संलयन (फ्यूज़न) ऊर्जा के लयि भारत का रोडमैप

प्रलिमि्स के लयि: नाभकीय संलयन, नाभकीय संलयन और नाभकीय वखिंडन के बीच अंतर।

मेन्स के लयि: भारत की तकनीकी स्वायत्तता के लयि संलयन अनुसंधान का रणनीतकि महत्त्व,

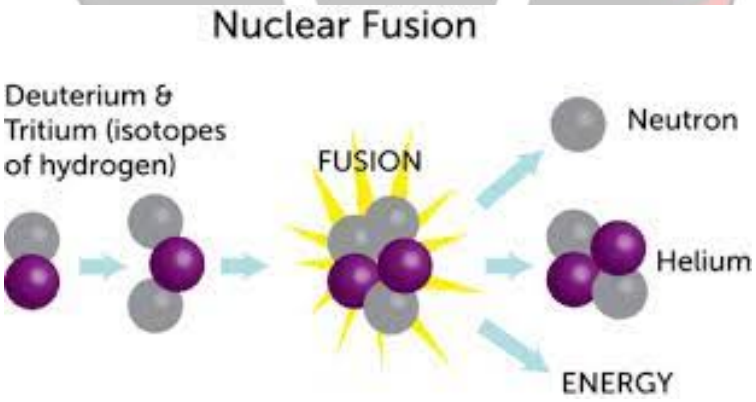
स्रोत:TH

चर्चा में क्यों?

गांधीनगर स्थति प्लाज़्मा अनुसंधान संस्थान (IPR) के शोधकर्त्ताओं ने भारत की संलयन (फ्यूज़न) ऊर्जा के लयि एक रोडमैप प्रस्तावति कयि है, जसिमें **स्टेडी-स्टेट सुपरकंडक्टगि टोकामक-भारत (SST-भारत)** रएिक्टर के वकिास पर वशिष ध्यान दयि गया है। यह कदम भारत की ऊर्जा रणनीत में एक बड़ा मील का पत्थर साबति होगा।

संलयन (फ्यूज़न) क्या है?

- **परचिय: संलयन (Fusion)** वह प्रक्रयि है जसिमें दो छोटे और हल्के परमाणु (जैसे हाइड्रोजन समस्थानकि) आपस में मलिकर एक बड़ा और भारी **परमाणु बनाते** हैं और इस दौरान अत्यधकि मात्रा में ऊर्जा उत्सर्जति होती है। यही ऊर्जा प्रक्रयि **सूर्य और तारों को ऊर्जा** प्रदान करती है।
  - **उदाहरण:** सूर्य में हाइड्रोजन के नाभकि आपस में संलयति होकर हीलयिम बनाते हैं और ऊर्जा का उत्सर्जन करते हैं, जो प्रकाश और ऊष्मा के रूप में बाहर उत्सर्जति होती है।
- **ऊर्जा उत्सर्जन:** नाभकिों के संलयन से ऊर्जा इसलयि उत्सर्जति होती है क्योंकि संलयति उत्पाद का **द्रव्यमान, मूल परमाणुओं के कुल द्रव्यमान से कम** होता है। यह **"खोया हुआ" द्रव्यमान (Lost Mass)**, जसि **द्रव्यमान अपवर्तन (Mass Defect)** कहते हैं, आइंस्टीन के वशिष सापेक्षता सद्धिांत ($E=mc^2$) के अनुसार ऊर्जा में परविर्तति हो जाता है।



- **संलयन के लयि शर्तें**:
  - **उच्च तापमान**: लगभग **100 मलियिन°C** .
  - **उच्च दाब**: परमाणुओं के नाभकिों का संलयन के लयि पर्याप्त रूप से पास होना
  - **प्लाज़्मा**: यह पदार्थ उच्च ऊर्जा अवस्था में होता है जहाँ परमाणु आयनों और इलेक्ट्रॉनों में टूट जाते हैं।
- **टोकामक**: टोकामक एक **संलयन रएिक्टर** है जो **डोनट के आकार के पात्र** में **प्लाज़्मा को** सीमति और नयिंत्रति करने के लयि **चुंबकीय क्षेत्रों** का उपयोग करता है। इसकी प्रभावशीलता को इस बात से मापा जाता है कयि यह प्लाज़्मा को बनिा वघिटन के कतिनी देर तक रोक सकता है।
  - लंबी सीमतिीकरण अवधि (longer confinement times) रएिक्टरों को नरिंतर और वश्विसनीय संलयन प्रतक्रियाएँ प्राप्त करने के

करीब लाती है।

- **Q मान (ऊर्जा लाभ कारक**: **Q मान** एक संलयन रिएक्टर की **दक्षता** को मापता है।
  - **यह उत्पादित ऊर्जा और उत्सर्जित ऊर्जा का अनुपात है। Q मान 1 से ज़्यादा (Q>1) होने** का मतलब है कि रिएक्टर अपनी खपत से ज़्यादा ऊर्जा उत्पन्न करता है।
- **संलयन बनाम विखंडन:** विखंडन परमाणु रिएक्टरों में प्रयुक्त होने वाली प्रक्रिया है। विखंडन में, एक **भारी नाभिक (जैसे यूरेनियम) छोटे नाभिकों में विखंडित होता** है, जिससे ऊर्जा मुक्त होती है।
  - दूसरी ओर, संलयन में हल्के नाभिकों का संयोजन करके ऊर्जा मुक्त की जाती है। **विखंडन की तुलना में संलयन से बहुत कम रेडियोधर्मी** अपशिष्ट उत्सर्जित होता है, जिससे यह स्वच्छ ऊर्जा के लिये एक अधिक आकर्षक विकल्प बन जाता है।

नाभिकीय संलयन बनाम नाभिकीय विखंडन

	नाभिकीय विखंडन	नाभिकीय संलयन
परिभाषा	विखंडन का आशय एक बड़े परमाणु का दो या दो से अधिक छोटे परमाणुओं में विभाजन से है।	नाभिकीय संलयन का आशय दो हल्के परमाणुओं के संयोजन से एक भारी परमाणु नाभिक के निर्माण की प्रक्रिया से है।
घटना	विखंडन प्रक्रिया सामान्य रूप से प्रकृति में घटित नहीं होती है।	प्रायः सूर्य जैसे तारों में संलयन प्रक्रिया घटित होती है।
ऊर्जा आवश्यकता	विखंडन प्रक्रिया में दो परमाणुओं को विभाजित करने में बहुत कम ऊर्जा लगती है।	दो या दो से अधिक प्रोटॉन को एक साथ लाने के लिये अत्यधिक उच्च ऊर्जा की आवश्यकता होती है।
प्राप्त ऊर्जा	विखंडन द्वारा जारी ऊर्जा रासायनिक प्रतिक्रियाओं में जारी ऊर्जा की तुलना में एक लाख गुना अधिक होती है, हालाँकि यह नाभिकीय संलयन द्वारा जारी ऊर्जा से कम होती है।	संलयन से प्राप्त ऊर्जा विखंडन से निकलने वाली ऊर्जा से तीन से चार गुना अधिक होती है।
ऊर्जा उत्पादन	विखंडन प्रक्रिया का उपयोग परमाणु ऊर्जा संयंत्रों में किया जाता है।	यह ऊर्जा उत्पादन के लिये एक प्रायोगिक तकनीक है।

संलयन ऊर्जा के लिये भारत का रोडमैप क्या है?

- **भारत की वर्तमान संलयन क्षमताएँ**: आईपीआर में भारत के **स्टेडी-स्टेट सुपरकंडक्टिंग टोकामक-भारत (SST-1) ने 650 मिलीसेकंड** के लिये प्लाज़्मा परिरोध प्राप्त कर लिया है (और इसे 16 मिनट तक के लिये डिज़ाइन किया गया है), हालाँकि इसे **विद्युत उत्पादन के लिये डिज़ाइन** नहीं किया गया है, बल्कि यह एक प्रायोगिक आधार के रूप में कार्य करता है।
  - भारत पहले से ही फ्राँस में अंतर्राष्ट्रीय थर्मोन्यूक्लियर प्रायोगिक रिएक्टर (ITER) परियोजना का हिस्सा है, जो चुंबकीय परिरोध तकनीकों का उपयोग करके विश्व का सबसे बड़ा नाभिकीय संलयन का प्रयोग है। ITER का लक्ष्य **10 का Q मान प्राप्त** करना है।
- **एसएसटी-भारत: SST-भारत** को प्रयोगों से आगे अगले कदम के रूप में योजनाबद्ध किया गया है, जिसका उद्देश्य **वास्तविक रूप से विद्युत का उत्पादन** करना है।
  - **SST-भारत** विज़न का लक्ष्य आरंभ में **5 Q मान वाले 130 मेगावाट के संलयन-विखंडन हाइब्रिड रिएक्टर** का निर्माण करना है।
  - भारत की योजना वर्ष **2060** तक एक पूर्ण रूप से संचालित रिएक्टर स्थापित करने की है। इसका लक्ष्य **20 का महत्वाकांक्षी आउटपुट-टू-इनपुट पावर अनुपात (Q)** हासिल करना और लगभग **250 मेगावाट विद्युत उत्पादन** करना है।
- **प्रौद्योगिकी उपाय:**
  - **डिजिटल ट्विन्स: परिस्थितियों का अनुकरण करने और डिज़ाइनों का परीक्षण करने के लिये टोकामक्स की आभासी प्रतिकृतियाँ।**
  - मशीन लर्निंग: कृत्रिम बुद्धिमत्ता और मशीन लर्निंग का लाभ उठाने से प्लाज़्मा के पूर्वानुमान और प्रबंधन में मदद मिलती है, जो बेहतर प्लाज़्मा परिरोधन (confinement) के लिये अत्यंत महत्त्वपूर्ण है।
  - विकिरण प्रतिरोधी सामग्रियों का विकास ऐसी सामग्रियों के डिज़ाइन पर ध्यान केंद्रित करना जो संलयन रिएक्टरों में अत्यधिक विकिरण स्तरों का सामना कर सकें।
  - सुपरकंडक्टिंग मैग्नेट्स: उच्च-प्रदर्शन वाले सुपरकंडक्टिंग चुंबकों पर शोध किया जा रहा है ताकि अधिक शक्तिशाली चुंबकीय क्षेत्र तैयार किए जा सकें, जिससे प्लाज़्मा का बेहतर परिरोधन संभव हो सके।

संलयन ऊर्जा में वैश्विक प्रगति

- **यूनाइटेड किंगडम:** यूके का **STEP कार्यक्रम** वर्ष 2040 तक एक प्रोटोटाइप फ्यूज़न पावर प्लांट स्थापित करने का लक्ष्य रखता है।
- **अमेरिका:** अमेरिका की कई निजी कंपनियों का दावा है कि वे वर्ष 2030 के दशक में ग्रिड से जुड़ा हुआ फ्यूज़न पावर उपलब्ध करा देंगी।
- **चीन:** चीन का एक्सपेरिमेंटल एडवांस्ड सुपरकंडक्टिंग टोकामक (EAST) पहले ही प्लाज़्मा होल्डिंग अवधि का रिकॉर्ड बना चुका है (लगभग

1,066 सेकंड तक)

संलयन ऊर्जा के लिये भारत के रोडमैप के समक्ष क्या चुनौतियाँ हैं?

- **उच्च लागत**: संलयन अनुसंधान के लिये उन्नत प्रौद्योगिकी, बुनियादी ढाँचे और रिएक्टरों में महत्त्वपूर्ण निवेश की आवश्यकता होती है, जिससे **भारत के सार्वजनिक क्षेत्र के बजट पर दबाव** पड़ता है।
- **लंबी विकास समय-सीमा: संलयन रिएक्टर के लिये भारत का वर्ष 2060** का लक्ष्य वैश्विक प्रयासों की तुलना में धीमा है, जिससे व्यावसायीकरण का मार्ग लंबा हो गया है।
    - **चीन** और **अमेरिका** जैसे देश संलयन के क्षेत्र में तेज़ी से प्रगति कर रहे हैं, जिससे भारत पर भी गति बनाए रखने का दबाव बढ़ रहा है।
- **निजी क्षेत्र की सीमित भागीदारी**: **अमेरिका** और **यूरोपीय संघ के विपरीत**, भारत का निजी क्षेत्र संलयन अनुसंधान में छोटी भूमिका निभाता है, जिससे नवाचार और प्रगति की गति धीमी हो जाती है।
- **तकनीकी बाधाएँ**: चुनौतियों में **प्लाज़्मा नियंत्रण**, आवश्यक **ऊर्जा लाभ (Q मान)** प्राप्त करना तथा **विकिरण प्रतिरोधी सामग्री विकसित** करना शामिल है, जो संलयन की प्राप्ति को जटिल बनाता है।
- **अन्य ऊर्जा स्रोतों के साथ प्रतिस्पर्द्धा**: संलयन ऊर्जा का मुकाबला सौर, पवन और परमाणु विखंडन जैसे ऊर्जा स्रोतों से होता है। वहीं, भारत की व्यापक ऊर्जा प्रतिबद्धताएँ—जैसे कि वर्ष 2070 तक **नेट-ज़ीरो (Net-Zero)** हासिल करने का लक्ष्य कभी-कभी संलयन परियोजनाओं से ध्यान भटका सकती हैं।
- **अनिश्चित वाणिज्यिक व्यवहार्यता**: यदि संलयन सफल भी हो जाए, तो भी मौजूदा ऊर्जा स्रोतों की तुलना में इसकी **लागत-प्रभावशीलता** अनिश्चित बनी रहेगी।

भारत फ्यूज़न पावर अनुसंधान एवं विकास में निवेश से रणनीतिक लाभ किस प्रकार सुनिश्चित कर सकता है?

- **नीति और वित्त पोषण समर्थन: इसरो (ISRO)** या परमाणु विखंडन (nuclear fission) मिशनों के समान, **मिशन-मोड फंडिंग** को दीर्घकालिक आधार पर आवंटित करना।
    - **निजी क्षेत्र की भागीदारी** (विशेष रूप से उन्नत सामग्री, **एआई (AI)** और डिजिटल सिमुलेशन के क्षेत्रों में) को शामिल करना।
- **वैश्विक सहयोग**: आईटीईआर से आगे की गतिविधियों का विस्तार करना, जिसमें **अमेरिका, ब्रिटेन और यूरोपीय संघ की फ्यूज़न** प्रयोगशालाओं के साथ द्विपक्षीय साझेदारियाँ शामिल हैं।
    - अंतर्राष्ट्रीय **संलयन डेटा साझाकरण** पहल और भारतीय वैज्ञानिकों के **संयुक्त प्रशिक्षण में** भाग लेना।
- **यथार्थवादी लक्ष्य निर्धारण**: संलयन ऊर्जा को एक **रणनीतिक अनुसंधान एवं विकास** सीमा के रूप में देखा जाना चाहिये, न कि एक निकट-अवधि ऊर्जा स्रोत के रूप में।
    - वैश्विक मानदंडों के साथ मील के पत्थर को संरेखित करना लेकिन **स्वदेशी नवाचार** और प्रौद्योगिकी स्थानीयकरण को प्राथमिकता देना।
- **व्यापक प्रगति के लिये संलयन अनुसंधान एवं विकास का लाभ उठाना: सुपरकंडक्टिंग सामग्री**, **विकिरण परिरक्षण**, **प्लाज़्मा नियंत्रण** और **एआई-संचालित सिमुलेशन** में क्षमताओं को बढ़ाने के लिये संलयन अनुसंधान का उपयोग करना।
    - संलयन अनुसंधान से उत्पन्न नवाचारों के माध्यम से रक्षा और अंतरिक्ष प्रौद्योगिकी जैसे प्रमुख क्षेत्रों में भारत की आत्मनिर्भरता और स्वतंत्रता को मज़बूत करना।

निष्कर्ष:

भारत का **संलयन/फ्यूज़न रोडमैप** महत्वाकांक्षी तो है, लेकिन सावधानी भी आवश्यक है। इसका लक्ष्य **वर्ष 2060** तक एक डेमोंस्ट्रेशन प्लांट स्थापित करना है, जबकि **यूके, अमेरिका और चीन** इससे पहले प्रोटोटाइप विकसित करने की दिशा में आगे बढ़ रहे हैं। यद्यपि यह परियोजना महँगी और अनिश्चित है, फिर भी यह भारत के ऊर्जा भविष्य के लिये मूल्यवान **प्रौद्योगिकीय** और **रणनीतिक लाभ** प्रदान कर सकती है।

दृष्टि मुख्य परीक्षा प्रश्न:

प्रश्न: संलयन ऊर्जा को अक्सर स्वच्छ ऊर्जा का 'पवित्र प्याला (होली ग्रेल)' कहा जाता है। भारत के ऊर्जा मिश्रण में संलयन को अपनाने के अवसरों और चुनौतियों का आलोचनात्मक विश्लेषण कीजिये।

UPSC सिविल सेवा परीक्षा, विगत वर्ष प्रश्न

??????????:

प्रश्न. एक नाभिकीय रिएक्टर में भारी जल का क्या कार्य होता है? (2011)

(a) न्यूट्रॉन की गति को कम करना

(b) न्यूट्रॉन की गति को बढ़ाना

(c) रिएक्टर को ठंडा करना

(d) नाभिकीय क्रिया को रोकना

उत्तर: (a)

??????:

प्रश्न. ऊर्जा की बढ़ती हुई ज़रूरतों के परिप्रेक्ष्य में क्या भारत को अपने नाभिकीय ऊर्जा कार्यक्रम का विस्तार करना जारी रखना चाहिये? नाभिकीय ऊर्जा से संबंधित तथ्यों एवं भय की विवेचना कीजिये। **(2018)**

PDF Refernece URL: https://www.drishtiias.com/hindi/printpdf/indias-roadmap-for-fusion-power