

मृदा-खनिज (क्ले-मिनरल्स) एवं परमाणु ऊर्जा



डॉ. मीनू प्राशर

भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई

परमाणु ऊर्जा, वैश्विक ऊर्जा आवश्यकताओं को पूरा करने के लिए एक स्वच्छ और विश्वसनीय विकल्प है। हमारा देश भी वर्ष 2070 तक ग्रीनहाउस गैसों के नेट जीरो (शुद्ध-शून्य) उत्सर्जन तक पहुँचने के लिए प्रतिबद्ध है। स्वच्छ बिजली उत्पादन, कम ग्रीनहाउस गैस उत्सर्जन, ईंधन का कुशल उपयोग और कोयले जैसे जीवाश्मीय ईंधनों से होने वाले पर्यावरणीय नुकसान से सुरक्षा, ये सभी लाभ परमाणु ऊर्जा से प्राप्त होते हैं। परमाणु ऊर्जा का उत्पादन परमाणु नाभिकीय विखंडन नामक प्रक्रिया द्वारा होता है, जहाँ यूरेनियम के विशिष्ट समस्थानिक (जैसे कि U-235) के विभाजन के दौरान अत्यधिक ऊर्जा (लगभग 200 मेगा इलेक्ट्रॉन वोल्ट प्रति विखंडन) निकलती है। इस अपार ऊर्जा से बिजली उत्पादन किया जाता है। नाभिकीय ईंधन

जैसे कि यूरेनियम-235 के विखंडन से बिजली प्राप्त करने एवं बचे हुए अपशिष्ट को सुरक्षित रूप से प्रबंधित करने के विभिन्न चरणों की श्रृंखला को 'परमाणु ईंधन चक्र' कहा जाता है। इसे निम्न तीन मुख्य भागों में समझा जा सकता है। 'अग्र-भाग' (फ्रंट-एंड) जिसमें नाभिकीय ईंधन तैयार किया जाता है, 'मध्य-भाग' (मिडिल-एंड) जिसमें इस ईंधन का परमाणु रिएक्टर में उपयोग किया जाता है और 'पश्च-भाग' (बैक-एंड) जिसमें नाभिकीय अपशिष्ट का प्रबंधन किया जाता है। 'परमाणु ईंधन चक्र' द्वारा संसाधनों का अधिकतम उपयोग एवं न्यूनतम अपशिष्ट उत्पन्न करके पर्यावरणीय क्षति को सीमित किया है। इस प्रकार, परमाणु ऊर्जा एक सुरक्षित एवं दीर्घकालिक कार्बन-न्यून ऊर्जा विकल्प है। परमाणु ऊर्जा के उत्पादन में मृदा-जन्य (मिट्टी से प्राप्त)

परमाणु ईंधन चक्र



चित्र-1 'परमाणु ईंधन चक्र' के विभिन्न भाग

अनेक प्राकृतिक पदार्थों का उपयोग होता है। परमाणु ईंधन चक्र को चित्र-1 में संक्षेप में दर्शाया गया है।

परमाणु ईंधन चक्र का अग्रभाग (फ्रंट-एंड) - इस प्रारंभिक चरण में रिएक्टर में उपयोग हेतु यूरेनियम-आधारित नाभिकीय ईंधन तैयार किया जाता है। इसके लिए, भूगर्भ में यूरेनियम-अन्वेषण एवं खनन किया जाता है। भारत में, झारखंड के जादूगोड़ा और आंध्र प्रदेश के तुमलापल्लि स्थित खदानों में से यूरेनियम अयस्क का खनन किया जाता है। खनित अयस्क, जो अधिकांशतः चट्टान के टुकड़ों के रूप में निकलता है, में बहुत कम मात्रा में यूरेनियम (लगभग 0.2% U_3O_8) होता है जिसका केवल 0.7% ही विखण्डनीय यूरेनियम-235 समस्थानिक होता है। अयस्क को पीसकर रसायनों से उपचारित किया जाता है, जिससे 'येलो केक' (U_3O_8) नामक यूरेनियम उत्पाद चूर्ण (पाउडर) के रूप में तैयार किया जाता है। इस प्रक्रिया को 'दलन' (मिलिंग) कहा जाता है। इस प्रक्रिया के दौरान, प्राप्त ठोस अपशिष्ट, जिसे 'टेलिंग' कहा जाता है, में अब भी कुछ निम्न-स्तरीय रेडियोधर्मी तत्व एवं भारी धातुएँ मौजूद रहती हैं, जिन्हें विशाल 'पड़ोछन कुंड' (टेलिंग पॉण्ड्स) में सुरक्षित रखा जाता है। इसके पश्चात, येलो केक को नाभिकीय ईंधन बनाने के लिए संसाधित किया जाता है। प्राकृतिक यूरेनियम-आधारित ईंधन बनाने के लिए येलो केक को नाभिकीय-स्तर (न्यूक्लियर-ग्रेड) यूरेनियम ऑक्साइड चूर्ण (पाउडर) में परिवर्तित किया जाता है और उसे उच्च ताप चूर्ण धातुकी (पाउडर मेटलर्जी) प्रक्रिया द्वारा निश्चित आकार की यूरेनियम डाईऑक्साइड (UO_2) की सघन गुटिकाओं (पेलेट) में निर्मित किया जाता है। संवर्धित यूरेनियम-आधारित (अर्थात् जिसमें U-235 समस्थानिक की मात्रा 0.7% से अधिक होती है) ईंधन बनाने के लिए, सबसे पहले यूरेनियम-आधारित गैसीय यौगिक बनाए जाते हैं जिनका विशेष गैसीय प्रक्रिया द्वारा प्रसंस्करण कर समस्थानिकीय संवर्धन किया जाता है। तत्पश्चात, प्राप्त उत्पाद को पुनः ठोस चूर्ण (पाउडर) में परिवर्तित कर, संवर्धित यूरेनियम डाईऑक्साइड (UO_2) की गुटिकाओं (पेलेट) के रूप ईंधन

बनाया जाता है। इन गुटिकाओं को जिरकोनियम-आधारित मिश्रधातु की खोखली बेलनाकार नलिकाओं में भरकर ईंधन की छड़ें (फ्यूएल रॉड्स) बनाई जाती हैं, जिन्हें विशेष ज्यामिति में समुचित कर ईंधन बंडल (फ्यूएल असेंबली) बनाए जाते हैं। परमाणु रिएक्टर में ऊर्जा उत्पादन के लिए इन ईंधन बंडलों का उपयोग किया जाता है।

'परमाणु ईंधन चक्र' का मध्य भाग - इस चरण में, नाभिकीय ईंधन का उपयोग बिजली उत्पन्न करने के लिए किया जाता है। रिएक्टर प्रचालन के लिए, ईंधन बंडलों को परमाणु रिएक्टर में रखा जाता है, जहाँ न्यूट्रॉन-चालित नाभिकीय विखंडन श्रृंखला अभिक्रिया को नियंत्रित रूप से चलाकर उष्मा के रूप में विखंडन ऊर्जा उत्पन्न की जाती है। उत्पन्न ऊष्मा का उपयोग जल (शीतलक) से उच्च ताप एवं दाब वाली भाप बनाने के लिए किया जाता है। इस प्रकार, प्राप्त भाप से टरबाइन घुमाकर बिजली उत्पन्न की जाती है। ईंधन के प्रकार एवं ऊर्जा क्षमता के आधार पर इसे रिएक्टर में कई महीनों से कई वर्षों तक रखा जा सकता है। रिएक्टर से निकाले जाने के बाद यह 'भुक्तशेष ईंधन' (स्पेंट फ्यूएल) कहलाता है जो अत्यधिक गर्म और रेडियोधर्मी होता है। इसे सतत रूप से ठंडा रखने और रेडियोधर्मिता को कम करने के लिए अस्थायी रूप से विशेष जल-भरे कुंडों में लम्बे समय तक भंडारित किया जाता है।

'परमाणु ईंधन चक्र' का पश्च-भाग - यह भाग, भुक्तशेष (व्ययित) ईंधन के अंतिम प्रबंधन और दीर्घकालिक निपटान से संबंधित है। एक तरीका यह है कि इस ईंधन में उपस्थित उपयोगी उत्पादों, जैसे कि यूरेनियम एवं प्लूटोनियम, तथा अन्य समाजोपयोगी रेडियोसमस्थानिकों (सीज़ियम, रुथेनियम, स्ट्रॉन्शियम, इत्यादि) को रसायनिक पुनःप्रसंस्करण द्वारा अलग किया जाता है और परिणामस्वरूप अल्प मात्रा में प्राप्त नाभिकीय अपशिष्ट का सुरक्षित रूप से दीर्घकालिक निपटान किया जाता है। पुनःप्रसंस्कृत यूरेनियम एवं प्लूटोनियम से नया नाभिकीय ईंधन बनाया जाता है। भारत द्वारा यही विकल्प अपनाया

गया है जिसे 'संवृत ईंधन चक्र' (क्लोज़्ड फ्यूल सायकल) कहा जाता है। दूसरा तरीका, जिसमें भुक्तशेष ईंधन (स्पेंट फ्यूल) का पुनर्चक्रण नहीं किया जाता बल्कि उसका सुरक्षित रूप से दीर्घकालिक स्थायी भंडारण किया जाता है, को 'विवृत ईंधन चक्र' (ओपन फ्यूल सायकल) कहा जाता है। कई पश्चिमी देशों जैसे संयुक्त राज्य अमेरिका, कनाडा, स्वीडन, आदि का परमाणु ऊर्जा कार्यक्रम 'विवृत ईंधन चक्र' पर आधारित है।

'मिट्टी के खनिज' अथवा 'क्ले-मिनरल', जिन्हें 'मृत्तिका खनिज' भी कहा जाता है, अपनी प्रचुरता के कारण स्वच्छ परमाणु ऊर्जा के लिए स्थायी पदार्थ स्रोत हैं। पृथ्वी पर पाए जाने वाले इन सामान्य खनिजों (जैसे कि काओलिनाइट, मॉन्टमोरिलोनाइट, बेंटोनाइट, इलाइट, इत्यादि) की उपलब्धता भी प्रचुर है। मिट्टी से इनके निष्कर्षण और प्रसंस्करण के लिए, कई अन्य औद्योगिक पदार्थों की तुलना में, कम ऊर्जा और संसाधनों की आवश्यकता होती है। अतः ये पर्यावरणीय-अनुकूल विकल्प भी हैं। चूँकि, ये पृथ्वी के भूविज्ञान के स्वभाविक हिस्से हैं, इसलिए, अभियांत्रिकी समाधानों में इनका उपयोग पर्यावरण के लिए भी लाभदायक है। आइए, अब देखें कि मिट्टी के खनिज (क्ले-मिनरल) कैसे परमाणु ईंधन चक्र के तीनों भागों में महत्वपूर्ण और बहुमुखी भूमिका निभाते हैं।

यूरेनियम खनन और दलन (मिलिंग) में, काओलिनाइट और बेंटोनाइट जैसे खनिजों का उपयोग दूषित जल और मिट्टी को साफ करने एवं उपचारित करने के लिए किया जाता है। मिट्टी स्पंज की तरह काम करते हुए पानी से रेडियोधर्मी एवं अन्य भारी धातुओं को अवशोषित करती (सोख लेती) है, जिससे पानी साफ होता है। धातु-युक्त मिट्टी के स्थायी एवं स्थिर होने से पर्यावरणीय दुष्प्रभाव भी निम्नतम होता है। यूरेनियम मिलिंग से प्राप्त अवशेषों को बड़े कुंडों में संग्रहित किया जाता है, जो अधिकांशतः खनन और मिलिंग स्थलों के निकट स्थित होते हैं। इन अवशेषों में अल्प मात्रा में रेडियोधर्मी पदार्थ और अन्य विषैले तत्व होते हैं। सघन मिट्टी,

अवशेषों वाले कुंडों के तल और किनारों पर एक जलरोधी परत बनाती है जो हानिकारक अपशिष्टों को भूजल में रिसने एवं मृदा या भूजल-प्रदूषण से रोकती है। इन कुंडों को बेंटोनाइट-युक्त मिट्टी की परत से ढक दिया जाता है। यह आवरण वर्षा जल द्वारा अपशिष्ट पदार्थों को वातावरण में फैलने से रोकता है और रेडॉन-युक्त रेडियोधर्मी धूल को भी हवा में फैलने से रोकता है। साथ ही, यह आवरण पेड़-पौधों को उगने के लिए स्थिर सतह भी प्रदान करता है। भारत में इस प्रकार के 'पड़ोछन कुंड' (टेलिंग पॉन्ड्स) आंध्र प्रदेश के तुम्मलापल्लि और झारखंड के जादूगोड़ा में हैं।

परमाणु बिजली संयंत्र के प्रचालन के दौरान, वहां के कार्मिकों को विकिरण से सुरक्षित रखना सर्वोच्च प्राथमिकता होती है। मृत्तिका-खनिज (क्ले-मिनरल्स), जिन्हें अक्सर कंक्रीट में मिलाया जाता है, विकिरण परिरक्षण के लिए प्रभावी विकल्प हैं। गामा किरणों एवं न्यूट्रॉन विकिरण जीवन एवं पर्यावरण दोनों के लिए हानिकारक होते हैं। गामा किरणों को अवशोषित करने तथा न्यूट्रॉनों की गति को प्रभावी रूप से कम करने की अपनी निहित क्षमता के कारण, ये खनिज विकिरण अवरोधन हेतु एक महत्वपूर्ण और विश्वसनीय सुरक्षा परत बनाते हैं। मृत्तिका-खनिज आधारित पदार्थों का उपयोग 'शुष्क भंडारण ड्रमों', जो शीतलक कुंड में ठन्डे किए गए भुक्त शेष ईंधन को

परमाणु ईंधन चक्र में मिट्टी के खनिजों की भूमिका



चित्र-2 मृत्तिका - खनिजों की परमाणु ईंधन चक्र के तीनों चरणों में उपयोगिता

सुरक्षित रखने वाले विशेष पात्र (कंटेनर) होते हैं, के अस्तर के रूप में भी किया जाता है। इनकी कम पारगम्यता और उत्कृष्ट अवशोषण क्षमता रेडियोधर्मी कणों को रोककर सुरक्षात्मक सील बनाती है, जिससे आकस्मिक रेडियोधर्मी रिसाव और संभावित संदूषण फैलने का जोखिम काफी घट जाता है। चित्र-2 में मृत्तिका-खनिजों (क्ले-मिनरल्स) के परमाणु ईंधन चक्र के तीनों चरणों में उपयोगिता को दर्शाया गया है।

परमाणु बिजली उत्पादन के बाद अंततः उत्पन्न उच्च-स्तरीय रेडियोधर्मी अपशिष्ट के सुरक्षित निपटान के लिए, गहरे भूवैज्ञानिक भंडार गृह (डीप जियोलॉजिकल रिपॉसिटोरी) एक दीर्घकालिक समाधान के रूप में नियोजित हैं। इन भंडार गृहों की डिजाइन में, मृत्तिका-खनिजों (क्ले-मिनरल्स) का उपयोग अभियांत्रिक अवरोध संरचना (इंजीनियर्ड बैरियर सिस्टम) के रूप में सुरक्षा प्रणाली का एक महत्वपूर्ण प्रस्तावित हिस्सा है। 'परमाणु ईंधन चक्र' में इन खनिजों का यह अति-महत्वपूर्ण अनुप्रयोग है। उदाहरणस्वरूप, फिनलैंड के ओन्कालो में स्थित दुनिया का पहला गहरा भूवैज्ञानिक भंडारगृह, अपनी सुरक्षा प्रणाली के एक महत्वपूर्ण घटक के रूप में बेंटोनाइट मिट्टी के बफर के साथ निर्मित किया गया है। उच्च-स्तरीय रेडियोधर्मी अपशिष्ट पात्र (हाई-लेवल रेडियोएक्टिव वेस्ट कंटेनर) के चारों ओर बफर के रूप में सघन बेंटोनाइट मिट्टी के ब्लॉक का उपयोग किया जाता है। यह मिट्टी का अवरोध हजारों वर्षों तक रेडियोधर्मी अपशिष्ट को पर्यावरण से अलग रखने के लिए कार्य करता है। मृत्तिका-खनिज एक जाल के रूप में कार्य करते हुए रेडियोधर्मी कणों को भूजल में घुलने अथवा फैलने से रोकते हैं। जल के संपर्क में आने से बेंटोनाइट मिट्टी असाधारण रूप से प्रसारित (फैलती) है। इसकी यह विशेषता इसे हजारों वर्षों में भूवैज्ञानिक परिवर्तनों के कारण बनने वाली किसी भी दरार को अपने आप सील (बंद) करने में सक्षम बनाती है। इससे यह सुनिश्चित होता है कि रेडियोधर्मी कणों के लिए

मिट्टी द्वारा बना अवरोध अखंड एवं स्थायी बना रहे। इस भूवैज्ञानिक भंडार में, मृत्तिका खनिजों का उपयोग, सुरंगों और रिक्त स्थानों को भरने के लिए भी किया गया है, जिससे भूजल में रेडियोधर्मी प्रजातियों के रिसने के प्रति अतिरिक्त अवरोध उत्पन्न होता है।

इस संक्षिप्त लेख से यह स्पष्ट है कि 'परमाणु ईंधन चक्र' स्वच्छ ऊर्जा उत्पन्न करने की एक जटिल लेकिन महत्वपूर्ण प्रक्रिया है। नाभिकीय ईंधन के खनन स्थलों की सफाई से लेकर रेडियोधर्मी पदार्थों के वातावरण में रिसाव/फैलाव को रोकने के लिए दीर्घकालिक सुरक्षा अवरोधों के निर्माण तक, हर चरण में मृत्तिका खनिजों (क्ले-मिनरल्स) का उपयोग इस प्रक्रिया को सुरक्षित और विश्वसनीय बनाने का महत्वपूर्ण हिस्सा है। मिट्टी की इस प्राकृतिक क्षमता का उपयोग करके, यह सुनिश्चित किया जा सकता है कि परमाणु ऊर्जा आने वाली पीढ़ियों के लिए स्वच्छ एवं सतत ऊर्जा का एक सुरक्षित और विश्वसनीय विकल्प बनी रहे।



लेखिका का परिचय



डॉ. (श्रीमती) मीनू प्राशर

डॉ. (श्रीमती) मीनू प्राशर वर्तमान में, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के पदार्थ विज्ञान प्रभाग में वैज्ञानिक अधिकारी-एफ के पद पर कार्यरत हैं।