फ्यूल सेल की महंगी झिल्ली का विकल्प: एसिड-डोप निकेल MOF से प्रोटॉन-चालकता में एक कोटि की छलांग

विज्ञान एवं प्रौद्योगिकी / ऊर्जा – आंतरिक (मुख्य परीक्षा: सामान्य अध्ययन-III) | समाचार संदर्भ: 22 अक्टूबर 2026 (रिसर्च मैटर्स) | प्राथमिक अध्ययन: जर्नल ऑफ एनर्जी स्टोरेज, खंड 182, लेख 124789 (ऑनलाइन सितंबर 2026; प्रिंट-अंक दिसंबर 2026) | प्रकाशित: 24 अक्टूबर 2026

खबरों में क्यों

हाइड्रोजन-ईंधन सेल (फ्यूल सेल) की बात होती है तो अंदर की एक पतली झिल्ली सबसे महंगी और सबसे नाजुक कड़ी होती है – प्रोटॉन-एक्सचेंज मेम्ब्रेन, जिसका बाजार-मानक दशकों से नेफियॉन नामक फ्लोरीन-युक्त पॉलिमर है। भारतीय शोधकर्ताओं की एक अंतर्राष्ट्रीय टीम ने अब इसी झिल्ली का एक संभावित विकल्प पेश किया है: निकेल-आधारित धातु-ऑर्गेनिक ढाँचे (मेटल-ऑर्गेनिक फ्रेमवर्क, एमओएफ) – सुव्यवस्थित छिद्रयुक्त क्रिस्टल, जिनमें फॉस्फोरिक एसिड भरकर (डोपिंग) प्रोटॉन-चालकता रिकॉर्ड स्तर तक बढ़ाई गई है। अध्ययन जर्नल ऑफ एनर्जी स्टोरेज में छपा है (खंड 182, लेख 124789; ऑनलाइन सितंबर 2026, प्रिंट-अंक दिसंबर 2026); समाचार-कवरेज 22 अक्टूबर 2026 को आई। तिथि-परतें ध्यान से देखें: पेपर ऑनलाइन आए और कवरेज आने में लगभग एक माह का अंतर है – यह 'ताजा प्रयोग' नहीं, प्रकाशित काम की विलंबित सार्वजनिक चर्चा है।

क्या है ईंधन सेल

ईंधन सेल वह उपकरण है जो हाइड्रोजन के रासायनिक ऊर्जा को सीधे बिजली में बदलता है – उपोत्पाद केवल पानी और ऊष्मा। अमेरिकी ऊर्जा विभाग के अनुसार प्रोटॉन-एक्सचेंज मेम्ब्रेन (पीईएम) ईंधन सेल वाहनों के लिए सबसे उपयुक्त माने जाते हैं, क्योंकि ये कम तापमान पर चलते हैं और भार-बदलाव पर तुरंत प्रतिक्रिया देते हैं। इनकी दिल की झिल्ली – जिससे होकर प्रोटॉन गुजरते हैं – ही लागत और स्थायित्व की सबसे बड़ी रुकावट रही है: नेफियॉन महंगा है, बनाना कठिन है, और ऊँचे तापमान या कम आर्द्रता में इसका प्रदर्शन गिर जाता है। कोई सस्ता, मजबूत और अधिक चालक ठोस प्रोटॉन-चालक मिल जाए तो ईंधन सेल की किफायत सीधे बेहतर होती है – यही इस शोध का मूल दावा है।

नीति-परत भी सीधी है: कैबिनेट ने 4 जनवरी 2023 को राष्ट्रीय हरित हाइड्रोजन मिशन को 19,744 करोड़ रुपये की प्रारंभिक व्यवस्था के साथ मंजूरी दी थी – 2030 तक कम से कम 5 मिलियन टन वार्षिक हरित-हाइड्रोजन उत्पादन-क्षमता और उससे जुड़ी लगभग 125 गीगावॉट नवीकरणीय क्षमता का लक्ष्य। मिशन में अनुसंधान के लिए अलग से 400 करोड़ रुपये हैं। हाइड्रोजन 'बनाना' मिशन का एक हिस्सा है; उसे 'इस्तेमाल' करने वाले उपकरणों – इलेक्ट्रोलाइज़र और ईंधन सेल – की स्वदेशी सामग्री उतनी ही जरूरी है। ऐसे में भारतीय प्रयोगशालाओं से आई झिल्ली-सामग्री की खोज परीक्षा-दृष्टि से सामान्य अध्ययन-III की विज्ञान-प्रौद्योगिकी और ऊर्जा-नीति दोनों कड़ियों को जोड़ती है।

पृष्ठभूमि: नेफियॉन का आधिपत्य और उसकी सीमाएँ

पीईएम ईंधन सेल में ऐनोड पर हाइड्रोजन प्रोटॉन और इलेक्ट्रॉन में बँटती है; इलेक्ट्रॉन बाहरी परिपथ से बिजली बनाते हैं, जबकि प्रोटॉन झिल्ली के भीतर से कैथोड तक पहुँचकर ऑक्सीजन और इलेक्ट्रॉन से मिलकर पानी बनाते हैं। झिल्ली का काम प्रोटॉन को तेजी से, लेकिन गैसों को बिना घुलने-मिलने दिए, पार करना है। नेफियॉन यह काम दशकों से कर रहा है, परन्तु तीन कीमतों पर: यह फ्लोरीन-आधारित बहुलक है, निर्माण महंगा और जटिल है; नमी पर निर्भर है – सूखी स्थितियों में चालकता घटती है; और ऊँचे तापमान पर स्थायित्व सीमित रहता है। इसीलिए पिछले दो दशकों से वैकल्पिक ठोस प्रोटॉन-चालकों – और विशेष रूप से क्रिस्टलीय छिद्रयुक्त सामग्रियों – की तलाश जारी है।

धातु-ऑर्गेनिक ढाँचे (एमओएफ) इसी खोज के केंद्र में हैं। ये धातु-आयनों और कार्बनिक लिंकरों से बने नियमित, जालीदार क्रिस्टल हैं, जिनके छिद्र आयनों के लिए तैयार गलियारों जैसे होते हैं। प्रोटॉन-चालन दो रास्तों से होता है: 'आंतरिक' – जहाँ प्रोटॉन हाइड्रोजन-बंधों की जंजीर पर कूदते हैं (ग्रॉटहुस क्रियाविधि), और 'बाह्य' – जहाँ पानी या एसिड जैसे वाहक प्रोटॉन ढोते हैं। अच्छे डिज़ाइन का ढाँचा दोनों रास्तों को एक साथ मजबूत कर सकता है।

तरीका: दो क्रिस्टल, एक एसिड-डोपिंग

भारतीय एसोसिएशन फॉर द कल्टिवेशन ऑफ साइंस (आईएसीएस, कोलकाता), भारतीय प्रौद्योगिकी संस्थान खड़गपुर, जादवपुर विश्वविद्यालय और चेक गणराज्य के ऑस्ट्रावा विश्वविद्यालय की संयुक्त टीम ने निकेल-आधारित दो एकल-क्रिस्टल एमओएफ बनाए: Ni-NDC-BPY (दो-आयामी संरचना) और Ni-NDC-BPYH (त्रि-आयामी खुली जाल-संरचना)। विधि सॉल्वोथर्मल थी – धातु-लवण और कार्बनिक लिंकर को विलयन में मिलाकर बंद शीशियों में गर्म करने से ब्लॉक-आकार के सूक्ष्म-क्रिस्टल बने। फिर दोनों को फॉस्फोरिक एसिड से डोप किया गया – एसिड के अणु छिद्रों में बैठकर अतिरिक्त गतिशील प्रोटॉन और नए परिवहन-मार्ग बनाते हैं।

समूह ने एकल-क्रिस्टल एक्स-रे विवर्तन से परमाणु-व्यवस्था पढ़ी, थर्मोग्रेविमेट्रिक विश्लेषण और फूरियर-ट्रांसफॉर्म इन्फ्रारेड स्पेक्ट्रोस्कोपी से रासायनिक स्थायित्व जाँचा, और फील्ड-इमिशन स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी से आकृति देखी। जाँचों ने पुष्ट की कि एसिड छिद्रों में समा गया और ढाँचे की संरचनात्मक अखंडता बरकरार रही। प्रोटॉन-चालकता का मापन इलेक्ट्रोकेमिकल इम्पिडेंस स्पेक्ट्रोस्कोपी से हुआ।

मिला क्या: एक कोटि की छलांग, चार दिन की कसौटी

कवरेज के अनुसार एसिड-डोप किए गए त्रि-आयामी ढाँचे की प्रोटॉन-चालकता बिना-डोप ढाँचे से पूरी एक कोटि (लगभग दस गुना क्रम) अधिक पाई गई, और समान परिस्थितियों में रिपोर्ट किए गए अनेक अन्य एमओएफ के रिकॉर्ड से आगे निकली। सक्रियण ऊर्जा मात्र 0.16 इलेक्ट्रॉन-वोल्ट निकली – यानी प्रोटॉन ढाँचे के भीतर लगभग बिना रुके फिसलते हैं। कारण संरचना में दबा है: त्रि-आयामी ढाँचे में जल-स्नेही छिद्र और नाइट्रोजन-युक्त स्थल नमी खींचकर सघन हाइड्रोजन-बंध जाल बुनते हैं, और एसिड-डोपिंग उस पर अतिरिक्त प्रोटॉन-दाता जोड़ देती है।

स्थायित्व के आँकड़े भी उल्लेखनीय हैं: चार दिन तक उच्च तापमान और उच्च आर्द्रता की कठोर परीक्षा में चालकता में केवल लगभग 6 प्रतिशत की गिरावट आई, और pH 4.0 से 10.0 की चौड़ी रेंज में ढाँचा रासायनिक रूप से स्थिर रहा। एक छोटा व्यापार-निश्चय भी दर्ज है: एसिड-डोपिंग से छिद्रों का आंशिक अवरोध होने के कारण जल-वाष्प अवशोषण थोड़ा घटा – परन्तु प्रोटॉन-दाता स्थलों की बढ़ोतरी इस कमी पर भारी पड़ी।

सीमाएँ और सावधानियाँ

कई बातें ईमानदारी से कहनी जरूरी हैं। पहली, पेपर का पूर्ण पाठ पेड-एक्सेस है – हम पूरा पाठ नहीं पढ़ सके (प्रकाशक-पृष्ठ अवरोधित रहा); यहाँ के आँकड़े समाचार-कवरेज और क्रॉसरेफ अभिलेख पर आधारित हैं। दूसरी, 'रिकॉर्ड' दावा 'समान परिस्थितियों में रिपोर्ट अन्य एमओएफ' के संदर्भ में है – प्रोटॉन-चालकता तापमान और आर्द्रता पर अत्यंत निर्भर होती है, इसलिए भिन्न-भिन्न शर्तों वाले अध्ययनों की सीधी तुलना भ्रामक हो सकती है। तीसरी, यह सामग्री-स्तर की सफलता है – इस ढाँचे से बनी पूर्ण झिल्ली या चलता हुआ ईंधन-सेल उपकरण कवरेज में रिपोर्ट नहीं हुआ; मेम्ब्रेन-इलेक्ट्रोड असेम्बली में उतरना अलग इंजीनियरिंग चुनौती है। चौथी, एकल-क्रिस्टल सॉल्वोथर्मल संश्लेषण प्रयोगशाला-पैमाने की विधि है – औद्योगिक मात्रा में उत्पादन और लागत का आकलन भविष्य का कार्य है, जैसा शोधकर्ता स्वयं मानते हैं। पाँचवीं, नेफियॉन से सीधी संख्यात्मक तुलना (समान परीक्षा-शर्तों में) कवरेज में नहीं आई – 'विकल्प' अभी संभावना-स्तर का दावा है। छठी, स्वतंत्र कवरेज केवल एक स्रोत (रिसर्च मैटर्स) का है; अन्य वेब-रिपोर्ट उसी की सिंडिकेटेड नकल हैं। सातवीं, यह अंतर्राष्ट्रीय सहयोग का काम है – चार संस्थानों में से एक विदेशी (ऑस्ट्रावा) है; 'भारतीय खोज' कहते समय सहयोग की परत याद रखें।

आगे क्या देखना होगा?

तीन चीजें: (1) ढाँचे से वास्तविक झिल्ली – मिश्रित-आव्यूह (मिक्स्ड-मैट्रिक्स) मेम्ब्रेन में एमओएफ कणों का समावेश और उसकी पीईएम ईंधन सेल में चाल-परीक्षा; (2) उत्पादन-विस्तार – सॉल्वोथर्मल क्रिस्टल-वृद्धि से सतत, पैमाने-योग्य संश्लेषण की ओर, और लागत-लेखा; (3) बिना-आर्द्रता और उच्च-तापमान परीक्षा – वही परिस्थितियाँ जहाँ नेफियॉन कमजोर पड़ता है और जहाँ इस ढाँचे का दावा सबसे अधिक परखा जाएगा। देशी-परत में यह काम हरित हाइड्रोजन मिशन के 'उपयोग' सिरे की सामग्री-आत्मनिर्भरता से जुड़ता है – ईंधन सेल का कमजोर अंग घर में बने, यही दिशा है।

तिथियों का क्रम

राष्ट्रीय हरित हाइड्रोजन मिशन की कैबिनेट-स्वीकृति 4 जनवरी 2023। पेपर क्रॉसरेफ में दर्ज/अनुक्रमित 23 सितंबर 2026; जर्नल का प्रिंट-अंक दिसंबर 2026; विज्ञान-मीडिया कवरेज 22 अक्टूबर 2026। तीनों तिथियाँ अलग-अलग परतें हैं: प्रकाशन-तिथि (ऑनलाइन), अंक-तिथि (प्रिंट) और समाचार-तिथि – एक ही मानकर न पढ़ें।

पाठक के लिए संदर्भ-बिंदु

तीन बातें याद रखें। पहली, प्रोटॉन-एक्सचेंज मेम्ब्रेन ईंधन सेल का हृदय है; नेफियॉन दशकों का मानक, पर महंगा और आर्द्रता-निर्भर – यही तुलना-बिंदु है। दूसरी, एमओएफ धातु-आयन और कार्बनिक लिंकर के नियमित छिद्रयुक्त क्रिस्टल हैं; 'डोपिंग' का अर्थ यहाँ छिद्रों में अतिथि-अणु (फॉस्फोरिक एसिड) भरना है – ग्रॉटहुस क्रियाविधि और सक्रियण ऊर्जा दो परीक्षा-योग्य शब्द हैं। तीसरी, संस्था-युग्म: आईएसीएस कोलकाता (देश की सबसे पुरानी शोध-संस्थाओं में) और आईआईटी खड़गपुर की भूमिका-अंतर प्रिलिम्स में पूछी जा सकती है; ऑस्ट्रावा विश्वविद्यालय चेक गणराज्य का सहयोगी है।

मुख्य परीक्षा अभ्यास प्रश्न

राष्ट्रीय हरित हाइड्रोजन मिशन के केवल उत्पादन-लक्ष्यों से आगे बढ़कर, 'उपयोग-सिरे' की प्रौद्योगिकियों (जैसे ईंधन सेल सामग्री) में स्वदेशी अनुसंधान के महत्व का मूल्यांकन कीजिए। ऐसे अनुसंधानों के प्रयोगशाला-सफलता से औद्योगिक उपयोग तक की दूरी में आने वाली प्रमुख चुनौतियाँ क्या हैं? (सामान्य अध्ययन-III: विज्ञान एवं प्रौद्योगिकी / ऊर्जा; 250 शब्द, 15 अंक)

उत्तर की रूपरेखा:

भूमिका में: राष्ट्रीय हरित हाइड्रोजन मिशन का संदर्भ रखें: कैबिनेट की 4 जनवरी 2023 की मंजूरी, 19,744 करोड़ रुपये की प्रारंभिक व्यवस्था, 2030 तक कम से कम 5 मिलियन टन वार्षिक हरित-हाइड्रोजन उत्पादन-क्षमता और लगभग 125 गीगावॉट नवीकरणीय क्षमता का लक्ष्य, और अनुसंधान के लिए अलग 400 करोड़ रुपये। फिर बताएँ कि हाइड्रोजन बनाना मिशन का एक हिस्सा है और उसे इस्तेमाल करने वाले उपकरणों, जैसे इलेक्ट्रोलाइज़र और ईंधन सेल, की स्वदेशी सामग्री उतनी ही जरूरी है। उदाहरण के रूप में निकेल-आधारित धातु-ऑर्गेनिक ढाँचे (एमओएफ) का अध्ययन रखें, जिसे फॉस्फोरिक एसिड से डोप किया गया और जो नेफियॉन झिल्ली का संभावित विकल्प है (जर्नल ऑफ एनर्जी स्टोरेज, खंड 182)।

मुख्य भाग में: महत्व का मूल्यांकन करें: ईंधन सेल की प्रोटॉन-एक्सचेंज झिल्ली लागत और स्थायित्व की सबसे बड़ी रुकावट है; नेफियॉन महंगा है, नमी पर निर्भर है और ऊँचे तापमान पर उसका स्थायित्व सीमित है। कवरेज के निष्कर्ष रखें: डोप किए गए त्रि-आयामी ढाँचे की प्रोटॉन-चालकता बिना-डोप ढाँचे से एक कोटि अधिक, सक्रियण ऊर्जा 0.16 इलेक्ट्रॉन-वोल्ट, चार दिन की कठोर परीक्षा में चालकता में लगभग 6 प्रतिशत की गिरावट और pH 4.0 से 10.0 में रासायनिक स्थिरता। चुनौतियाँ बताएँ: कवरेज में पूर्ण झिल्ली या चलता ईंधन-सेल उपकरण रिपोर्ट नहीं हुआ और मेम्ब्रेन-इलेक्ट्रोड असेम्बली अलग इंजीनियरिंग चुनौती है; एकल-क्रिस्टल सॉल्वोथर्मल संश्लेषण प्रयोगशाला-पैमाने की विधि है, औद्योगिक उत्पादन और लागत का आकलन बाकी है; नेफियॉन से समान शर्तों में सीधी तुलना नहीं आई

और रिकॉर्ड-दावा शर्तों पर निर्भर है; बिना-आर्द्रता और उच्च-तापमान परीक्षा बाकी है। यह भी लिखें कि पूर्ण पाठ नहीं पढ़ा जा सका और काम चार संस्थानों का है, जिनमें एक विदेशी (ऑस्ट्रावा विश्वविद्यालय, चेक गणराज्य) है।

निष्कर्ष में: निष्कर्ष में कहें कि मिशन का उपयोग-सिरा सामग्री-आत्मनिर्भरता पर टिकता है, पर नेफियॉन का विकल्प अभी संभावना-स्तर का दावा है। आगे की दिशा बताएँ: मिश्रित-आव्यूह झिल्ली में एमओएफ कणों का परीक्षण, पैमाने-योग्य संश्लेषण और लागत-लेखा। इन चरणों के परिणाम या समय-सीमा अपने मन से न जोड़ें।

स्रोत

- प्राथमिक पेपर: Malakar B, Ghanti B, Bhattacharjee S, Patra R, Das H, Ball K, Banerjee S, Bhaumik A, “Metal-coordinated water-assisted enhanced proton conductivity of robust Ni(II)-based 3D/2D metal-organic frameworks”, Journal of Energy Storage, खंड 182, लेख 124789, DOI 10.1016/j.est.2026.124789 (पेड-एक्सेस; पूर्ण पाठ नहीं पढ़ा जा सका – विवरण कवरेज पर आधारित)।
- क्रॉसरेफ अभिलेख: api.crossref.org/works/10.1016/j.est.2026.124789 – लेखक-सूची, खंड/लेख-संख्या, ऑनलाइन दर्ज 23 सितंबर 2026, प्रिंट-अंक दिसंबर 2026 (तिथि-पुष्टि)।
- रिसर्च मैटर्स (22 अक्टूबर 2026): “New acid-doped metal-organic frameworks significantly improve hydrogen fuel cell efficiency” – मुख्य कवरेज; प्रायोगिक विवरण, चालकता-कोटि, 0.16 eV, 6 प्रतिशत गिरावट, pH रेंज, संस्था-सूची यहीं से।
- अमेरिकी ऊर्जा विभाग, “Fuel Cell Basics” (energy.gov) – पीईएम ईंधन-सेल कार्यप्रणाली और वाहन-उपयुक्तता का संदर्भ।
- प्रेस सूचना ब्यूरो (4 जनवरी 2023, Release ID 1888547): राष्ट्रीय हरित हाइड्रोजन मिशन – 19,744 करोड़ रुपये, SIGHT, 2030 लक्ष्य (5 MMT, ~125 GW)।
- आईआईटी खड़गपुर प्रोटॉन-चालन प्रयोगशाला-पृष्ठ (क्षेत्र-संदर्भ; इस पेपर की सूची वहाँ नहीं – संस्था-पुष्टि कवरेज पर ही निर्भर)।
- सीमाएँ: पूर्ण पाठ अपठित; ‘रिकॉर्ड’ दावा समान-परिस्थिति तुलना तक सीमित; सामग्री-स्तर परिणाम, उपकरण-प्रदर्शन नहीं; स्वतंत्र कवरेज एकल; संस्करण-तिथियाँ (ऑनलाइन/प्रिंट/कवरेज) अलग; advanceh2.com रिपोर्ट सिंडिकेटेड नकल है, अलग स्रोत नहीं।

अक्सर पूछे जाने वाले प्रश्न (FAQ)

संक्षिप्त उत्तर: ईंधन सेल वह उपकरण है जो हाइड्रोजन के रासायनिक ऊर्जा को सीधे बिजली में बदलता है – उपोत्पाद केवल पानी और ऊष्मा। अमेरिकी ऊर्जा विभाग के अनुसार प्रोटॉन-एक्सचेंज मेम्ब्रेन (पीईएम) ईंधन सेल वाहनों के लिए सबसे उपयुक्त माने जाते हैं, क्योंकि ये कम तापमान पर चलते हैं और भार-बदलाव पर तुरंत प्रतिक्रिया देते हैं।

प्रश्न: ईंधन सेल क्या है?

ईंधन सेल वह उपकरण है जो हाइड्रोजन के रासायनिक ऊर्जा को सीधे बिजली में बदलता है – उपोत्पाद केवल पानी और ऊष्मा। अमेरिकी ऊर्जा विभाग के अनुसार प्रोटॉन-एक्सचेंज मेम्ब्रेन (पीईएम) ईंधन सेल वाहनों के लिए सबसे उपयुक्त माने जाते हैं, क्योंकि ये कम तापमान पर चलते हैं और भार-बदलाव पर तुरंत प्रतिक्रिया देते हैं।

प्रश्न: पीईएम ईंधन सेल में झिल्ली का क्या काम है?

पीईएम ईंधन सेल में ऐनोड पर हाइड्रोजन प्रोटॉन और इलेक्ट्रॉन में बँटती है; इलेक्ट्रॉन बाहरी परिपथ से बिजली बनाते हैं, जबकि प्रोटॉन झिल्ली के भीतर से कैथोड तक पहुँचकर ऑक्सीजन और इलेक्ट्रॉन से मिलकर पानी बनाते हैं। झिल्ली का काम प्रोटॉन को तेजी से, लेकिन गैसों को बिना घुलने-मिलने दिए, पार करना है।

प्रश्न: धातु-ऑर्गेनिक ढाँचे क्या हैं?

धातु-ऑर्गेनिक ढाँचे (एमओएफ) इसी खोज के केंद्र में हैं। ये धातु-आयनों और कार्बनिक लिंकरों से बने नियमित, जालीदार क्रिस्टल हैं, जिनके छिद्र आयनों के लिए तैयार गलियारों जैसे होते हैं।