고문헌

1. “Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050”, IAEA, (2021)
2. “세계원전시장 인사이트: 세계원전정책 동향 업데이트”, 에너지경제연구원, (2022.04.29)
3. “세계원전시장 인사이트: 혁신형 SMR 개발계획 주요내용 및 시사점”, 에너지경제연구원, (2022.07.08)
4. H. Feldman, “Program on Technology Innovation: Polymers in Nuclear

Power Plants", EPRI, (2015)
5. S.-H. Park, W. T. Kim, J. H. Jeong, Demand characteristics of component parts of Korean nuclear power plants depending on reactor type at the operation stage. *Ann. Nucl. Energy* 155, 108154 (2021)
6. "원전 보조기기 시장 소개자료(보조기기, 진출방법, 진입장벽, 기기검증)" 한국기계연구원 원전기기검증연구단, (2020)
7. G. Toman, "Plant Support Engineering: Elastomer Handbook for Nuclear Power Plants", EPRI, (2007)
8. K. Makuuchi, S. Cheng "Radiation Processing of Polymer Materials and its Industrial Applications", WILEY, (2012)
9. W. Poltabtim, E. Wimolmala, K. Saenboonruang, Properties of lead-free gamma-ray shielding materials from metal oxide/EPDM rubber composites. *Radiat. Phys. Chem.* 153, 1 (2018)
10. A. I. Wozniak, V. S. Ivanov, O. A. Zhdanovich, V. I. Nazarov, A. S. Yegorov, Modern Approaches to Polymer Materials Protecting from Ionizing Radiation. *Orient. J. Chem*. 33, 2148 (2017)
11. V.D. Cherkasov, V.V. Avdonin, Y.V. Yurkin, Y.P. Scherbak, M.E. Buzoverya, I.A. Karpov, V.O. Pilshchikov, "Research of Radiation Resistance of Polymer Composite Materials", *Mater. Phys. Mech*. 44, 433 (2020)
12. A. Zenoni et al., Radiation resistance of elastomeric O-rings in mixed neutron and gamma fields: Testing methodology and experimental results. Rev. Sci. *Instrum*. 88, 113304 (2017)
13. C. Woo, C. - S. Song, H. - C. Lee, J. - W Kwon, "Rubber Material Development and Performance Evaluation of Diaphragm Seal for Steam Generator Nozzle Dam", Elastomers and Composites, 55, 222 (2020)
14. P. Pourmand, "Long-term Performance of Polymeric Materials in Nuclear Power Plants" Doctoral thesis, KTH Royal Institute of Technology (2017)
15. A. Rivaton, S. Cambon, J. L. Gardette, Radiochemical ageing of EPDM elastomers. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B Nucl. Instrum. Meth. B* 227, 343 (2005)
16. "2018년 물자수급계획", 한국수력원자력㈜, (2018)
17. L. M. Krall, A. M. Macfarlane, R. C. Ewing, Nuclear waste from small modular reactors. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A*. 119, e2111833119 (2022)