नाभिकीय संलयन : भविष्य की स्वच्छ ऊर्जा

मन्नू मान

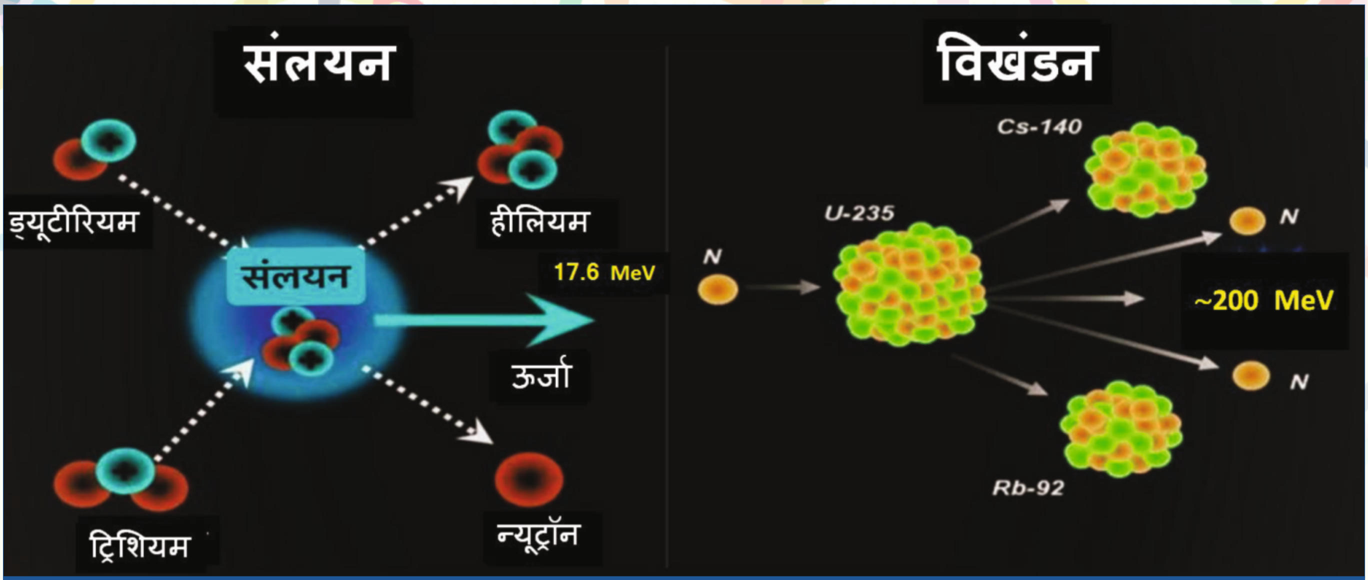
भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई

मानव सभ्यता की प्रगति और ऊर्जा की खपत का अटूट संबंध रहा है। औद्योगिक प्रगति में लकड़ी, कोयले और हाइड्रोकार्बन गैस जैसे कार्बन-आधारित ईंधनों का अत्यधिक उपयोग हुआ है। हालांकि, जलवायु परिवर्तन, पर्यावरणीय क्षरण और सीमित संसाधनों के अभाव में मानवता को इसकी भारी कीमत भी चुकानी पड़ी है। आज, इक्कीसवीं सदी में ऊर्जा की अप्रत्याशित बढ़ती मांगों को पूरा करने के लिए स्वच्छ, टिकाऊ और शक्तिशाली स्रोतों की तत्काल आवश्यकता ने हमें परमाणु के हृदय में छिपी अपार शक्ति की ओर देखने के लिए प्रेरित किया है। परमाणु ऊर्जा दो मुख्य प्रक्रियाओं द्वारा प्राप्त की जा सकती है। नाभिकीय विखंडन (न्यूक्लियर फिशन) और नाभिकीय संलयन (न्यूक्लियर फ्यूज़न)। ये दोनों अभिक्रियाएं, रसायनिक अभिक्रियाओं की तुलना में लाखों गुना अधिक ऊर्जा उत्पन्न करती है। नाभिकीय विखंडन एक ऐसी अभिक्रिया है जिसमें भारी परमाणु नाभिक, जैसे यूरेनियम-235 या प्लूटोनियम-239, बमबारित मुक्त न्यूट्रॉन का अवशोषण करके दो छोटे नाभिकों में विभाजित हो जाता है। इस प्रक्रिया में, दो से तीन अतिरिक्त न्यूट्रॉन भी निकलते हैं, जो अन्य यूरेनियम (अथवा प्लूटोनियम) परमाणुओं को विभाजित करते हैं, जिससे विखंडन की श्रृंखला अभिक्रिया (फिशन चेन रिएक्शन) चलती रहती है। प्रत्येक विखंडन में लगभग 200 मिलियन इलेक्ट्रॉन वोल्ट (MeV) ऊर्जा निकलती है। पिछले आठ दशकों से भी अधिक के अनुसंधान एवं विकास के फलस्वरूप नाभिकीय विखंडन वाणिज्यिक रूप से एक परिपक्व और सिद्ध तकनीक बन चुकी है, जो कार्बन-न्यून बिजली/ का एक महत्वपूर्ण स्रोत है। विश्वभर में, वर्तमान में प्रचालित 416 परमाणु बिजली संयंत्रों द्वारा कुल बिजली का लगभग 10 प्रतिशत उत्पादन हो रहा है। लेकिन इस प्रौद्योगिकी की कुछ अंतर्निहित चुनौतियाँ भी हैं, जैसे कि दीर्घकालिक रेडियोधर्मी (रेडियोसक्रिय) अपशिष्ट का सुरक्षित प्रबंधन, हथियारों के लिए नाभिकीय पदार्थ के प्रसार का जोखिम, इत्यादि। इन्हीं चुनौतियों ने वैज्ञानिकों को एक बेहतर, स्वच्छ और सुरक्षित विकल्प की तलाश करने के लिए प्रेरित किया है: जो है नाभिकीय संलयन।

नाभिकीय संलयन क्या है?

यह नाभिकीय विखंडन की ठीक विपरीत प्रक्रिया है। भारी परमाणु के दो (या अधिक) हल्के परमाणुओं में विभाजित (विखंडन) होने के बजाय, यह दो हल्के परमाणु नाभिकों के मिलने से (संलयन) एक भारी नाभिक बनाने की प्रक्रिया है। इसी मौलिक प्रक्रिया से हमारे सूर्य और ब्रह्मांड के अरबों तारों को शक्ति मिलती है, जिससे वे अरबों वर्षों से प्रकाश और ऊष्मा (गर्मी) उत्सर्जित कर रहे हैं। वैज्ञानिकों का लक्ष्य इसी प्रक्रिया (नाभिकीय संलयन) को पृथ्वी पर नियंत्रित रूप से दोहराना है।

ब्रह्मांडीय तारों के कोर (गर्भ) में अत्यधिक गुरुत्वाकर्षण और दाब के कारण, हाइड्रोजन के नाभिक (प्रोटॉन) आपस में मिलकर हीलियम बनाते हैं। हालांकि, पृथ्वी पर तारों जैसा गुरुत्वाकर्षण दाब बनाना असंभव है, वैज्ञानिकों ने एक ऐसी संलयन अभिक्रिया की पहचान की है जिसमें हाइड्रोजन के दो भारी समस्थानिकों (आइसोटोप्स) - ड्यूटीरियम (D) और ट्रिशियम (T) को अत्यधिक उच्च तापमान पर एक साथ लाया जाता है। इससे वे आपस में संलयित (फ्यूज) होकर हीलियम-4 (He-4) नाभिक (जिसे अल्फा कण / विकिरण भी कहा जाता है) और एक उच्च-ऊर्जा न्यूट्रॉन बनाते हैं। इस



चित्र 1 : नाभिकीय संलयन और नाभिकीय विखंडन की प्रक्रिया

प्रक्रिया में भारी मात्रा में (17.6 मिलियन-इलेक्ट्रॉन-वोल्ट (MeV) प्रति संलयन) ऊर्जा निकलती है। नाभिकीय संलयन पदार्थ की एक विशेष अवस्था में होता है जिसे 'प्लाज़्मा' कहा जाता है। किसी गैस को अत्यधिक उच्च तापमान पर गर्म करने पर उसके परमाणुओं से इलेक्ट्रॉन अलग हो जाते हैं। इससे धनावेशित आयनों और मुक्त इलेक्ट्रॉन युक्त आयनित (आयनाइज़्ड) गैस बनती है, जिसे संयुक्त रूप से प्लाज़्मा कहते हैं। चूंकि प्लाज़्मा में आवेशित कण होते हैं, इसलिए इसे शक्तिशाली चुंबकीय क्षेत्रों द्वारा नियंत्रित और परिसीमित किया जा सकता है, जो संलयन को साधने की महत्त्वपूर्ण कुंजी है। चित्र 1 में नाभिकीय संलयन और नाभिकीय विखंडन की विपरीत प्रक्रिया को योजनावत रूप में दिखाया गया है।

संलयन को साधने की तकनीकें

सूर्य के कोर (गर्भ) की परिस्थितियों को पृथ्वी पर एक मानव-निर्मित मशीन के अंदर बनाना और बनाए रखना, यह इक्कीसवीं सदी की सबसे बड़ी अभियांत्रिकी (इंजीनियरिंग) चुनौतियों में से एक है। धनावेशित ड्यूटेरियम और ट्रिशियम नाभिकों के बीच प्राकृतिक रूप से स्थिरवैद्युत (इलेक्ट्रोस्टैटिक) प्रतिकर्षण होता है। उन्हें संलयित (फ्यूज) करने के लिए, निम्नलिखित तीन महत्वपूर्ण शर्तों को एक साथ पूरा करना और बनाए रखना आवश्यक है।

1. अत्यधिक तापमान: प्लाज़्मा को 10 करोड़ से 15 करोड़ डिग्री सेल्सियस से अधिक तापमान तक गर्म किया जाना चाहिए। यह तापमान सूर्य के कोर के तापमान से भी लगभग दस गुना अधिक है। ऐसा तापमान नाभिकों को इतनी अधिक गतिज ऊर्जा प्रदान करता है कि वे अपने पारस्परिक प्रतिकर्षण को दूर कर सकें और टकराकर संलयित (फ्यूज़) हो सकें।

2. पर्याप्त घनत्व (डेंसिटी): प्लाज़्मा को पर्याप्त रूप से घना होना चाहिए ताकि ईंधन आयनों (जैसे कि ड्यूटेरियम और ट्रिशियम) के बीच टकराव की संभावना बढ़ सके और एक सार्थक दर पर संलयन अभिक्रियाएं हो सकें।

3. पर्याप्त परिसीमन (कन्फ़ाइनमेंट) समय: गर्म एवं घने प्लाज़्मा को पर्याप्त समय तक परिसीमित (कन्फ़ाइंड) रखना आवश्यक है ताकि प्लाज़्मा के ठंडे होने या क्षय होने से पहले ही संलयन अभिक्रियाओं के लिए पर्याप्त समय मिल सके और जिसके परिणामस्वरूप एक शुद्ध ऊर्जा लाभ प्राप्त हो सके।

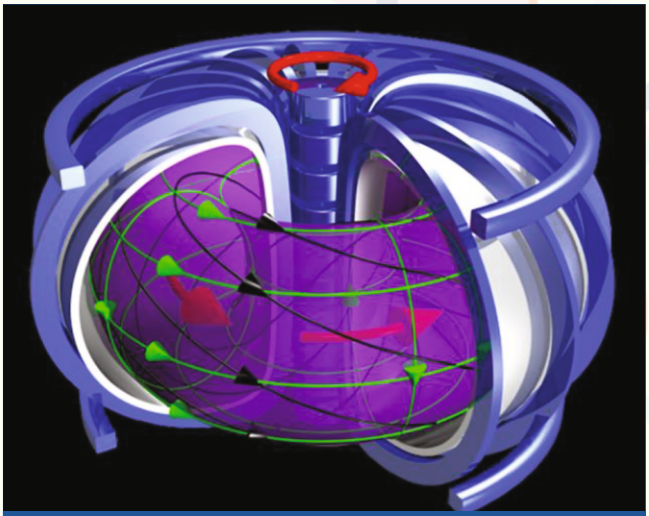
उक्त तीन शर्तों का संयुक्त प्रभाव (गुणनफल) इस प्रकार होना चाहिए ताकि एक स्वपोषी (सेल्फ-सस्टेनिंग), ऊर्जा-उत्पादक संलयन अभिक्रिया प्राप्त की जा सके। पृथ्वी पर इन असाधारण परिस्थितियों को प्राप्त करना और उन्हें बनाए रखना संलयन अनुसंधान की सबसे बड़ी चुनौती है। पर्याप्त परिसीमन (कन्फ़ाइनमेंट) को प्राप्त करने के लिए, वैज्ञानिक मुख्य रूप से निम्न दो दृष्टिकोणों पर काम कर रहे हैं: (1) चुंबकीय परिसीमन संलयन (मैग्नेटिक कन्फ़ाइनमेंट फ्यूज़न; MCF) और (2) जड़त्वीय परिसीमन संलयन (इनर्शियल कन्फ़ाइनमेंट फ्यूज़न; ICF)।

1. चुंबकीय परिसीमन संलयन (मैग्नेटिक कन्फ़ाइनमेंट फ्यूज़न; MCF)

इसका मूल सिद्धांत 15 करोड़ डिग्री सेल्सियस से अधिक गर्म प्लाज़्मा को शक्तिशाली चुंबकीय क्षेत्रों द्वारा एक प्रकार से 'चुंबकीय बोतल' में सीमित (परिसीमित) करना है। चूंकि प्लाज़्मा आवेशित कणों (आयनों और इलेक्ट्रॉनों) से बना होता है, इसलिए यह चुंबकीय क्षेत्र रेखाओं का अनुसरण करता है। ये चुंबकीय क्षेत्र प्लाज़्मा को रिएक्टर की भौतिक दीवारों को छूने से रोकते हैं, जिससे न ही प्लाज़्मा ठंडा होता है और न ही रिएक्टर की दीवारें अत्यधिक ऊष्मा-प्रभाव से पिघलती हैं। इस प्रकार के संलयन के पुनः दो मुख्य डिज़ाइन हैं, जिन्हें टोकामक और स्टेलरेटर कहते हैं।

I) टोकामक (Tokamak)

'टोकामक' एक रूसी संक्षिप्त नाम है जिसका अर्थ "चुंबकीय कुंडली (कॉइल्स) के साथ टॉरॉयडल चैंबर" है। यह संलयन अनुसंधान में अब तक सबसे विकसित और व्यापक रूप से इस्तेमाल किया जाने वाला उपकरण है। यह डोनट के आकार का (टॉरॉयडल) एक निर्वात कक्ष (वैक्यूम चैंबर) होता है जिसके चारों ओर शक्तिशाली चुंबक लगे होते हैं। टोकामक डिज़ाइन अपेक्षाकृत सरल है और यह उत्कृष्ट प्लाज़्मा परिसीमन (कन्फ़ाइनमेंट) प्राप्त कर सकता है। यह उच्च तापमान और घनत्व तक पहुंचने में बहुत सफल रहा है। हालांकि टोकामक की सबसे बड़ी कमज़ोरी प्लाज़्मा करंट पर इसकी निर्भरता है। यह करंट प्लाज़्मा में अस्थिरता / व्यवधान पैदा कर सकता है जिससे रिएक्टर को नुकसान हो सकता है। इसके अलावा, टोकामक के निरंतर प्रचालन के लिए उन्नत और ऊर्जा-गहन तकनीकों की आवश्यकता होती है। चित्र 2 में टोकामक का एक त्रिविमीय (3D) योजनावत (स्कीमेटिक) चित्र दिखाया गया है।



चित्र 2: डोनट के आकार का एक टॉरॉयडल निर्वात कक्ष (वैक्यूम चैंबर) "टोकामक" का त्रिविमीय (3D) योजनावत (स्कीमेटिक) चित्र

ii) स्टेलरेटर (Stellarator)

'स्टेलरेटर' एक लैटिन भाषा का शब्द है जिसका अर्थ है 'तारा'। चुंबकीय परिसीमन (कन्फ़ाइनमेंट) के लिए यह एक विकल्प है। यह भी एक टॉरॉयडल उपकरण है, जो प्लाज़्मा को परिसीमित (कन्फ़ाइन) करने के लिए पूरी तरह से बाहरी चुंबकों पर निर्भर करता है। इसमें प्लाज़्मा के भीतर कोई बड़ा करंट प्रेरित करने की आवश्यकता नहीं होती है। आवश्यक रूप से मुड़े हुए चुंबकीय क्षेत्र को प्राप्त करने के लिए, स्टेलरेटर अत्यंत जटिल, मुड़े हुए और गैर-समतलीय (नॉन-प्लेनर) आकार के चुंबकीय कुंडलियों (कॉइल्स) का उपयोग करता है। प्लाज़्मा करंट की अनुपस्थिति स्टेलरेटर को, स्थिर-अवस्था (स्टेडी-स्टेट) या निरंतर प्रचालन के लिए सक्षम बनाती है, जो व्यावसायिक बिजली संयंत्र के लिए एक बहुत ही वांछनीय विशेषता है। हालांकि इसके लिए जटिल आकार के चुम्बकीय कुंडलियों (मेग्नेटिक कॉइल्स) को

मिलीमीटर-स्तर की सटीकता के साथ बनाना एक बड़ी अभियांत्रिकी (इंजीनियरिंग) चुनौती है। इसके अलावा, इसके भीतर प्लाज़्मा संचार (परिवहन) का भौतिक विज्ञान टोकामक की तुलना में अधिक जटिल है और अब तक के अनुसंधान अनुभव में इसने टोकामक की तुलना में कम परिसीमन (कन्फ़ाइनमेंट) प्रदर्शित किया है।

MCF डिज़ाइन पर वैश्विक स्तर पर सर्वाधिक अनुसंधान एवं विकास किया गया है। इस डिज़ाइन पर आधारित कुछ प्रमुख एवं सफल प्रयोग निम्नानुसार हैं:

1. यूनाइटेड किंगडम (UK) का JET (जॉइंट यूरोपियन टॉरस) जिसने 6 9 मेगाजूल ऊर्जा उत्पादन करके लगभग पांच सेकंड तक संलयन अभिक्रिया को बनाए रखा।

2. जर्मनी का वेंडेलस्टीन 7-X, जिसने आधुनिक स्टेलरेटरों में हाल में हुई प्रगति और उन्नत कंप्यूटिंग से दीर्घकालिक स्थिरता का प्रदर्शन किया।

3. चीन के टोकामक EAST (एक्सपेरिमेंटल एडवांस्ड सुपरकंडक्टिंग टोकामक) ने लगभग 1066 सेकंड तक सतत संलयन का एक विश्व रिकॉर्ड बनाया, जो स्थायी नाभिकीय संलयन की दिशा में एक महत्वपूर्ण कदम है।

2. जड़त्वीय परिसीमन संलयन (इनर्शियल कन्फ़ाइनमेंट फ्यूज़न; ICF)

ICF नाभिकीय संलयन के लिए एक पूर्णतया अलग दृष्टिकोण है। इसका लक्ष्य नाभिकों को इतनी तेज़ी से संलयित (फ्यूज़) करना है कि उनके पास अपने निहित जड़त्व (इनर्शिया) के कारण अलग दिशा में जाने का समय ही न रहे। इस तकनीक में, ड्यूटीरियम-ट्रिशियम ईंधन से भरी एक छोटी सी गुटिका (गोली / पेलेट) को सभी दिशाओं से एक साथ अत्यंत शक्तिशाली लेसर या कणपुंज से बमबारित किया जाता है। इस प्रकार, प्राप्त अत्यधिक ऊर्जा से गुटिका की बाहरी परत तुरंत वाष्पीकृत हो जाती है और जिसके फलस्वरूप एक शक्तिशाली अंतर्मुखी प्रघात तरंग (शॉक वेव) उत्पन्न होती है। यह तरंग गुटिका के भीतर (केंद्र में) ईंधन को संकुचित और इतना गर्म करती है कि जिससे गुटिका के भीतर का घनत्व और तापमान नाभिकीय संलयन हेतु आवश्यक परिस्थितियों तक पहुंच जाता है। इस प्रकार, एक लघु तापनाभिकीय (थर्मोन्यूक्लियर) विस्फोट में ऊर्जा निकलती है। जड़त्वीय परिसीमन संलयन प्रयोग का सबसे प्रसिद्ध उदाहरण संयुक्त राज्य अमेरिका (USA) के लॉरेंस लिवरमोर नेशनल लेबोरेटरी (LLNL) में स्थित नेशनल इग्निशन फ़ैसिलिटी (NIF) का वर्ष 2022 में किया गया वैज्ञानिक प्रज्वलन (साइंटिफिक इग्निशन) रहा है। व्यावसायिक रूप के बिजली उत्पादन संयंत्र के लिए इस प्रक्रिया को प्रति सेकंड कई बार दोहराना आवश्यक है, जो एक बहुत बड़ी अभियांत्रिकी (इंजीनियरिंग) चुनौती है।

विखंडन बनाम संलयन - एक तुलनात्मक अध्ययन

यह समझने के लिए कि दुनिया भर के वैज्ञानिक और सरकारें संलयन ऊर्जा में इतना अधिक निवेश क्यों कर रही हैं, विखंडन और संलयन के बीच एक सीधी, बिंदु-दर-बिंदु तुलना आवश्यक है। यह तुलना स्पष्ट करती है कि संलयन को क्यों "परम ऊर्जा स्रोत" माना जाता है। विखंडन और संलयन दोनों ही परमाणु के नाभिक में संग्रहीत बंधन ऊर्जा (बाइंडिंग एनर्जी) का उपयोग करते हैं। लेकिन यह उपयोग विपरीत तरीकों से होता है। विखंडन में भारी तत्वों को तोड़कर ऊर्जा प्राप्त की जाती है, जबकि संलयन में हल्के तत्वों को जोड़कर। दोनों ही प्रक्रियाएं द्रव्यमान को ऊर्जा में परिवर्तित करती हैं, लेकिन उनके ईंधन, उप-उत्पाद, सुरक्षा प्रोफाइल और तकनीकी परिपक्वता में ज़मीन-आसमान का अंतर है। तालिका-1 में विखंडन और संलयन की विस्तृत तुलना दिखाई गई है।

उक्त तुलना से स्पष्ट है कि यदि संलयन की तकनीकी चुनौतियों पर काबू पा लिया जाए, तो यह मानवता के लिए एक सुरक्षित, स्वच्छ और लगभग अंतहीन ऊर्जा स्रोत बन सकता है।

तालिका 1: विखंडन बनाम संलयन - एक विस्तृत तुलना

विशेषता	नाभिकीय विखंडन (न्यूक्लियर फिशन)	नाभिकीय संलयन (न्यूक्लियर फ्यूज़न)
प्रक्रिया	भारी नाभिक (जैसे यूरेनियम) का हल्के नाभिकों में टूटना	हल्के नाभिकों (जैसे हाइड्रोजन) का एक भारी नाभिक में जुड़ना
ईंधन	यूरेनियम-235, प्लूटोनियम-239 (सीमित संसाधन)	ड्यूटीरियम (समुद्री जल से आसानी से और किफायती रूप से निकाला जा सकता है), ट्रिशियम (नाभिकीय रिएक्टर के अंदर लिथियम से उत्पन्न किया जा सकता है) (वस्तुतः असीमित ईंधन)
ऊर्जा उत्पादन	उच्च	विखंडन से 3-4 गुना अधिक
उप-उत्पाद	न्यून ग्रीनहाउस गैस उत्सर्जन दीर्घकालिक रेडियोधर्मी (रेडियोसक्रिय) नाभिकीय अपशिष्ट	हीलियम (एक अक्रिय गैस), रिएक्टर संरचना में अल्पकालिक न्यूट्रॉन से सक्रियता- जो कम समय में सुरक्षित स्तर तक क्षय हो जाती है। न्यूनतम ग्रीनहाउस गैस उत्सर्जन
सुरक्षा	नाभिकीय श्रृंखला अभिक्रिया के अनियंत्रित होने का जोखिम (सख्त नियंत्रण की आवश्यकता)	स्वाभाविक रूप से सुरक्षित; अभिक्रिया परिस्थितियां भंग होने पर प्लाज़्मा स्वतः बंद हो जाता है। नाभिकीय गलन (न्यूक्लियर मेल्टडाउन) का कोई खतरा नहीं
प्रौद्योगिकी परिपक्वता	परिपक्व, दशकों से वाणिज्यिक प्रचालन	प्रायोगिक चरण में; बहुत अधिक अनुसंधान एवं विकास की आवश्यकता

इंटरनेशनल थर्मोन्यूक्लियर एक्सपेरिमेंटल रिएक्टर (ITER) - एक वैश्विक महापरियोजना

इंटरनेशनल थर्मोन्यूक्लियर एक्सपेरिमेंटल रिएक्टर (ITER) नाभिकीय संलयन से ऊर्जा उत्पादन के लिए मानव इतिहास की सबसे महत्वाकांक्षी और जटिल वैश्विक महापरियोजनाओं में से एक है। यह दक्षिणी फ्रांस के कैडाराचे (कैडाराशे) में है। ITER का उद्देश्य नाभिकीय संलयन को बड़े पैमाने पर एक कार्बन-मुक्त ऊर्जा स्रोत के रूप में वैज्ञानिक और तकनीकी रूप से प्रदर्शित करना है। ITER का विशिष्ट लक्ष्य, 500 मेगावाट (MW) संलयन शक्ति का उत्पादन करना, लंबे समय तक संलयन स्पन्द (पल्स) को बनाए रखना और एक संलयन बिजली संयंत्र के लिए आवश्यक प्रौद्योगिकियों का प्रदर्शन और परीक्षण करना है। साथ ही, अन्य प्रगत प्रौद्योगिकियां जैसे कि अतिचालक चुंबक, प्रणालियों का रोबोट द्वारा दूरस्थ रखरखाव और ट्रिशियम ब्रीडिंग, इत्यादि का परीक्षण एवं प्रदर्शन भी सम्मिलित है। ITER एक प्रायोगिक उपकरण है और इसे ग्रिड के लिए बिजली उत्पादन करने के लिए डिज़ाइन नहीं किया गया है। यह परियोजना सात स्थायी सदस्यों, जिनमें यूरोपीय संघ (मेज़बान के रूप में), भारत,

जापान, दक्षिण कोरिया, रूस, संयुक्त राज्य अमेरिका एवं चीन शामिल हैं, के एक अद्वितीय वैश्विक सहयोग से चल रही है। प्रत्येक सदस्य केवल परियोजना की निर्माण लागत में मौद्रिक योगदान के लिए ही नहीं बल्कि विभिन्न घटकों, प्रणालियों या भवनों के डिज़ाइन, निर्माण और वितरण के लिए भी जिम्मेदार है।

ITER में भारत का योगदान

भारत औपचारिक रूप से वर्ष 2005 में ITER परियोजना में शामिल हुआ। ITER-India, गुजरात के गांधीनगर स्थित 'प्लाज़्मा अनुसंधान संस्थान' (इंस्टीट्यूट ऑफ़ प्लाज़्मा रिसर्च, IPR) की विशेष परियोजना है और IPR ही ITER के लिए भारत के सभी योगदानों एवं भूमिकाओं को समन्वयित करने के लिए जिम्मेदार संस्था (एजेंसी) है । ITER में भारत की भूमिका केवल एक भागीदार की नहीं है, बल्कि भारत इसमें सबसे महत्वपूर्ण और तकनीकी रूप से चुनौतीपूर्ण घटकों के निर्माण एवं सुपुर्दगी के लिए भी जिम्मेदार है। निम्नतापस्थापी (क्रायोस्टेट) जैसी जटिल प्रणालियों की एंड-टू-एंड डिलीवरी की जिम्मेदारी लेकर, भारतीय कंपनियों ने बड़े पैमाने पर सटीक निर्माण, निम्नतापविज्ञान (क्रायोजेनिक्स) और निर्वात (वैक्यूम) प्रौद्योगिकी जैसे जटिल क्षेत्रों में विश्व स्तरीय विशेषज्ञता विकसित की है। इस प्रयास में लगभग 200 से अधिक भारतीय वैज्ञानिक और अभियंता (इंजीनियर) शामिल हैं। साथ ही, लार्सन एंड टुब्रो (एल एंड टी), आइनॉक्स इंडिया (Inox India) और टाटा कंसल्टिंग इंजीनियर्स (T C E) जैसे प्रमुख औद्योगिक भागीदार भी शामिल हैं। भारत का योगदान ITER की सफलता के लिए अभिन्न है और यह वैश्विक मंच पर देश की वैज्ञानिक और औद्योगिक शक्ति प्रदर्शन का एक शक्तिशाली अंग है।

भारत में संलयन अनुसंधान: प्लाज़्मा अनुसंधान संस्थान (इंस्टीट्यूट ऑफ़ प्लाज़्मा रिसर्च, IPR)

जब विश्व नाभिकीय संलयन की शक्ति को प्रौद्योगिकी के रूप में विकसित करने के लिए मिलकर काम कर रहा है, तब भारत भी इस प्रयास में केवल एक भागीदार के रूप में ही नहीं, बल्कि एक महत्वपूर्ण और सक्षम राष्ट्र के रूप में खड़ा है। भारत की यह क्षमता दशकों से देश में चल रहे अनुसंधान एवं विकास का परिणाम है, जिसका नेतृत्व गांधीनगर, गुजरात में स्थित प्लाज़्मा अनुसंधान संस्थान (इंस्टीट्यूट ऑफ़ प्लाज़्मा रिसर्च, IPR) कर रहा है। IPR भारत के परमाणु ऊर्जा विभाग (DAE) के तहत एक स्वायत्त संस्थान है। वर्ष 1986 में स्थापित यह संस्थान, प्लाज़्मा विज्ञान एवं तापनाभिकीय संलयन (थर्मोन्यूक्लियर फ्यूज़न) में मौलिक और अनुप्रयुक्त अनुसंधान के लिए देश के प्रमुख संस्थान के रूप में कार्यरत है। IPR ने अब तक स्वदेशी रूप से विभिन्न टोकामक डिज़ाइन और निर्मित किए हैं। वर्ष 1989 में प्रचालित किया गया 'आदित्य टोकामक', भारत का पहला स्वदेशी रूप से डिज़ाइन एवं निर्मित किया गया टोकामक है। यह एक मध्यम आकार की मशीन है। वर्ष 2016 में इसके उन्नयित स्वरूप 'आदित्य-U' (ADITYA-U) द्वारा लगभग 200 kA प्लाज़्मा करंट और 350 मिलीसेकंड की प्रचालन अवधि हासिल की गई है, जो भारत को अगली पीढ़ी के टोकामक विकास के पायदान पर लाती है। SST-1 (स्टेडी स्टेट सुपरकंडक्टिंग टोकामक-1) एक उन्नत, मध्यम आकार का स्थिर-अवस्था अतिचालक टोकामक है जिसका प्राथमिक उद्देश्य भविष्य के संलयन-आधारित बिजली उत्पादन संयंत्रों हेतु स्थिर-अवस्था (स्टेडी-स्टेट) प्रचालन, दीर्घ प्रचालन अवधि हासिल करना और अतिचालक (सुपरकंडक्टिंग) चुंबकों का अध्ययन करना है। आदित्य (ADITYA) के द्वारा जहां टोकामक संचालन हेतु बुनियादी कौशल प्राप्त किया गया, उन्नयित स्वरूप 'आदित्य-U' (ADITYA-U) से प्लाज़्मा को आकार देने की शुरूआत हुई। SST-1 ने अतिचालक चुंबकों और स्थिर-अवस्था प्रचलन जैसी चुनौतियों को लक्षित किया। IPR, निश्चित रूप से वैश्विक ITER परियोजना में भारत की सफल भागीदारी का प्रत्यक्ष उदाहरण है।

नाभिकीय संलयन - एक स्वच्छ ऊर्जा भविष्य की ओर

नाभिकीय संलयन अपार ऊर्जा का स्रोत है। एक ऐसा स्रोत जो वस्तुतः असीमित ईंधन (समुद्री जल से ड्यूटीरियम और

लिथियम से ट्रिशियम) का उपयोग करता है; जो कोई ग्रीनहाउस गैस या वायु प्रदूषक उत्सर्जित नहीं करता; जो कोई दीर्घकालिक रेडियोधर्मी (रेडियोसक्रिय) अपशिष्ट उत्पन्न नहीं करता; और जो स्वाभाविक रूप से सुरक्षित है, जिसमें नाभिकीय गलन (न्यूक्लियर मेल्टडाउन) का कोई खतरा भी नहीं है। यह मानवता की ऊर्जा और पर्यावरणीय दुविधाओं का एक स्थायी समाधान प्रदान करने में सक्षम है। परंतु, इस तकनीक को व्यावसायिक वास्तविकता में बदलने की राह निःसंदेह लंबी और जटिल चुनौतियों से भरी है। ये चुनौतियां भौतिकी, पदार्थ विज्ञान, अभियांत्रिकी (इंजीनियरिंग) और अर्थशास्त्र के क्षेत्रों में फैली हुई हैं। पिछले एक दशक में इन क्षेत्रों में हुई प्रगति ने इस क्षेत्र में एक नए उत्साह और आशा का संचार किया है।

लेखक का परिचय

मन्नू मान

श्रीमती मन्नू मान, भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, मुंबई के स्वास्थ्य भौतिकी प्रभाग (HPD) में वैज्ञानिक अधिकारी-डी के पद पर कार्यरत हैं।

गुजरात विज्ञान एवं प्रौद्योगिकी परिषद द्वारा आयोजित 'गुजरात स्टेम क्विज़ 3.0' के विजेताओं का भाभा परमाणु अनुसंधान केंद्र, ट्रॉबे, मुंबई का दौरा