

हायड्रोजन वाहन नेणाच्या धातूच्या सद्य चाचणी पद्धती सदोष का? : आयआयटी मुंबईच्या अभ्यासातून उलगडा

आयआयटी मुंबईच्या संशोधकांनी शोधले की हायड्रोजन-वहन चाचण्यांमधील त्रुटींमुळे या चाचण्यांतून मिळालेला डेटा कसा खात्रीशीर नसतो. या शोधामुळे हायड्रोजन-इंधन चलित विश्वासाठी आवश्यक असलेली अत्यंत सुरक्षित पायाभूत सुविधा उभारण्यासाठी एक नवीन मार्गदर्शक आराखडा उपलब्ध झाला आहे.



हायड्रोजन वायूच्या साठवणूकीची प्रातिनिधिक प्रतिमा. श्रेय: गुब्बी लॅब्स

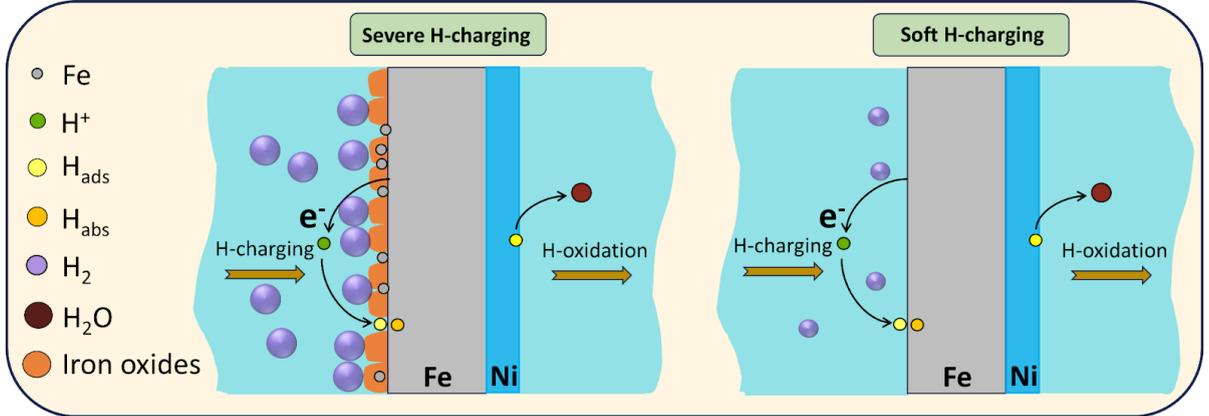
हवामान बदलाचे संकट आणि तीव्र होत जाणारे भू-राजकीय तणाव यांमुळे जगभरातील राष्ट्रांना आता स्वच्छ ऊर्जा स्रोतांकडे वेगाने वाटचाल करणे भाग पडले आहे. या संदर्भात आपल्या सध्याच्या नैसर्गिक वायूच्या नेटवर्कमध्ये हायड्रोजन मिसळणे (ब्लेंडिंग) एक आशादायक मार्ग ठरला आहे. यामुळे हजारों मैल नवीन पायाभूत सुविधा त्वरित उभ्या न करताही नैसर्गिक वायूचा वापर कमी करणे आणि कर्ब उत्सर्जनात लक्षणीय घट करणे शक्य होऊ शकते. भारताने या दिशेने आधीच पाऊल उचलले असून, [एनटीपीसी लिमिटेडने २०२३ मध्ये भारतातील पहिल्या 'ग्रीन हायड्रोजन ब्लेंडिंग' प्रकल्पाची यशस्वी सुरुवात केली](#) आहे. सूरतमधील एनटीपीसी कवास टाऊनशिपमध्ये पाईपड नॅचरल गॅस अर्थात पीएनजी नेटवर्कच्या माध्यमातून सुरू झालेला हा प्रकल्प आता मोठ्या प्रमाणावर विस्तारला आहे.

हायड्रोजनचे संचयन आणि वहन करणे मात्र अत्यंत कठीण काम आहे. विश्वातील सर्वात लहान अणू असल्याने हायड्रोजन कोणत्याही घन पदार्थात झिरपू शकतो, अगदी सध्याच्या पाईपलाईनच्या स्टीलच्या अर्थात पोलादी भिंतींमधूनही तो आरपार जाऊ शकतो. हायड्रोजन संमिश्रणाचा हा उपक्रम यशस्वीपणे राबवण्यासाठी संशोधकांना अश्या अचूक चाचणी पद्धती विकसित कराव्या लागतील, ज्याद्वारे तडकण्याचा किंवा गळतीचा धोका निर्माण होण्यापूर्वी विविध प्रकारचे पोलादी पाईप नेमका किती हायड्रोजन हाताळू शकतील हे निश्चित करता येईल. या संदर्भात सध्या वापरल्या जाणाऱ्या अनेक चाचणी पद्धती बऱ्याचदा त्रुटीपूर्ण निष्कर्ष देतात. शास्त्रज्ञांकडे या त्रुटींचे स्पष्टीकरण देण्यासाठी आतापर्यंत कोणतेही उत्तर नव्हते.

एका [नवीन अभ्यासामध्ये](#), भारतीय तंत्रज्ञान संस्था (आयआयटी) मुंबई आणि जर्मनीतील मॅक्स प्लँक इन्स्टिट्यूट फॉर सस्टेनेबल मटेरियल्स येथील संशोधकांनी धातूमधील हायड्रोजन विसरणाच्या (डिफ्युजन) सध्याच्या चाचणी पद्धती अनेकदा का अपयशी ठरतात याचे कारण शोधून काढले आहे. संशोधक सुधा गौतम, मायकेल रोहवेर्डर आणि दंडपाणी विजयशंकर यांनी 'हायड्रोजन एम्ब्रिटलमेंट' नावाच्या प्रक्रियेचा अभ्यास केला, ज्यामध्ये हायड्रोजनचे अणू उच्च क्षमतेच्या पोलादामध्ये झिरपतात, ज्यामुळे पोलाद ठिसूळ बनते. सदर अभ्यासातून असे दिसून आले आहे की, ही ठिसूळ होण्याची प्रक्रिया समजून घेण्यासाठी वापरल्या जाणाऱ्या चाचण्याच कृत्रिम त्रुटी आणि दोष निर्माण करण्यास कारणीभूत आहेत, ज्यामुळे चुकीचे निष्कर्ष निघतात.

संशोधकांनी इलेक्ट्रोकेमिकल परमिएशन म्हणजे विद्युत-रासायनिक पारगमन तंत्रावर आपले लक्ष केंद्रित केले. या मांडणीमध्ये, ज्या नमुन्याची चाचणी करायची आहे तो नमुना दोन विद्युत-रासायनिक घटकांच्या मध्ये ठेवला जातो. यातील एका बाजूला विद्युत-रासायनिक प्रक्रियेद्वारे हायड्रोजन तयार केला जातो आणि तो त्या नमुन्यात भरला जातो, ज्यामुळे हायड्रोजनचे अणू दुसऱ्या बाजूला विसरित (डिफ्युज) होऊ शकतात. दुसऱ्या बाजूला असलेले शोधक यंत्र (डिटेक्टर), त्या नमुन्यातून नेमका किती हायड्रोजन यशस्वीपणे आरपार गेला आहे याचे मोजमाप करते. ही पद्धत प्रस्थापित असली तरी, या चाचणीतून मिळणारे निष्कर्ष गणितीय अंदाजांशी सुसंगत नव्हते.

“डिटेक्टरच्या बाजूला स्थिर स्थिती असताना विसरित होणाऱ्या हायड्रोजनचे प्रमाण, म्हणजेच 'हायड्रोजन परमिएशन फ्लक्स' किंवा हायड्रोजनचा पारगम्यता प्रवाह दर, काळाप्रमाणे बदलणे अपेक्षित नाही. मात्र, आमच्या निरीक्षणात असे दिसून आले की हा फ्लक्स कमी होत जातो आणि त्याचे नेमके मूळ कारण शोधणे हेच आमचे ध्येय होते,” असे प्राध्यापक विजयशंकर यांनी स्पष्ट केले.



'तीव्र' (डावीकडे) आणि 'सौम्य' (उजवीकडे) हायड्रोजन चार्जिंग करंटमुळे हायड्रोजनचे बुडबुडे तयार होण्यावर आणि परिणामी लोखंडाच्या गंजण्यावर होणारा परिणाम स्पष्ट करणारी आकृती.

श्रेय: सदर अभ्यासाचे लेखक. संदर्भ: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2025.113449>

जेव्हा संशोधकांच्या गटाने हायड्रोजन चार्जिंगसाठी उच्च विद्युत प्रवाहाचा वापर केला, तेव्हा स्कॅनिंग इलेक्ट्रॉन मायक्रोस्कोपी आणि रामन स्पेक्ट्रोस्कोपीच्या सहाय्याने त्यांना असे दिसून आले की पोलादाच्या पृष्ठभागाचे क्षरण झाले असून त्यावर गंजाचा एक पातळ थर तयार झाला आहे. ह्या गंजाचा अडसर निर्माण झाल्यामुळे शोधक यंत्राद्वारे मोजल्या जाणाऱ्या हायड्रोजन फ्लक्सवर परिणाम होत होता. इलेक्ट्रॉन बॅक-स्कॅटर्ड डिफ्रॅक्शनचा वापर करून संशोधकांना असे आढळले की उच्च विद्युत

प्रवाहामुळे 'डिसलोकेशन' अर्थात विस्थापन नावाचे सूक्ष्म दोष निर्माण झाले. हे दोष म्हणजे पोलादाच्या स्फटिक संरचनेतील अनियमितता असून त्यामुळे हायड्रोजनचे अणू पोलादामध्ये अडकतात.

“आम्हाला हायड्रोजन चार्जिंगच्या बाजूला लोखंडाच्या क्षरणामुळे तयार झालेले गंजाचे अंश आणि नव्याने निर्माण झालेली विस्थापने दिसून आली. असे दिसते की तीव्र इलेक्ट्रोकेमिकल हायड्रोजन चार्जिंगमुळे भूमितीयदृष्ट्या आवश्यक विस्थापनांची (ज्योमेट्रिकली नेसेसरी डिस्लोकेशन; जीएनडी) घनता वाढते. आपले आत्ताचे आकलन केवळ वाढत्या जीएनडीचा सहसंबंध नमुन्याच्या पृष्ठभागावरील फोड निर्माण होण्याशी जोडण्यापर्यंत मर्यादित आहे, परंतु फोड प्रत्यक्षात कसे तयार होतात यासाठी अजून सखोल अभ्यासाची गरज आहे,” असे सुधा गौतम यांनी नमूद केले.

संशोधक पथकाला असेही आढळले की उच्च विद्युत प्रवाहामुळे पोलादाच्या पृष्ठभागावर हायड्रोजनचे बुडबुडे तयार होतात, ज्यामुळे मोजमापांमध्ये आणखी त्रुटी निर्माण होतात. प्रा. विजयशंकर यांच्या मते, “विद्युत-रासायनिक चार्जिंग दरम्यान पोलादाच्या पृष्ठभागावर तयार होणाऱ्या अणु रूपातील हायड्रोजनच्या काही भागाचे पुनर्संयोजन होऊन हायड्रोजनचे बुडबुडे तयार होतात. हायड्रोजन बुडबुड्यांची ही अतितीव्र प्रक्रिया इलेक्ट्रोलाईटमध्ये 'ओहमिक ड्रॉप्स' निर्माण करते आणि त्यामुळे पृष्ठभागावरील विद्युत-रासायनिक नियंत्रणात बिघाड होतो. यामुळे आणि लोखंडाच्या पृष्ठभागावरील उच्च पीएच मुळे लोखंड गंजू शकते, ज्याचा परिणाम डिटेक्टरद्वारे मोजल्या जाणाऱ्या हायड्रोजन फ्लक्सवर होतो.”

विशेष म्हणजे, संशोधक गटाला आढळले की या दोन्ही मर्यादांवरील उपाय आहे हायड्रोजन तयार करण्यासाठी वापरला जाणारा विद्युत प्रवाह कमी करून 'सौम्य' चार्जिंगची स्थिती निर्माण करणे. “आम्ही मिलिअॅंपिअर एवजी मायक्रोअॅंपिअर इतक्या कमी विद्युत प्रवाहाचा वापर केला. याचा अर्थ असा की कमी प्रमाणात हायड्रोजन अणू तयार होतात. जरी यामुळे नमुन्यातून विसरित होणाऱ्या हायड्रोजन अणूंची संख्या कमी होत असली, तरी त्याने काही फरक पडत नाही, कारण निर्माण झालेल्या अणूपैकी किती अणू प्रत्यक्षात आरपार जात आहेत हे मोजण्यातच आम्हाला रस आहे,” असे प्रा. विजयशंकर सांगतात.

शिवाय, संशोधकांना असेही आढळले की चाचणीच्या नमुन्यावर शोधक यंत्राच्या बाजूने निकेलचा लेप लावल्यामुळे, पोलादाच्या पृष्ठभागावरील आयर्न ऑक्साइड आणि हायड्रोजन अणू यांच्यातील अभिक्रिया पूर्णपणे थांबली. ऑक्साइडमुळे हायड्रोजन अणूंना शोधक यंत्रापर्यंत पोहोचण्यात अडथळे येऊ शकतात, ज्यामुळे मोजल्या जाणाऱ्या फ्लक्सचे प्रमाण कमी होते. निकेलच्या लेपामुळे हायड्रोजनसाठी शोधक यंत्रापर्यंत पोहोचण्यातले अडथळे कमी होतात असे त्यांच्या अभ्यासातून दिसून आले. वास्तविक पॅलेडियम धातूचा लेप हा या कामासाठी सर्वोत्तम मानला जातो, परंतु संशोधकांनी असे शोधून काढले की त्यापेक्षा कितीतरी स्वस्त असलेला निकेलचा लेप देखील हे काम चोखपणे बजावू शकतो.

“निकेल देखील ऑक्साइडप्रमाणेच हायड्रोजनला अडकवतो, परंतु आमच्या गणितीय आकडेमोडीमध्ये हा परिणाम विचारात घेता येऊ शकतो. पॅलेडियमचा वापर करणे केव्हाही उत्तम आहे, पण ते उपलब्ध नसल्यास, कोणताच लेप नसण्यापेक्षा निकेलचा लेप लावणे कधीही श्रेयस्कर ठरते,” असे प्रा. विजयशंकर नमूद करतात.

कमी तीव्रतेच्या चार्जिंगची स्थिती आणि निकेलचा लेप यामुळे हायड्रोजन फ्लक्सचा अधिक अचूक डेटा मिळतो हे दाखवून देऊन सदर अभ्यासाने प्रयोगशाळेतील हायड्रोजन फ्लक्स चाचणीसाठी एक नवीन मानक प्रस्थापित केले आहे. तसेच, हायड्रोजन पाईपलाईनसाठी योग्य सामग्रीची निवड करण्यासाठी यामुळे अभियंत्यांना एक विश्वसनीय मार्ग मिळाला आहे. भविष्यात जेव्हा आपण आपल्या घरांसाठी

आणि गाड्यांसाठी हायड्रोजन इंधनाचा वापर करू, तेव्हा ते वाहून नेणारे पाईप्स अशा दर्जाचे असतील की ज्यामुळे अचानक होणारी गळती किंवा बिघाड टाळता येईल, याची खात्री या संशोधनामुळे मिळते.

VETTED / UNVETTED	Vetted
Title of Research Paper	Towards establishing reliable approaches for measurement of hydrogen diffusion characteristics using the electrochemical permeation technique
DOI of the Research Paper as a link	https://doi.org/10.1016/j.corsci.2025.113449
List of all researchers with affiliations	Gautam Sudha, Indian Institute of Technology (IIT), Bombay Michael Rohwerder, Max Planck Institute for Sustainable Materials Dandapani Vijayshankar, Indian Institute of Technology (IIT), Bombay
Email of researcher/s	Vijayshankar Dandapani <v.dandapani@iitb.ac.in>
Writer name	Dennis Joy
Transcreator name	Shilpa Inamdar-Joshi
Credits to Graphic:	Lead image: Gubbi Labs Inline image: Authors of the study
Subject [FOR EDITOR] - Please Highlight in RED (Multiple allowed)	Science/Technology/Engineering/Ecology/Health/Society
Article to be Sectioned Under [FOR EDITOR] - Please Highlight in RED	Deep Dive/Friday Features/Fiction Friday/Joy of Science/News+Views/News/Scitoons/Catching up/OpEd/Featured/Sci-Qs/Infographics/Events
Social Media TAGS separated by Comma	#Hydrogen, #Corrosion, #Electrochemistry
Social Media Posts Suggestions/ Links to interesting relevant content [optional] [writer]	
Social Media Handles to be added	@iitbombay

Social Media handles of writer	
Social Media handles of researchers	www.linkedin.com/in/vijayshankar-dandapani-6bab49317 https://www.linkedin.com/in/sudha-gautam5/ https://www.linkedin.com/in/michael-rohwerder-205a61279/
Funding information (Source: Research paper)	This work was funded through Startup Research Grant (SRG), No. SRG/2021/000001, Science and Engineering Research Board (SERB), India.
Conflict of Interest/Competing Interest information (Source: Research paper)	None
Co-PI information (Source: Research paper)	NA
Location:	Mumbai